

Application d'un modèle thermodiffusif pour l'étude de la propagation d'une flamme de prémélange dans des canaux

M. Alliche^{1*}, S. Chikh² et P. Haldenwang³

¹ Laboratoire LMP2M, Centre Universitaire de Médéa,
Quartier Ain Dheb, Médéa, Algérie

² Faculté de Génie Mécanique et de Génie des Procédés,
Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Bab Ezzouar, Alger, Algérie

³ MSNM-GP, IMT La Jetée, Technopôle de Château-Gombert, Marseille, France

Résumé - Dans le présent travail, on a étudié la propagation d'une flamme de prémélange, ainsi que les conditions de son extinction en appliquant un modèle thermodiffusif. Les effets des instabilités hydrodynamiques sont négligés. L'intégration temporelle est autoadaptative sur le pas de temps. Par ailleurs, on a adopté une résolution se basant sur la méthode multi grille où le maillage est raffiné autour de la zone de réaction de la flamme. L'étude de l'interaction flamme - paroi a fait apparaître l'effet de quelques paramètres influents. En fonction des pertes thermiques sur les parois et du rayon du canal, trois régimes de propagation sont identifiés. Il apparaît de l'étude qu'il existe une valeur intermédiaire du rayon pour laquelle la flamme peut se courber et se propager à condition que sa courbure ne dépasse pas une certaine valeur limite. En effet, des petites valeurs du rayon étouffent la flamme et l'éteignent. L'extinction aura lieu si la courbure devient suffisamment petite. Par ailleurs, on a pu encadrer les valeurs limites du coefficient de perte à l'extinction, ainsi que le seuil critique des valeurs du rayon au-delà de laquelle la flamme de prémélange peut se propager sans extinction. Ce qui donne un intérêt pratique à cette expérimentation numérique. L'effet du nombre de Lewis et du nombre de Zeldovich est aussi mis en évidence.

Abstract - In this work, the propagation of a premixed flame is studied by applying a thermo diffusive model. The effects of hydrodynamic instabilities are neglected. The Temporal integration is autoadaptative on the time step. We adopted a resolution based on the multigrad method where the grid is refined around the reaction zone of the flame. The study of the interaction between flame and wall revealed the effect of some influential parameters. According to the thermal losses on the walls and of the channel radius, three modes of propagation are identified. It appears in this study that there is an intermediate value of the radius for which the flame can be curved and be propagated provided that its curvature does not exceed a certain limiting value. Indeed, the small radius values choke and extinguish the flame. The extinction will take place if the curvature becomes sufficiently small. In other hand, we frame the limiting values of the loss ratio to the extinction as well as the critical point of the radius values beyond which the premixed flame can be propagated without extinction. That result gives a practical interest to this numerical experiment. The effect of the Lewis number and Zeldovich number is also highlighted.

Mots clés: Interaction flamme paroi - Flamme de pré mélange - Multi grille - Volumes finis - Maillage auto adaptatif.

* alliche_m@yahoo.fr

1. INTRODUCTION

Le problème de propagation des flammes dans des canaux trouve beaucoup d'intérêt dans différentes applications comme l'industrie pétrochimique, la production d'énergie ou les moteurs à combustion interne dans lesquels il y a présence de mélanges d'air et de combustibles dans des enceintes ou des conduites pouvant induire à un allumage et propagation de flammes.

La compréhension et le contrôle de tel phénomène acquièrent cependant une importance capitale du point de vue sécurité des structures. Ce phénomène a attiré l'attention des chercheurs depuis très longtemps. Les travaux de Zeldovich *et al.* [1] représentent des études fondamentales dans ce domaine. Karman *et al.* [2] présentèrent aussi une analyse mathématique du problème bidimensionnel donnant quelques conclusions relatives aux structures de flammes et aux conditions de leur propagation.

Plusieurs études plus détaillées sont ensuite faites bénéficiant du développement des techniques expérimentales et numériques. La propagation d'une flamme dans un canal fut étudiée numériquement pour deux cas: parois adiabatiques et non adiabatiques [3], tandis que l'extinction de la flamme est examinée pour le même problème, [4]. Un cas monodimensionnel est traité dans [5] tout en tenant compte de l'échange de chaleur aux parois. Une discussion sur la stabilité de flamme est donnée. Par ailleurs, la dynamique et la forme d'une flamme de méthane se propageant dans un canal font objet d'une étude expérimentale par [6] dans un tube cylindrique, et par [7] dans des tubes rectangulaires fermés. Ce dernier montre l'effet des instabilités hydrodynamiques mentionnées dans de anciennes études de Darrieus et de Landau. Ce phénomène a aussi fait l'objet de plusieurs recherches numériques et expérimentales [8-10].

