

## Sommaire

<b>Introduction</b> .....	9
<b>Notations générales communes aux deux parties</b> .....	13
 <b>Première partie : Aspects statistiques fondamentaux</b> .....	 15
<b>Notations propres à la première partie</b> .....	16
 <b>Chapitre I. Description statistique et évolution d'un système gazeux réactif</b> .....	 17
I.1. Introduction.....	17
I.2. Description statistique du milieu .....	18
I.2.1. Grandeurs d'état.....	18
I.2.2. Grandeurs de transport.....	20
I.3. Evolution des systèmes gazeux.....	22
I.3.1. Equation de Boltzmann.....	22
I.3.2. Propriétés générales.....	23
I.3.3. Equations de bilan macroscopique.....	23
I.4. Généralités sur les collisions .....	24
I.4.1. Collisions élastiques .....	25
I.4.2. Collisions inélastiques .....	28
I.4.3. Collisions réactives.....	28
I.5. Propriétés du terme collisionnel.....	29
I.5.1. Explicitation du terme collisionnel .....	29
I.5.2. Temps caractéristiques. Fréquences de collision.....	31
Annexe I.1. Eléments d'algèbre tensorielle .....	32
Annexe I.2. Eléments de physique moléculaire.....	35
Annexe I.3. Compléments sur les collisions .....	40
 <b>Chapitre II. Régimes collisionnels d'équilibre et de non-équilibre</b> .....	 45
II.1. Introduction .....	45
II.2. Régimes collisionnels. Généralités.....	45
II.3. Gaz purs. Régimes d'équilibre .....	48
II.3.1. Gaz monoatomiques .....	48
II.3.2. Gaz diatomiques.....	49

II.4. Gaz purs diatomiques. Régime de non-équilibre général.....	51
II.5. Gaz purs diatomiques. Régimes de non-équilibre particuliers.....	54
II.5.1. Collisions TV les plus probables.....	54
II.5.2. Collisions VV les plus probables.....	54
II.5.3. Collisions résonantes les plus probables.....	56
II.5.4. Conditions physiques d'utilisation des résultats.....	57
II.6. Mélanges de gaz. Régimes d'équilibre.....	57
II.6.1. Mélanges de gaz monoatomiques.....	57
II.6.2. Mélanges de gaz diatomiques.....	58
II.7. Mélanges de gaz diatomiques hors d'équilibre vibrationnel.....	59
II.8. Mélanges de gaz réactifs.....	60
II.8.1. Gaz réactifs sans modes internes.....	60
II.8.2. Gaz réactifs avec modes internes.....	61
Annexe II.1. Le théorème H.....	63
Annexe II.2. Propriétés de la distribution maxwellienne.....	64
Annexe II.3. Modèles d'énergies internes.....	65
Annexe II.4. Equation générale de relaxation vibrationnelle.....	67
Annexe II.5. Equations de relaxation vibrationnelle particulières.....	68
Annexe II.6. Propriétés des intégrales euleriennes.....	70

### Chapitre III. Transport et relaxation en régime de quasi-équilibre : Généralités. Gaz purs..... 73

III.1. Introduction.....	73
III.2. Développement en série de la fonction de distribution.....	73
III.2.1. Définitions des régimes d'écoulement.....	73
III.2.2. Classification des régimes.....	75
III.3. Recherche des solutions d'ordre un.....	76
III.3.1. Gaz purs à collisions élastiques : gaz monoatomiques.....	76
III.3.2. Gaz purs diatomiques comportant un mode interne.....	81
III.3.3. Gaz purs diatomiques. Extension à deux modes internes.....	87
Annexe III.1. Bases orthogonales.....	91
Annexe III.2. Systèmes d'équations pour les coefficients a, b, d.....	94
Annexe III.3. Expressions des intégrales collisionnelles.....	95
Annexe III.4. Influence du modèle de collision sur les termes de transport.....	97
Annexe III.5. Linéarisation de l'équation de relaxation.....	98
Annexe III.6. Déséquilibre vibrationnel par niveau.....	100

### Chapitre IV. Transport et relaxation en régime de quasi-équilibre : Mélanges de gaz..... 101

IV.1. Introduction.....	101
IV.2. Mélanges de gaz à collisions élastiques.....	101
IV.2.1. Méthode Chapman-Enskog.....	101
IV.2.2. Termes de transport. Equations de Navier-Stokes.....	104
IV.3. Mélanges binaires de gaz diatomiques.....	107

