

**TECHNOSUP**

Les FILIÈRES TECHNOLOGIQUES des ENSEIGNEMENTS SUPÉRIEURS

GÉNIE ÉNERGÉTIQUE

# La combustion

**Inflammation, combustion, pollution.**

**Applications**

Philippe ARQUÈS

ellipses

11-11534-1

# Sommaire

Avant-propos	III
Volumes	IV
Nomenclature	VII
<b>I Equations générales</b>	<b>1</b>
1 Thermique et thermodynamique . . . . .	1
2 Aérodynamique . . . . .	11
3 Chimie de la combustion . . . . .	13
<b>II Auto inflammation</b>	<b>19</b>
1 Théorie chimique . . . . .	20
2 Analyse théorique de l'auto inflammation thermique . . . . .	21
3 Auto inflammation des mélanges . . . . .	32
4 Inflammation spontanée . . . . .	45
<b>III Inflammation commandée</b>	<b>48</b>
1 Inflammation par un fil chaud . . . . .	48
2 Inflammation commandée . . . . .	49
3 Inflammation par surface chaude . . . . .	55
4 Inflammation d'un solide dans un écoulement . . . . .	59
5 Inflammation d'un mur combustible . . . . .	60
<b>IV Combustion et réactions chimiques</b>	<b>67</b>
1 Combustible et comburant . . . . .	67
2 Réactions chimiques . . . . .	74
3 Combustion d'un hydrocarbure . . . . .	78
4 Equations chimiques à l'équilibre . . . . .	83
<b>V Physique de la combustion</b>	<b>84</b>
1 Mélanges homogènes en mouvement stationnaire . . . . .	84
2 Combustion laminaire . . . . .	92
3 Mise en équation de la flamme . . . . .	96
4 Combustion turbulente . . . . .	116
5 Modèle statistique . . . . .	120
6 Résultats expérimentaux . . . . .	123
7 Dynamique de la combustion turbulente . . . . .	125
8 Combustion de diffusion . . . . .	128

9	Mesure de la vitesse de la flamme en bombe . . . . .	137
<b>VI</b>	<b>Emissions de polluants</b>	<b>143</b>
1	Caractéristiques des gaz de combustion polluants . . . . .	143
2	Emissions à froid des moteurs à allumage commandé . . . . .	155
3	Autres sources de pollution . . . . .	155
<b>VII</b>	<b>Réduction des émissions de polluants</b>	<b>158</b>
1	Cycle de mesures des polluants . . . . .	158
2	Réduction des émissions de gaz polluant . . . . .	162
3	Dispositifs d'épuration catalytique des gaz . . . . .	171
<b>VIII</b>	<b>Combustion discontinue</b>	<b>181</b>
1	Modélisation par la méthode des éléments finis . . . . .	181
2	Modélisation mathématique de la phase de combustion . . . . .	185
3	Moteur Diesel . . . . .	197
4	Mélange frais et gaz brûlés . . . . .	197
5	Chaleur et processus de combustion . . . . .	201
6	Températures dans la chambre sans dissociation . . . . .	205
7	Dissociation au cours de la combustion . . . . .	208
<b>IX</b>	<b>Combustion dans les moteurs alternatifs</b>	<b>210</b>
1	Moteurs à charge stratifiée . . . . .	210
2	Détérioration du processus de combustion . . . . .	228
3	Mécanisme d'apparition du cognement . . . . .	230
4	Combustion dans les moteurs Diesel . . . . .	242
<b>X</b>	<b>Incendies et explosions erratiques</b>	<b>253</b>
1	Incendie libre ou confiné . . . . .	255
2	Modélisation de l'incendie . . . . .	256
3	Prévention de l'incendie . . . . .	258
4	Propagation des incendies de forêt . . . . .	260
5	Incendie dans les bâtiments . . . . .	263
6	Extinction . . . . .	265
7	Conclusions . . . . .	267
8	Explosions erratiques . . . . .	268
9	Conclusions . . . . .	298
	<b>Index</b>	<b>299</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>304</b>