Des études théoriques et numériques récentes ont traité le problème de propagation des flammes de prémélange dans des canaux ouverts en présence d'un écoulement de Poiseuille [11, 12]. Deux cas sont discutés: l'écoulement à paroi adiabatique et le cas non adiabatique. Les équations de la chaleur et celle de la masse sont résolues avec l'hypothèse que la densité est constante. D'autres auteurs ont traité un problème similaire, mais en mode pulsatoire [13-14].

Récemment, les microstructures acquièrent une grande importance dans les nouvelles technologies; ce qui justifie l'attention particulière donnée par les chercheurs au cas des tubes étroits [15, 16]. La caractérisation de l'extinction de la flamme, le problème de retour des flammes et l'effet du nombre de Lewis sont des points souvent discutés dans ces travaux.

On étudie, dans le présent travail, la propagation d'une flamme de prémélange dans un canal étroit ouvert des deux bouts et supposé de longueur infinie par rapport à l'épaisseur de flamme (Fig. 1).

Pour cela, on a appliqué un modèle thermodiffusif où les équations de l'énergie et de la masse sont résolues. L'intégration temporelle est auto adaptative sur le pas de temps. D'autre part, on a adopté une résolution qui se base sur la méthode multigrille avec un maillage raffiné, autour de la zone de réaction de la flamme. On présentera ensuite une discussion relative à l'effet de quelques paramètres, en occurrence: le nombre de Lewis, la largeur du canal et l'intensité des échanges thermiques à travers les parois.

2. FORMULATION DU PROBLEME

La structure de la flamme plane est gouvernée par les équations couplées de réaction-diffusion (1) et (2) exprimant la conservation d'énergie et de l'espèce [17, 18]:

$$\rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \rho \cdot v \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda \cdot \Delta T + Q \cdot W \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial Y}{\partial t} + \rho \cdot v \cdot \frac{\partial Y}{\partial x} = \rho \cdot D_{th} \cdot \Delta Y - W \quad (2)$$

$$\text{Où: } D_{th} = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p} \quad \text{et} \quad W = \rho \cdot B \cdot Y \cdot e^{-E/RT} \quad (3)$$

Pour adimensionner les équations (1) et (2), on définit la température et la concentration réduites comme suit:

$$\theta = \frac{T - T_u}{T_b - T_u} \quad \text{et} \quad \varphi = \frac{Y}{Y_u}$$

On choisit l'épaisseur de flamme e_f comme unité de longueur et le temps mis par la flamme pour se déplacer d'une épaisseur e_f comme unité de temps.

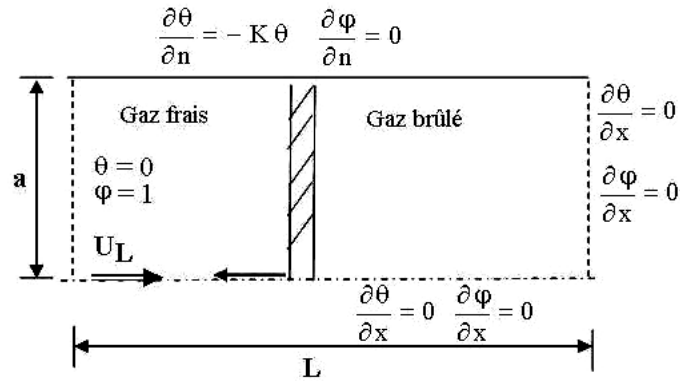


Fig. 1: Conditions aux limites de l'écoulement étudié

On obtient ainsi le système différentiel adimensionnel suivant:

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi}{\partial t} + U_L \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{1}{Le} \cdot \Delta \varphi - \Omega \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} + U_L \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} = \Delta \varphi - \Omega \end{cases} \quad (4)$$

où $\Omega = \frac{\beta^2}{2Le} \cdot \varphi \cdot \exp\left(\frac{\beta(\theta - 1)}{1 + \gamma(\theta - 1)}\right)$

Dans le cas stationnaire, on peut résoudre (1) et (2) en se plaçant successivement dans les deux zones constituant le front de flamme. Dans la zone de préchauffage, une équation de convection diffusion est résolue (le terme de produit étant négligé). Dans la zone de réaction, le terme convectif peut être négligé devant le terme diffusif.

