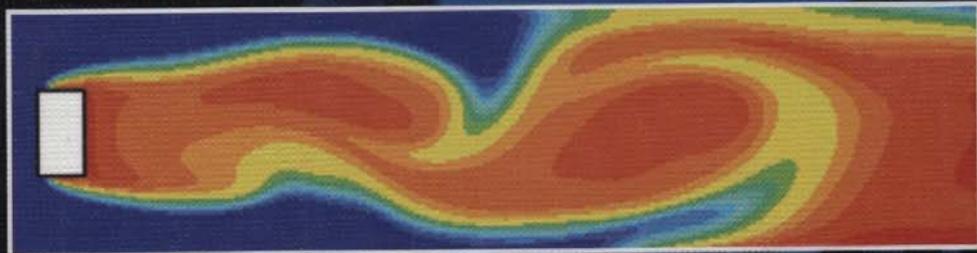


R. BORGHI • M. CHAMPION

MODÉLISATION ET THÉORIE DES FLAMMES



Editions TECHNIP

TABLE DES MATIÈRES

Préface	IX
Avant-propos	XI
Symboles et notations	XXV

Chapitre 1

ÉQUATIONS DE BILAN MACROSCOPIQUE POUR UN MÉLANGE DE GAZ RÉACTIFS

1.1 Fonctions et équations d'état d'un système thermodynamique gazeux multi-composants	3
1.2 Équation de bilan d'une grandeur extensive	7
1.3 Détermination des termes de production	10
1.3.1 Production chimique	10
1.3.2 Forces à distance	11
1.3.3 Théorème de l'énergie cinétique et expression de w_e	11
1.3.4 Terme source d'entropie w_S	12
1.4 Phénomènes de transports moléculaires et expressions des flux	15
1.4.1 Approximation linéaire	15
1.4.2 Flux de quantité de mouvement et tenseur des frottements	16
1.4.3 Flux de masse et de chaleur	17
1.4.4 Approximation binaire pour les espèces	19
1.4.5 Flux d'énergie	20
1.4.6 Expressions des coefficients de transport	21
1.5 Équations usuelles des écoulements réactifs	22
1.5.1 Équations usuelles	22
1.5.2 Équation pour la température	24
1.5.3 Équation pour l'enthalpie totale h_t	25
1.6 Les transferts par rayonnement	25
1.6.1 Définitions de base	26
1.6.2 Équation de transfert	27

1.6.3	Application au cas d'un milieu unidimensionnel, approximation d'Eddington	30
1.6.4	Milieux optiquement minces et épais	33
1.7	Nombres caractéristiques. Cas limites	34
	Références	35
	Annexe. Rappel sur les fonctions thermodynamiques d'un mélange de gaz parfaits	37

Chapitre 2

CINÉTIQUE CHIMIQUE APPLIQUÉE À LA COMBUSTION

2.1	Introduction	41
2.2	État final d'un système réactif	43
2.2.1	Rappel du calcul de l'équilibre chimique	43
2.2.2	Calcul de la température finale de combustion	48
2.2.3	Les réactions les plus énergétiques	51
2.3	Taux d'une réaction élémentaire	52
2.3.1	Définition	52
2.3.2	Lois cinétiques	53
2.3.3	Justification de l'énergie d'activation	53
2.4	Mécanismes réactionnels et réactions en chaîne	56
2.4.1	Schémas réactionnels	56
2.4.2	Cinétique chimique des schémas réactionnels	58
2.4.3	Approximation de l'état quasi-stationnaire	59
2.4.4	Équilibre chimique et équilibre chimique partiel	61
2.5	La combustion des mélanges H_2-O_2	63
2.5.1	Le mécanisme « complet »	63
2.5.2	Les « schémas réduits »	65
2.6	Combustion des hydrocarbures	67
2.6.1	Le mécanisme	67
2.6.2	Mécanismes « réduits »	74
2.6.3	Taux de réaction approchés « globaux »	75
2.7	Les « sous-espaces attracteurs »	77
2.7.1	L'espace des phases	77
2.7.2	Les « taux réduits »	79
2.8	Limites d'inflammabilité	83
2.8.1	Principes	83
2.8.2	Domaines d'inflammabilité pratiques	84
	Références	86