IV.3.1. Cas d'un seul mode interne .....	107
IV.3.2. Cas de deux modes internes.....	109
IV.4. Mélanges de gaz réactifs.....	112
Annexe IV.1. Systèmes d'équations pour les coefficients a, b, l, d .....	113
Annexe IV.2. Intégrales collisionnelles et simplifications .....	117
Annexe IV.3. Coefficients de transport simplifiés.....	121
Annexe IV.4. Une méthode alternative : la méthode Gross-Jackson.....	123
<b>Chapitre V. Transport et relaxation en régime de non-équilibre .....</b>	<b>127</b>
V.1. Introduction.....	127
V.2. Gaz hors d'équilibre vibrationnel. Cas SNE .....	127
V.2.1. Gaz purs diatomiques.....	127
V.2.2. Mélanges de gaz diatomiques.....	130
V.2.3. Approximations usuelles. Cas SNE.....	132
V.3. Mélanges de gaz réactifs. Cas $(SNE)_C$ .....	133
V.3.1. Cas $(SNE)_C+(WNE)_V$ .....	133
V.3.2. Cas $(SNE)_C+(SNE)_V$ .....	138
Annexe V.1. Gaz purs hors d'équilibre vibrationnel.....	141
Annexe V.2. Equation de relaxation vibrationnelle à l'ordre un .....	143
Annexe V.3. Mélanges de gaz hors d'équilibre vibrationnel.....	144
Annexe V.4. Expressions des coefficients g et de la pression de relaxation.....	147
Annexe V.5. Interaction vibration-dissociation-recombinaison.....	149
<b>Chapitre VI. Méthode Chapman-Enskog généralisée.....</b>	<b>153</b>
VI.1. Introduction.....	153
VI.2. Méthode générale.....	153
VI.3. Ecoulement de gaz pur avec excitation vibrationnelle.....	154
VI.3.1. Termes de transport.....	156
VI.3.2. Expressions approchées des flux de chaleur.....	157
VI.4. Extension aux mélanges de gaz hors d'équilibre vibrationnel.....	158
VI.5. Gaz réactifs.....	159
VI.6. Conclusions sur les écoulements hors d'équilibre.....	161
Annexe VI.1. Gaz purs avec excitation vibrationnelle.....	161
Annexe VI.2. Termes de transport en milieu non dissocié.....	164
Annexe VI.3. Exemple de non-équilibre particulier.....	167
Collisions VV prépondérantes.....	167
Annexe VI.4. Une méthode simplifiée : la méthode B.G.K. ....	168
Annexe VI.5. Conditions aux limites pour l'équation de Boltzmann.....	170
Annexe VI.6. Régime moléculaire libre.....	173
Annexe VI.7. Régimes d'écoulements hypersoniques .....	175

<b>Deuxième partie : Aspects macroscopiques et applications</b> .....	<b>177</b>
<b>Notations propres à la deuxième partie</b> .....	<b>179</b>
<b>Chapitre VII. Aspects généraux des écoulements gazeux</b> .....	<b>181</b>
VII.1. Introduction.....	181
VII.2. Equations générales. Récapitulation et aspects macroscopiques.....	182
VII.2.1. Remarques sur les termes de transport.....	182
VII.2.2. Formes particulières des équations de bilan.....	183
VII.2.3. Bilan entropique.....	184
VII.2.4. Conditions aux limites.....	186
VII.3. Adimensionnement et aspects physiques des équations générales.....	187
VII.3.1. Grandeurs caractéristiques.....	187
VII.3.2. Equations de conservation adimensionnées.....	188
VII.3.3. Nombres sans dimension. Classification des écoulements.....	190
VII.4. Ecoulements généraux caractéristiques.....	193
VII.4.1. Ecoulements permanents.....	193
VII.4.2. Ecoulements instationnaires.....	194
VII.4.3. Modèles simplifiés d'écoulements.....	195
VII.4.4. Stabilité des écoulements. Ecoulements turbulents.....	196
Annexe VII.1. Equations générales. Récapitulation.....	196
Annexe VII.2. Flux de chaleur instationnaire à une interface gaz-solide.....	200
Annexe VII.3. Sur les interfaces gaz-liquide.....	201
Annexe VII.4. Compléments sur les bilans globaux.....	203
<b>Chapitre VIII. Eléments de dynamique des gaz</b> .....	<b>205</b>
VIII.1. Introduction.....	205
VIII.2. Modèle du gaz idéal. Conséquences.....	205
VIII.3. Ecoulements isentropiques.....	206
VIII.3.1. Ecoulements permanents quasi-monodimensionnels.....	206
VIII.3.2. Ecoulements permanents multidimensionnels.....	207
VIII.3.3. Ecoulements instationnaires monodimensionnels.....	207
VIII.4. Ondes de choc et discontinuités dans les écoulements.....	208
VIII.4.1. Onde de choc droite. Relations de Rankine-Hugoniot.....	208
VIII.4.2. Modèle du gaz idéal.....	210
VIII.5. Ecoulements dissipatifs.....	211
VIII.5.1. Domaine d'influence. Couche limite.....	212
VIII.5.2. Equations générales. Ecoulements bidimensionnels.....	213
Annexe VIII.1. Ondes de choc. Configuration et cinématique.....	216
Annexe VIII.2. Compléments sur la couche limite.....	219
Annexe VIII.3. Cas typiques simples de couche limite.....	224
Annexe VIII.4. La couche limite turbulente.....	228