Les travaux de Suard *et al.* [14] et Haldenwang *et al.* [18] donnent une estimation de la vitesse de flamme U_L :

$$U_L = \frac{\rho_b}{\rho_u} \sqrt{2Le \cdot \frac{D_{th}(T_b)}{\beta^2 \cdot \tau_r}} \quad (5)$$

avec τ_r est le taux de réaction défini par:

$$\frac{1}{\tau_r} = B \cdot Y_u \cdot e^{-E/RT_b} \quad (6)$$

Par ailleurs, la flamme plane décrite par (1) et (2) existe rarement en réalité. En effet, elle est soumise à des instabilités qui provoquent des fronts courbés. Ces instabilités sont essentiellement dues à deux phénomènes:

- le premier d'origine hydrodynamique (instabilités de Darrieus - Landau) est provoqué par une différence de densité entre les gaz frais et gaz brûlés de part et d'autre du front de flamme [10];

- Le second, d'origine thermodiffusive est produit de l'espèce limitante qui l'emporte sur la diffusion de la chaleur [9, 18].

Bush *et al.* [19] et Sivashinsky [20] ont étudié théoriquement le problème (4) à l'aide d'une analyse asymptotique en se reposant sur une hypothèse fondamentale que doivent vérifier les paramètres caractéristiques de la flamme:

$$Le - 1 = 0(1/\beta) \quad (7)$$

Sous cette hypothèse, la limite d'instabilité thermodiffusive est donnée par l'expression [9, 18, 20]:

$$1 = \beta(Le - 1) < 2 \quad (8)$$

3. MAILLAGE ET DISCRETISATION

Le problème thermodiffusif traité ici présente plusieurs échelles de longueur caractéristiques très différentes. La première correspond à la zone de réaction, très petite devant l'épaisseur de flamme, qui est elle-même très petite comparativement avec le domaine de calcul global.

Pour résoudre un tel problème, on a utilisé une méthode multigrille en 2D avec un maillage auto adaptatif capable de se déformer au cours du temps afin de suivre le front de flamme. Le maillage est raffiné autour de la zone de réaction permettant d'obtenir une grande précision dans cette région. Loin du front de flamme, il reste grossier [18].

Finalement, le nombre total de mailles est divisé par 2^{n-1} comparativement à un maillage uniforme; ce qui représente un gain appréciable en mémoire et en temps de calcul.

En choisissant un critère physique, la zone de production sera la zone de raffinement du maillage afin d'estimer correctement le taux de production. On repère, pour chaque valeur discrète de y , la position selon x du maximum du taux de production; on obtient ainsi une ligne courbe formée par les pics du taux de production autour de laquelle on va centrer la bandelette du niveau le plus fin [18, 21].

D'autre part, les termes temporel et spatial dans (4) sont discrétisés en utilisant des schémas centrés de différences finies trois points.

4. CONDITIONS AUX LIMITES

Le problème thermodiffusif à résoudre est présenté par le système d'équations (4). La figure 1 illustre le domaine de calcul, ainsi que les conditions aux limites de Neuman.

Puisque le problème traité est symétrique par rapport à l'axe du canal, on prend uniquement la partie supérieure du canal comme domaine de calcul avec les conditions aux limites suivantes:

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 & \text{et} & \frac{\partial \theta}{\partial n} = 0 & \text{pour} & y = 0 \\ \frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 & \text{et} & \frac{\partial \theta}{\partial n} = -K \cdot \theta & \text{pour} & y = a \end{cases} \quad (9)$$

où K est le coefficient d'échange de chaleur à travers la paroi défini par:

$$K = \frac{h}{\lambda \cdot e_f} \quad (10)$$

Des études antérieures [5] ont montré que le terme de perte de chaleur peut conduire à l'extinction de la flamme si:

$$K > K_{QL} = \frac{e^{-1}}{2\beta} \quad (11)$$

5. RESULTATS ET DISCUSSIONS

On présente ici quelques résultats d'une étude paramétrique du problème (4) associé aux conditions aux limites (9).

Les résultats présentés sont obtenus pour un maillage de 769×225 points. Un test de sensibilité au maillage est illustré par la figure 2.