## NOMENCLATURE

- $a$  : effusivité  
 $AA$  : avance à l'allumage  
 $A$  : pourcentage d'alcool éthylique dans l'essence  
 $Bi$  : nombre de BIOT  
 $c$  : concentration des radicaux libres  
 $C$  : capacité calorifique  
 $C_p$  : capacité calorifique à pression constante  
 $C_c$  : concentration de l'espèce  $c$   
 $C_o$  : concentration initiale  
 $C(T)$  : célérité du son  
CCAI: "Calculated carbone aromatic index"  
 $d$  : diamètre  
 $D_{ij}$  : taux de diffusion de l'espèce  $i$  au travers de l'espèce  $j$   
 $d$  : diamètre des gouttes  
 $d_{ii}$  : distance de l'injecteur au point d'inflammation  
 $d_s$  : diamètre de SAUTER  
 $D_p$  : diamètre du piston  
 $\mathcal{D}_T$  : coefficient turbulent de diffusion  
 $\mathcal{D}_m$  : coefficient moléculaire de diffusion  
 $e$  : énergie  
 $e_p$  : épaisseur de la couche de gaz le long d'une paroi  
 $\text{erf}()$  : fonction erreur  
 $\text{erfc}$  : fonction erreur complémentaire  
 $E$  : énergie d'activation  
 $E_c$  : énergie cinétique de la turbulence  
 $E_e$  : puissance électrique  
 $E_{ch}$  : énergie chimique  
 $E_{cv}$  : énergie stockée dans le système  
 $E_h$  : pourcentage d'humidité  
 $f$  : fréquence  
 $f$  : fraction résiduelle  
 $F_v$  : forces de viscosité  
 $g$  : accélération de la pesanteur  
 $G_i$  : taux de génération de l'espèce  $i$   
 $Gr$  : nombre de GRASHOF  
 $H$  : enthalpie massique  
 $h$  : coefficient d'échange gaz-paroi  
 $h_m$  : hauteur du volume mort cylindrique dont le diamètre est égal au diamètre du piston  
 $\Delta H$  : énergie de réaction  
 $i$  : intensité du courant  
IC : indice de cétane

- IO : indice d'octane  
*j* : exposant de la loi de VIBE  
 $J_s(k)$  : fonction de BESSEL de 1ère espèce  
**Ka** : nombre de KARMANN  
 $k_n$  : coefficient d'ordre *n* dans la loi d'ARRHENIUS  
 $k_1$  à  $k_5$  : constante d'équilibre de la première réaction  
 $K_p$  : constante d'équilibre  
*ℓ* : dimension  
 $ℓ_j$  : distance parcourue par le jet  
 $ℓ_{xx}$  : échelle de turbulence  
 $ℓ_{xt}$  : longueur de mélange dans la direction *x*  
**Le** : nombre de LEWIS  
 $L_v$  : chaleur latente de vaporisation  
**ℒ** : limite d'inflammabilité, indices 1 : inférieure, *s* : supérieure  
**ℒ** : variable sans dimension chapitre 3  
 $L_L$  : longueur théorique de la flamme laminaire  
 $L_T$  : longueur théorique de la flamme turbulente  
**M** : Nombre de MACH  
 $M_m$  : masse molaire  
 $M_j$  : masse molaire de l'espèce *j*  
*M* : masse  
*N* : vitesse de rotation du moteur  
**Nu** : nombre de NUSSELT  
 $n_j$  : nombre de moles de l'espèce *j*  
*n* : nombre total de moles  
 $N_j$  : nombre de moles par  $cm^3$  de l'espèce *j*  
*N* : nombre total de moles par  $cm^3$   
 $NO_x$  : gaz composé de NO et de  $NO_2$  sans que les proportions soient connues explicitement  
*P* : pression  
 $P_C$  : pression critique d'inflammation  
 $P_c$  : pression dans le collecteur d'admission  
 $P_{cr}$  : pouvoir calorifique réel du bois  
**Pe** : nombre de PECLET  
**Pr** : nombre de PRANDTL  
 $P_{ci}$  : pouvoir calorifique inférieur  
 $P'_{ci}$  : pouvoir calorifique inférieur fictif d'un combustible qui ne brûle pas complètement  
 $P_{cs}$  : pouvoir calorifique supérieur  
 $P_w$  : pouvoir calorifique d'un mélange combustible  
 $P_{co}$  : pouvoir comburivore  
**P** : puissance  
*q* : quantité de chaleur échangée  
 $q_m$  : débit massique  
**Q** : quantité de chaleur fournie  
*r* : constante des gaz parfaits système SI (Chapitre 1)