<b>Chapitre IX. Ecoulements réactifs</b> .....	<b>231</b>
IX.1. Introduction.....	231
IX.2. Généralités sur les réactions.....	231
IX.3. Ecoulements en équilibre.....	232
IX.3.1. Loi d'action de masse. Constante d'équilibre.....	232
IX.3.2. Exemples de réactions.....	233
IX.3.3. Exemples d'écoulements en équilibre.....	236
IX.4. Ecoulements hors d'équilibre.....	236
IX.4.1. Cinétique chimique.....	238
IX.4.2. Cinétique vibrationnelle.....	239
IX.4.3. Cinétique mixte.....	241
IX.5. Cas typiques d'écoulements euleriens hors d'équilibre.....	243
IX.5.1. Ecoulement à l'aval d'une onde de choc droite.....	243
IX.5.2. Ecoulement en tuyère supersonique.....	249
IX.5.3. Ecoulement autour d'un corps.....	253
Annexe IX.1. Evolution des populations vibrationnelles à l'aval d'une onde de choc.....	254
Annexe IX.2. Compléments sur la chimie de l'air à haute température.....	257
Annexe IX.3. Compléments sur les constantes de vitesse de réaction.....	261
Annexe IX.4. Compléments sur les écoulements en tuyère.....	262
 <b>Chapitre X. Ecoulements réactifs en régime dissipatif</b> .....	 <b>265</b>
X.1. Introduction.....	265
X.2. Couches limites à l'équilibre chimique.....	266
X.2.1. Cas de la plaque plane.....	266
X.2.2. Cas du point d'arrêt.....	267
X.2.3. Couche limite réactive et catalycité de paroi.....	268
X.2.4. Couche limite le long d'un corps.....	270
X.3. Couches limites hors d'équilibre vibrationnel.....	270
X.3.1. 1 <sup>er</sup> exemple : couche limite à l'aval d'une onde de choc mobile.....	270
X.3.2. 2 <sup>eme</sup> exemple : couche limite d'une tuyère supersonique.....	272
X.3.3. 3 <sup>eme</sup> exemple : couche limite thermique à l'aval d'une onde de choc réfléchie.....	273
X.4. Ecoulements bidimensionnels.....	276
X.4.1. Ecoulement en tuyère hypersonique.....	276
X.4.2. Ecoulement hypersonique autour d'un corps.....	279
X.4.3. Mélanges de jets supersoniques réactifs.....	281
Annexe X.1. Catalycité en régime de non-équilibre vibrationnel.....	283
Annexe X.2. Relations de Rankine-Hugoniot généralisées.....	285
Annexe X.3. Compléments sur la couche limite instationnaire.....	286
Annexe X.4. Compléments sur les lasers gazodynamiques $CO_2 - N_2$ .....	287
Annexe X.5. Compléments sur le transport en régime de non-équilibre.....	290

<b>Chapitre XI. Moyens d'essai et méthodes expérimentales</b> .....	293
XI.1. Introduction.....	293
XI.2. Le tube à choc.....	294
XI.2.1. Théorie du tube à choc simple.....	294
XI.2.2. Effets perturbateurs.....	296
XI.2.3. Ondes de choc réfléchies.....	301
XI.2.4. Techniques générales. Configuration et fonctionnement.....	304
XI.2.5. Méthodes de mesure générales.....	307
XI.3. La soufflerie hypersonique.....	314
XI.3.1. Généralités.....	314
XI.3.2. La soufflerie à choc réfléchi.....	317
Annexe XI.1. Expériences en vol réel.....	319
Annexe XI.2. Durée d'écoulement optimum en tube à choc.....	320
Annexe XI.3. Fonctionnement d'une soufflerie hypersonique à piston libre.....	322
Annexe XI.4. Effet de source en écoulement hypersonique.....	322
<b>Chapitre XII. Relaxation et cinétique en tube et soufflerie à choc</b> .....	323
XII.1. Introduction.....	323
XII.2. Relaxation vibrationnelle.....	324
XII.2.1. Temps de relaxation. Méthodes globales.....	324
XII.2.2. Populations vibrationnelles.....	328
XII.2.3. Catalycité vibrationnelle.....	335
XII.3. Cinétique chimique.....	337
XII.3.1. Constantes de vitesse de dissociation.....	337
XII.3.2. Mesures spectroscopiques résolues dans le temps.....	339
XII.3.3. Catalycité chimique.....	346
XII.3.4. Ecoulement hypersonique autour de corps.....	346
Annexe XII.1. Compléments sur l'émission IR.....	347
Annexe XII.2. Modèles de temps de relaxation de vibration.....	348
Annexe XII.3. Simulation de spectres d'émission.....	353
Annexe XII.4. Modèles cinétiques.....	355
<b>Bibliographie</b> .....	361
<b>Index des matières</b> .....	361