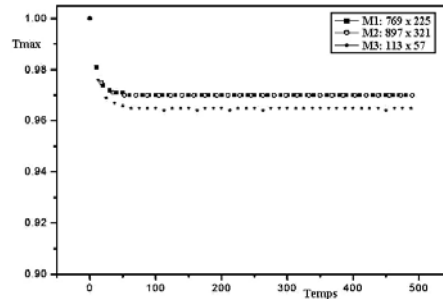


Fig. 2: Test de sensibilité au maillage

On étudie, tout d'abord, le comportement de la flamme jusqu'à extinction totale pour différentes valeurs de la largeur du canal et un nombre de Lewis unité.

La figure 3 présente la structure d'une flamme en présence de pertes thermiques à la paroi pour un canal de demi-largeur égale à 5.00.

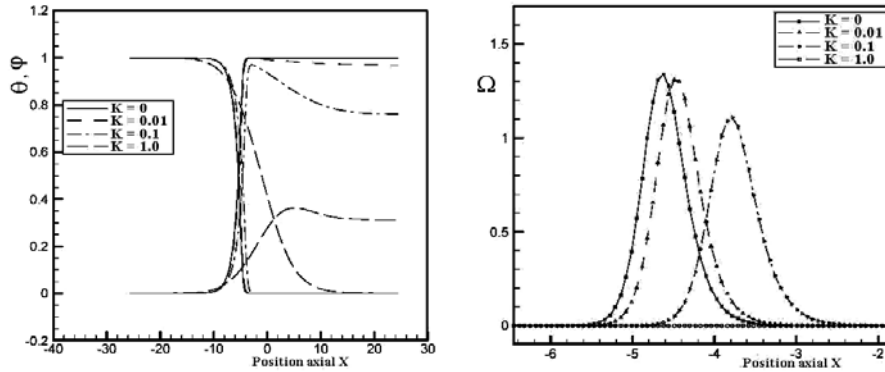
En effet, l'augmentation du coefficient de perte K affaiblit la flamme plane comparativement à une flamme adiabatique ($K = 0$). La flamme se plisse et se courbe au fur et à mesure que l'on augmente la valeur de K jusqu'à extinction totale comme cela est montré sur la figure 4. On remarque bien que la flamme se courbe davantage vers l'axe central du canal avant de s'éteindre.

Ceci revient à chercher la valeur d'une limite d'extinction de la flamme K_{QL} ; ce qui est très difficile à évaluer avec précision puisque l'évolution de la solution vers une flamme stationnaire est un processus très lent (Fig. 5).

Ainsi l'encadrement de cette valeur nécessite plusieurs calculs très lents pour différentes valeurs de K . On a pu encadrer les valeurs de K à l'extinction pour chaque

valeur de la largeur du canal (Fig. 6). On remarque un bon accord avec les résultats de [12] pour les canaux étroits pour $Le = 1.00$.

En outre, on constate un comportement de la flamme très influencé par la valeur du rayon du canal. Pour des canaux étroits ($a < 7.30$), la flamme s'éteint à des valeurs de K très petites ($\ll 1$) tandis qu'elle résiste et continue à se propager pour des valeurs de K d'échange thermique très importantes (jusqu'à $K = 100$).



(a) (b)
 Fig. 3: Effet des pertes thermiques sur la structure de flamme (a) et sur le taux de production (b) ($Le = 1.0$, $R = 5.00$, $\beta = 8.00$, $\gamma = 0.80$, $t = 20$)