Chapitre 3

PHÉNOMÈNES TURBULENTS

3.1	Caractéristiques des écoulements turbulents	89
3.2	Les équations de bilan de l'écoulement turbulent moyen	93
3.2.1	Les moyennes	93
3.2.2	Les équations moyennes	96
3.2.3	Les flux de diffusion turbulente	99
3.3	Les caractéristiques quantitatives de la turbulence	101
3.3.1	L'énergie cinétique de la turbulence	101
3.3.2	L'échelle intégrale de longueur de la turbulence	102
3.3.3	Le « spectre » des échelles de longueur de la turbulence	103
3.4	La « modélisation » de la turbulence	107
3.4.1	Le modèle de turbulence « $k-\varepsilon$ », pour le cas où ρ est constant ...	107
3.4.2	Propriétés mathématiques du modèle $k-\varepsilon$	109
3.4.3	Le modèle de longueur de mélange de Prandtl	112
3.4.4	Commentaires au sujet du modèle $k-\varepsilon$	113
3.5	Les modèles de turbulence pour les écoulements à ρ variable	115
3.5.1	La nouvelle équation d'énergie cinétique	116
3.5.2	Le taux de dissipation	118
3.6	Le mélange turbulent à petite échelle	119
3.7	La diffusion turbulente de masse ou d'énergie	121
3.7.1	La diffusion Lagrangienne de Taylor	121
3.7.2	Modélisation Eulérienne du flux de diffusion turbulente	123
	Références	125

Chapitre 4

ÉTUDES GLOBALES DES ÉCOULEMENTS
EN COMBUSTION

4.1	Introduction	127
4.2	Équations globales	128
4.3	Chambres de combustion à volume très grand	131
4.3.1	Combustion à pression constante	132
4.3.2	Combustion dans un canal à section constante	133
4.4	Foyer « homogène »	137
4.4.1	Définition et équations	137
4.4.2	Cas d'une réaction globale unique	139
4.4	Une optimisation de foyer	142
4.5	Ondes de combustion planes	143
4.5.1	Définition et équations	143
4.5.2	La solution d'Hugoniot	145

4.5.3	Branche des détonations	147
4.5.4	Branche des déflagrations	148
4.5.5	Commentaires	149
4.6	Propagations d'ondes de combustion	150
4.6.1	Déflagrations	150
4.6.2	Détonations	152
Références	154

Chapitre 5

FLAMMES LAMINAIRES DE PRÉMÉLANGE

5.1	Caractéristiques des flammes laminaires de prémélange	155
5.1.1	Descriptions d'expériences	155
5.1.2	Interprétation physique d'une flamme de prémélange	157
5.1.3	Température adiabatique de flamme	159
5.1.4	Stabilisation d'une flamme de prémélange	159
5.1.5	Quelques chiffres	161
5.2	Approximation de la flamme isobare	161
5.2.1	Équations de la flamme isobare	163
5.2.2	Équations d'une flamme prémélangée adiabatique très pauvre, entretenu par une réaction $K + \nu O_x \rightarrow P$ unique	165
5.3	Théorie asymptotique des flammes isobares planes entretenues par une réaction globale	166
5.3.1	Équations stationnaires	168
5.3.2	Limite des grandes énergies d'activation	169
5.3.3	Équations de bilan dans les zones externes	170
5.3.4	Équations de la zone interne	172
5.3.5	Relations de saut	173
5.3.6	Vitesse de flamme adiabatique	174
5.3.7	Flamme considérée comme une discontinuité	177
5.4	Flamme stabilisée sur un brûleur plan	177
5.4.1	Équations du problème	177
5.4.2	Zones externes	179
5.4.3	Zone interne et relations de sauts	180
5.4.4	Raccordement	181
5.5	Flamme plane avec pertes thermiques. Phénomène d'extinction	183
5.6	Théorie asymptotique des flammes entretenues par une cinétique chimique en deux étapes	186
5.6.1	Schématisation à deux variables	186
5.6.2	Structure asymptotique de la flamme	188
5.6.3	Calcul de la vitesse de flamme	192
5.7	Instabilité de Darrieus-Landau	193