- $r_{cr}$  : rayon critique  
 $r_i$  : richesse du mélange frais  
 $r_o$  : rayon de la goutte au temps  $t = 0$   
 $R$  : constante universelle des gaz  
 $Ra$  : nombre de RAYLEIGH  
 $Re$  : nombre de REYNOLDS  
 $R_{xx}$  : coefficient de corrélation  
 $Sc$  : nombre de SCHMIDT  
 $S$  : surface  
 $S_F$  : surface de la flamme
- $t$  : temps  
 $t_f$  : durée de la combustion ou temps final de la combustion  
 $t_v$  : durée de vie de la goutte  
 $T$  : température  
 $T_{ad}$  : température de l'air ou du mélange à l'admission  
 $T_c$  : température dans le collecteur d'admission  
 $T_C$  : température critique d'inflammation  
 $T_f$  : température de la flamme  
 $T_{gb}$  : température des gaz brûlés  
 $T_{mf}$  : température du mélange frais  
 $T_o$  : température initiale  
 $T_p$  : température de paroi  
 $T_{pi}$  : température de paroi au moment de l'inflammation  
 $T_z$  : température finale
- $u$  : composante de la vitesse d'un écoulement sur l'axe  $x$   
 $u'$  : intensité de la turbulence  
 $U$  : énergie interne  
 $u_i$  : vitesse de diffusion de l'espèce  $i$   
 $u_r$  : vitesse d'une réaction chimique  
 $U$  : vitesse  
 $u_L$  : vitesse laminaire de la flamme appelée aussi vitesse normale  
 $u_f$  : vitesse de la flamme  
 $u_{Tm}$  : vitesse de la flamme due à la microturbulence  
 $u_{TM}$  : vitesse de la flamme due à la macroturbulence  
 $u_T$  : vitesse de la flamme turbulente  
 $\mathcal{U}_j$  : fraction molaire
- $v$  : composante de la vitesse d'un écoulement sur l'axe  $y$   
 $V$  : vitesse chapitre 1  
 $V$  : volume  
 $V_c$  : vitesse du combustible  
 $V_{inj}$  : vitesse de sortie du carburant du nez de l'injecteur  
 $\%V$  : pourcentage en volume
- $w$  : composante de la vitesse d'un écoulement sur l'axe  $z$   
 $w_{ch}$  : vitesse de la réaction chimique  
 $w_m$  : vitesse moyenne constante de la réaction chimique  
 $w_j$  : vitesse d'avancement du jet

X

W : travail

 $x$  : fraction brûlée (Chapitre 8,10) $x$  : coordonnée (Chapitre 1) $y$  : coordonnée $Y_j$  : fraction massique de l'espèce  $j$  $z$  : coordonnée**Lettres grecs** $\alpha$  : excès d'air d'un mélange combustible : inverse de la richesse $\alpha_m$  : échelle de turbulence relative à l'épaisseur du front de flamme $\beta$  : coefficient de dilatation cubique à pression constante dans le nombre de Grashoff $\beta$  : variable caractérisant le système considéré dans l'équation de FRANK KAMENETSKI $\beta$  : expansion moléculaire $\delta_f$  : épaisseur de la flamme $\delta_T$  : couche limite thermique $\delta_d$  : couche limite dynamique $\delta_a$  : coefficient d'amortissement $\delta_o$  : épaisseur de la flamme au temps  $t = 0$  $\delta_T$  : épaisseur de la flamme turbulente $\gamma$  : rapport entre les capacités calorifiques à pression et volume constants $\lambda$  : conductivité thermique $\lambda_T$  : micro-échelle de turbulence $\rho$  : masse volumique $\mu$  : viscosité dynamique $\nu$  : viscosité cinématique $\nu_A$  : nombre proportionnel au nombre de moles de l'espèce A $\sigma$  : tension superficielle du carburant $\tau$  : contrainte $\tau$  : rapport entre les pressions dans le cylindre et la conduite d'admission à la fermeture de la soupape. (Chapitre 7). $\tau_c$  : temps nécessaire à la combustion d'un volume $\tau_i$  : délai d'inflammation $\tau_p$  : délai physique d'inflammation $\tau_j$  : délai nécessaire pour que le carburant injecté avance dans la chambre $\tau_e$  : délai nécessaire pour que le carburant se vaporise et se mélange à l'air $\tau_{ch}$  : délai chimique d'inflammation $\tau_r$  : taux de remplissage d'un moteur $\tau_{gbr}$  : taux des gaz brûlés recyclés $\sigma$  : écart type $\varepsilon$  : rapport volumétrique de compression $\xi$  : variable $\xi$  : rapport de compression du gaz au moment de l'inflammation $\theta_m$  : variable sans dimension $\Theta$  : variable $\theta$  : angle de vilebrequin $\phi$  : flux $\phi(A)$  : fonction de la variable A

$\chi_m$  : coefficient moléculaire de diffusion de la chaleur  
 $\chi_T$  : coefficient turbulent de diffusion de la chaleur  
 $\chi_{Tm}$  : coefficient micro turbulent de diffusion de la chaleur  
 $\chi = \lambda/(\rho.C_p)$

**Signes mathématiques :** *I, II, III* : phases de la combustion

**Indices**

*i* : inflammation  
*b* ou *gb* : gaz brûlé  
*f* ou *mf* : mélange frais  
*0* : condition initiale  
*F, fl* : flamme  
*f* : fin ou durée de la combustion  
*L* : laminaire  
*T* : turbulent  
*x, y, z* et *u* : nombre de moles de carbone, hydrogène, oxygène et azote dans la formule chimique du combustible.  
*gbr* : gaz brûlés recyclés  
*rgb* : recirculation des gaz brûlés