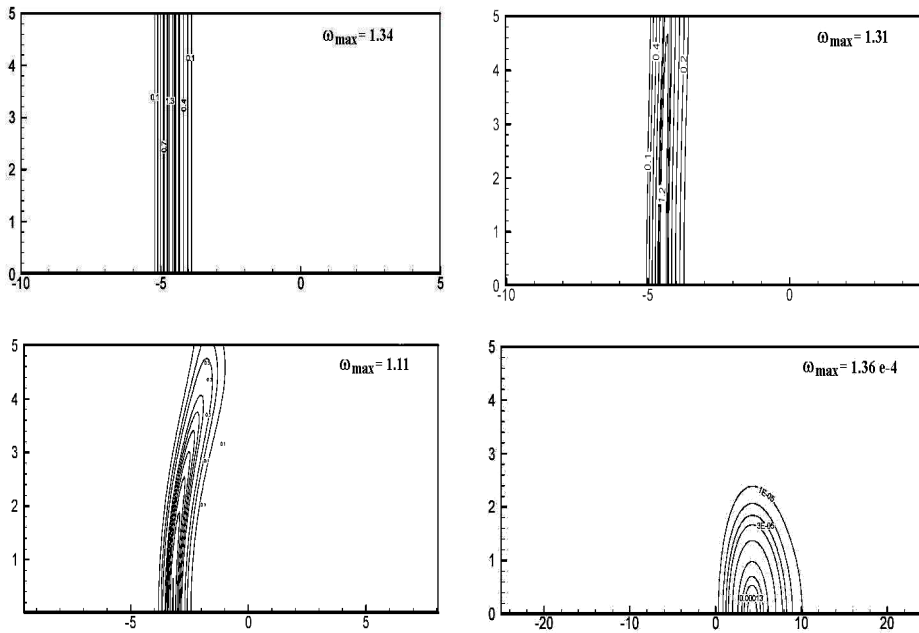


Fig. 4: Isothermes de production pour différentes valeurs de pertes thermiques K de haut en bas 0, 0.01, 0.10, 1.00 ($Le = 1.0$, $R = 5.00$, $\beta = 8.00$, $\gamma = 0.80$, $t = 20$)

Cependant l'extinction de la flamme ne se produit plus à partir d'une valeur critique du rayon. D'ailleurs, on a testé le cas d'une flamme en pleine vie à $K = 10^{10}$ pour $a = 8.00$.

Pour le cas $Le = 1.00$ et $Zeldovich = 8.00$, on a trouvé un rayon critique d'environ 7.30 (Fig. 6). Ce résultat est en accord avec le résultat expérimental qui encadre les valeurs limites d'extinction entre 10 à 30 (largeur du canal) [23].

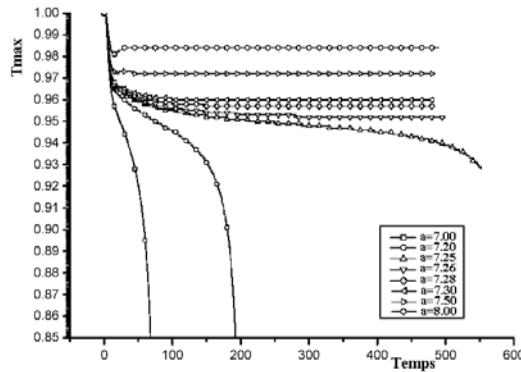


Fig. 5: Variation de T_{max} en fonction du temps pour différentes valeurs du rayon de canal ($K = 10$ et $Zeldovich = 8.00$)

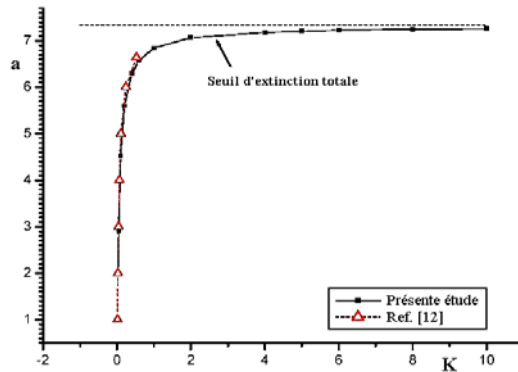


Fig. 6: Evolution du rayon du canal à l'extinction en fonction de l'intensité d'échange de chaleur à travers les parois ($Le=1.0$ et $Zeldovich=8.00$)

Par ailleurs, l'expérimentation numérique menée indique qu'une flamme plane a un comportement adiabatique pour des valeurs de rayons trop élevées, tandis qu'elle s'étouffe progressivement jusqu'à extinction dans le cas de petites valeurs du rayon du canal.

En effet, une diminution de l'ordre de 60 % en rayon correspond à une chute d'environ 50 % dans la valeur du taux de production, tandis que l'augmentation du rayon accélère le déplacement de la flamme (Fig. 7).

D'autre part, une extinction partielle apparaît près des parois et prend une valeur constante comme le montre la figure 8. La figure illustre cette observation.

Pour $Le = 1$, on a trouvé un espace mort $d_q = 3$ fois la largeur de flamme laminaire; ce qui est en bon accord avec le résultat des travaux de [27].