5.8 Théorie générale des ondes de diffusion-réaction	199
5.8.1 Position du problème	199
5.8.2 Existence d'une onde solitaire KPP	200
5.8.3 Vitesse de propagation asymptotique de l'onde	204
Références	206

Chapitre 6

FLAMMES LAMINAIRES DE DIFFUSION

6.1 Caractéristiques des flammes laminaires de diffusion	209
6.2 Équations thermochimiques de base. Fonctions de couplage de Schvab-Zeldovitch	212
6.2.1 Approximation de Schvab-Zeldovitch	212
6.2.2 Cas d'un mélange multiréactif	217
6.3 Flammes entretenues par une chimie infiniment rapide	219
6.3.1 Approximation de Burke-Schumann	219
6.3.2 Généralisation au cas d'une chimie complexe	221
6.3.3 Généralisation pour des coefficients de diffusion différents	222
6.4 Théorie des flammes entretenues par une chimie infiniment rapide	224
6.4.1 Les équations de base	224
6.4.2 Cas d'un écoulement uniforme	226
6.4.3 Méthode de Libby-Kleinstein	228
6.5 Flammes de diffusion étirées	231
6.5.1 Flamme étirée entretenue par une chimie infiniment rapide	231
6.5.2 Extinction de la flamme étirée	234
Références	237

Chapitre 7

FLAMMES TURBULENTES DE PRÉMÉLANGE

7.1 L'intérêt des flammes turbulentes	239
7.2 La structure des flammes turbulentes de prémélange	244
7.2.1 Les trois types de flammes turbulentes de prémélange	244
7.2.2 Implications pour la forme de la densité de probabilité (PDF) des fluctuations	256
7.3 Vitesse fondamentale de propagation et épaisseur d'une déflagration turbulente	260
7.3.1 Le problème	260
7.3.2 Dans le régime des flammes de type « épaissi »	261

7.3.3	Pour les flammes plissées	262
7.3.4	Des résultats expérimentaux	264
7.3.5	Bases théoriques utiles	266
7.4	La « modélisation » des flammes turbulentes de prémélange	267
7.4.1	La position du problème de la modélisation	268
7.4.2	Le domaine permis à la PDF des espèces réactives	269
7.5	La modélisation des flammes à chimie très rapide	272
7.5.1	Le modèle « Eddy Break-Up »	272
7.5.2	L'approche théorique de Bray et Moss	275
7.5.3	Une vérification expérimentale	278
7.5.4	Le modèle de « flammelettes » BMLC	281
7.5.5	Les modèles à équation de taux de réaction	286
7.6	Modélisation pour une chimie modérément rapide	289
7.6.1	Généralités	289
7.6.2	Les modèles de « flammelettes »	291
7.6.3	Le modèle à « PDF présumée »	293
7.6.4	Le calcul de la PDF du degré d'avancement dans une flamme turbulente de prémélange	296
7.6.5	« Fermeture » de l'équation de PDF	298
7.6.6	Un exemple de test de la méthode de calcul par PDF	302
7.7	La « turbulence créée par la flamme »	303
7.8	Quelques remarques pour conclure	307
Références	309

Chapitre 8

FLAMMES TURBULENTES NON PRÉMÉLANGÉES

8.1	Introduction	313
8.2	La structure des flammes de diffusion turbulentes	315
8.2.1	Descriptions des effets de la turbulence sur les flammes de diffusion	315
8.2.2	Classification des flammes de diffusion turbulentes	319
8.2.3	Évidences expérimentales	321
8.3	La modélisation des flammes turbulentes non prémélangées	325
8.3.1	Le but de la modélisation	325
8.3.2	Le calcul des flammes turbulentes non prémélangées à chimie rapide	327
8.3.3	Le taux de réaction moyen	331
8.4	La modélisation pour une chimie non infiniment rapide	333
8.4.1	La méthode des « flammelettes »	334
8.4.2	La méthode des PDF	335
8.4.3	Le modèle Lagrangien MIL	336
8.5	Quelques comparaisons entre calculs et expériences	338