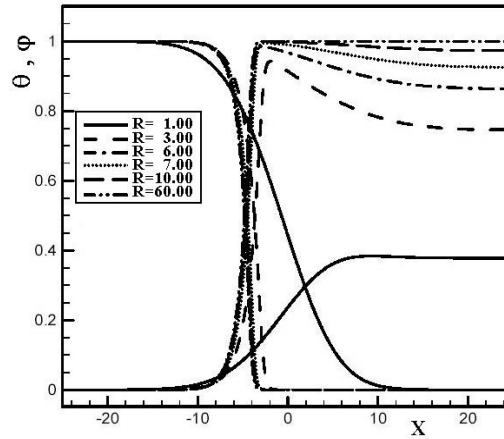


Fig. 7: Effet du rayon du canal sur la température ($Le = 1$, $\beta = 10$, $\gamma = 0.80$, $U_L = 0.90$, $K = 0.20$)

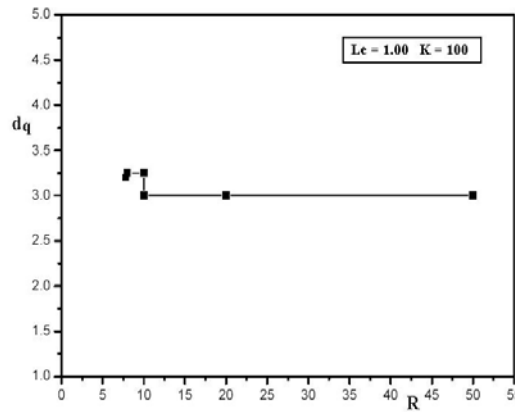


Fig. 8: Evolution de l'espace mort en fonction de la largeur du canal ($Le = 1$, $k = 1000$, $\beta = 8.00$, $\gamma = 0.80$, $t = 200$)

En outre, des travaux antérieurs ont montré que la stabilité des flammes planes dépend étroitement de l'effet couplé du nombre de Lewis et celui de Zeldovich [8-10, 18, 20]. La condition de stabilité est donnée par la relation:

$$\beta(Le - 1) < -2 \quad (12)$$

On s'intéresse dans la présente étude, de l'effet du nombre de Lewis uniquement et on prend un nombre de Zeldovich égale à 8.00. La limite de stabilité sera donc $Le = 0.75$.

En effet, pour de petites valeurs du nombre de Lewis (Exemple- $Le = 0.30$), on a observé une flamme déchirée à deux extinctions locales; l'une près des parois et l'autre à l'axe central. Tandis que pour des nombres de Lewis proche de l'unité, une flamme de forme champignon est observée comme montre la figure 10.

Par ailleurs, on remarque bien que la diminution du nombre de Lewis favorise un gain important dans le taux de réaction d'une part, et améliore la vitesse locale de la flamme (Fig. 11).

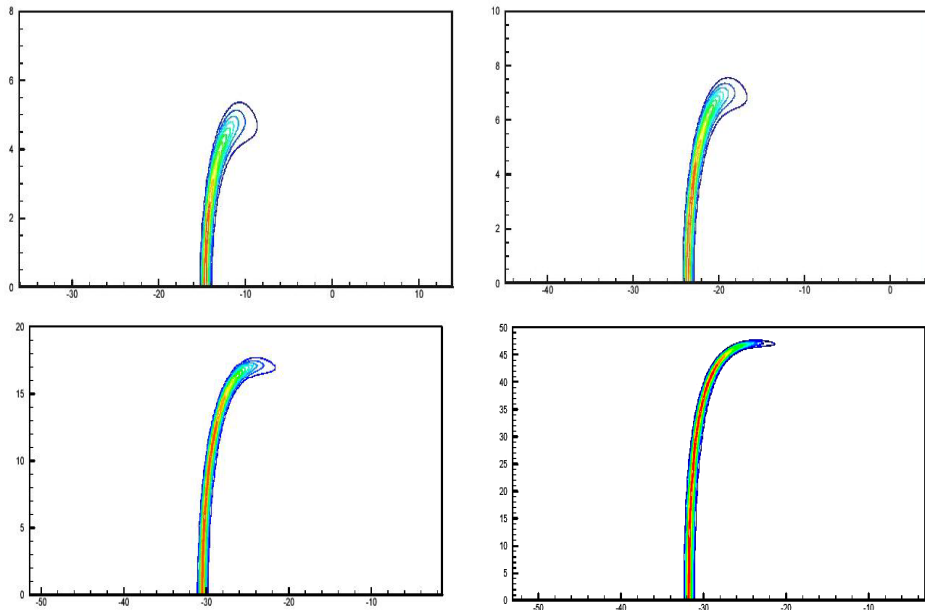


Fig. 9: Isoproductions pour différentes valeurs de demi largeur du canal de haut en bas 8.0, 10.0, 20.0, 50.0 ($Le = 1.0$, $K = 1000$, $\beta = 8.00$, $\gamma = 0.80$, $t = 20$)

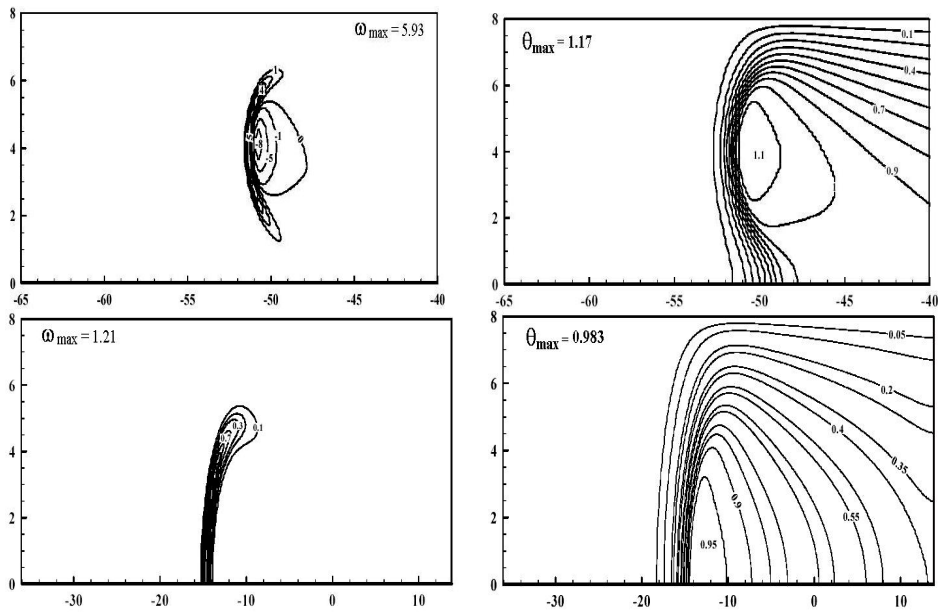


Fig. 10: Isoproductions et isothermes pour différentes valeurs de Lewis 0.30 (haut) et 1.00 (bas) - ($Le = 1.0$, $K = 100$, $\beta = 8.00$, $\gamma = 0.80$, $t = 100$)

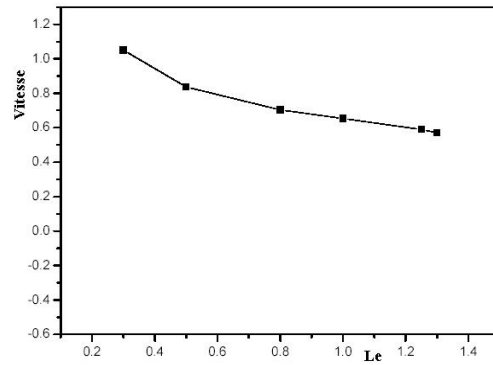


Fig. 11: Variation de la vitesse relative de la flamme en fonction du nombre de Lewis à la limite d'extinction ($R = 5.00$, $\beta = 8.00$, $\gamma = 0.80$, $t = 20$)

L'évolution du rayon de courbure de la flamme en fonction de la largeur du canal et du coefficient d'échange de chaleur à travers la paroi est illustrée par la figure 12. Enfin, deux remarques importantes peuvent être faites:

- L'augmentation de l'intensité d'échange thermique à travers la paroi diminue la courbure de la flamme de prémélange jusqu'à extinction totale pour une largeur de canal donnée.

- Cette courbure atteint une valeur critique au dessous de laquelle la flamme ne peut plus se courber; ce qui correspond bien à la théorie de la structure sphérique d'une flamme [1].

Cette valeur critique dépend du nombre de Lewis. Le rayon du canal correspondant représentera un point du seuil d'extinction totale de la flamme plane de prémélange étudiée.