8.6 Conclusions partielles	343
Références	344

SYMBOLES ET NOTATIONS

Chapitre 9

FLAMMES DANS LES BROUILLARDS DE GOUTTELETTES

9.1 Introduction	347
9.2 La vaporisation et la combustion d'une goutte isolée	348
9.2.1 Théorie quasi-stationnaire de la vaporisation d'une goutte sphérique	348
9.2.2 Théorie quasi-stationnaire de la combustion d'une goutte isolée	353
9.2.3 La loi du « d^2 »	356
9.2.4 Combustion d'une goutte en mouvement	359
9.2.5 L'inflammation d'une goutte dans un milieu chaud	361
9.3 La structure des flammes dans les brouillards	364
9.3.1 Combustion dans des brouillards prémélangés : les différents types de flammes	366
9.3.2 Structures des flammes de diffusion de brouillards	375
9.4 La description théorique des brouillards	380
9.4.1 Les différents types d'approche	380
9.4.2 L'approche statistique Eulérienne-Lagrangienne	382
9.4.3 Les approches Eulériennes LHF ou 2FE	384
9.4.4 Les échanges entre phases	387
9.5 Les problèmes cruciaux de modélisation de la combustion dans les brouillards	390
9.5.1 Taux de réaction en phase gazeuse dans les brouillards	390
9.5.2 La dispersion turbulente de gouttes dans les brouillards	394
Références	397
Index	399

Roland BORGHI • Michel CHAMPION

MODÉLISATION ET THÉORIE DES FLAMMES

La flamme apparaît comme un phénomène familier, facilement observable. De fait, ce terme recouvre un ensemble très varié de phénomènes issus de l'interaction entre mécanique des fluides, mécanismes de transferts moléculaires et cinétique chimique.

Cet ouvrage fait le point sur ce vaste domaine scientifique étudié de façons théorique, expérimentale et, plus récemment, numérique, depuis une cinquantaine d'années, en s'attachant à montrer que les divers phénomènes observés sont des solutions différentes de mêmes équations de départ. Les principaux sujets abordés de façon détaillée sont les flammes de prémélange, les flammes de diffusion, la stabilisation des flammes, les flammes se propageant dans les écoulements turbulents ou dans les brouillards de gouttelettes. L'analyse développée présente et utilise des méthodes génériques, qui permettront au lecteur d'aborder l'étude d'autres phénomènes que ceux explicitement décrits dans les différents chapitres. Par ailleurs, bien que centré sur les phénomènes de flammes, l'ouvrage déborde largement ce sujet en introduisant d'autres types de systèmes réactifs tels que, par exemple, le réacteur bien mélangé ou la détonation.

Cet ouvrage sera utile aux étudiants de troisième cycle et des écoles d'ingénieurs spécialisées, ainsi qu'aux ingénieurs impliqués dans la modélisation des chambres de combustion pour la propulsion ou la production d'énergie.

Roland Borghi est professeur à l'École Supérieure de Mécanique de Marseille, de l'Université de la Méditerranée. Il a été ingénieur et maître de recherche à l'ONERA, puis professeur à l'Université de Rouen et au CORIA, unité de recherche associée au CNRS. Il a été chargé de cours à l'École de Mécanique et d'Hydraulique de Grenoble. Il a été consultant à la Société Européenne de Propulsion, membre du conseil scientifique du CNRS et expert auprès du conseil scientifique de l'Institut Français du Pétrole. Il est actuellement membre du conseil scientifique de la recherche de Renault.

Michel Champion, directeur de recherche au CNRS, dirige le Laboratoire de Combustion et de Détonique, unité propre de recherche du CNRS, à Poitiers. Il a été chargé de cours à l'École de Mécanique et d'Hydraulique de Grenoble et enseigne actuellement en troisième cycle à l'École Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique et à l'Université de Poitiers. Il est aussi directeur scientifique adjoint du département des sciences pour l'ingénieur du CNRS et, de façon régulière, *visiting scientist* à l'Université de Californie à San Diego.



ISBN 2-7108-0758-0

graphisme **Kolette**