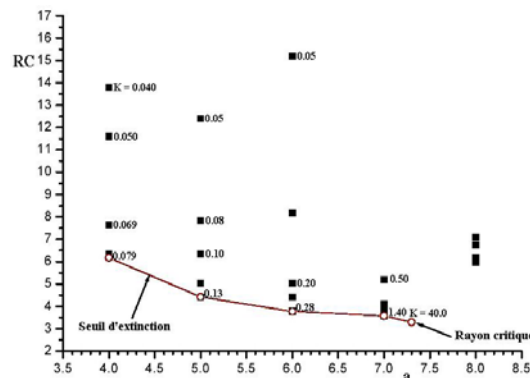


Fig. 12: Variation du rayon de courbure de la flamme pour différentes valeurs du rayon de canal ($Le = 1.0$ et $Zeldovich = 8.00$)

5. CONCLUSION

Une étude numérique d'un problème de propagation d'une flamme plane a été présentée dans ce travail où un modèle thermodiffusif est appliqué. On a adopté une résolution se basant sur une méthode adaptative multigrille.

Cependant, l'étude a pu déterminer des régimes de propagation de la flamme conduisant à son extinction, ainsi que l'effet de quelques paramètres influents, en

occurrence: le nombre de Lewis, le nombre de Zeldovich, le rayon du canal et le coefficient d'échange de chaleur avec la paroi.

D'autre part, il apparaît de l'étude qu'il existe une valeur intermédiaire du rayon pour laquelle la flamme peut se courber et se propager à condition que sa courbure ne dépasse pas une certaine valeur limite. Cependant, des petites valeurs du rayon étouffent la flamme et l'éteignent.

Par ailleurs, on a pu encadrer les valeurs limites du coefficient de perte à l'extinction, ainsi que le seuil critique des valeurs du rayon au-delà de laquelle la flamme de prémélange peut se propager sans extinction. Ce qui donne un intérêt pratique à cette expérimentation numérique.

En effet, l'augmentation de l'intensité d'échange thermique à travers la paroi diminue la courbure de la flamme de prémélange jusqu'à extinction totale pour une largeur de canal donnée. Cette courbure atteint alors une valeur critique au dessous de laquelle la flamme ne peut plus se courber, ce qui correspond bien à la théorie de la structure sphérique d'une flamme. Cependant on a pu remarquer que cette valeur critique dépend du nombre de Lewis et celui de Zeldovich.

NOMENCLATURE

a : Demi largeur du canal	D_{mol} : Diffusivité moléculaire, m^2/s
B : Facteur d'Arrhénius, $\text{J}/\text{kg}/\text{K}$	D_{th} : Diffusivité thermique, m^2/s
C_p : Capacité calorifique, $\text{J}/\text{kg}/\text{K}$	R : Constante des gaz parfaits, $\text{J}/\text{mol}/\text{K}$
E : Energie d'activation, J/mol	Q : Chaleur de réaction, J
t : Temps, s	T : Température, K
Y : Concentration de l'espèce A, kg	V : Vitesse de flamme, m/s
W : Terme production énergie, $\text{kg}/\text{m}^3/\text{s}$	
Symboles grecs	
ρ : Masse volumique, kg/m^3	λ : Conductivité thermique, $\text{J}/(\text{m}\cdot\text{K})$
Ω : Terme production énergie	φ : concentration réduite
θ : température réduite	τ_j : Taux de réaction
τ : Temps réduit	
Nombres adimensionnels	
Le: Nombre de Lewis, $Le = D_{\text{th}} / D_{\text{mol}}$	
β : Nombre de Zeldovich, $\beta = (E(T_b - T_u)) / R T_b^2$	
γ : Facteur d'expansion du gaz, $\gamma = (T_b - T_u) / T_b$	
Indices	
b : gaz brûlés; u : gaz non brûlés; r : réaction	

Remerciements: On remercie l'équipe du laboratoire MSNM-GP de Marseille pour l'accueil et l'aide grâce auxquels ce travail a vu le jour.

REFERENCES

- [1] Y.B. Zeldovich, F.L. Barenblatt, V.B. Librovich and G.M. Makhviladze, 'The Mathematical Theory of Combustion and Explosion', Nauka, Moscow, 1980.

- [2] T. Von Karman and G. Millan, 'Theoretical and Experimental Studies on Laminar Combustion and Detonation', Fourth Symposium International on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburg, pp. 173 – 177, 1953.
- [3] G.F. Carrier, F.E. Fendell and P.S. Feldman, 'A Comparison of One and Two Dimensional Flame Quenching: Heat Transfer Results', Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 20, pp. 67 - 74, 1984.
- [4] S.L. Aly and C.E. Hermance, 'A Two-Dimensional Theory of Laminar Flame Quenching', Combustion and Flame, Vol. 40, pp. 173 – 185,(1981).
- [5] G. Joulin and P. Clavin, Acta Astronaut, Vol. 3, p. 223, 1976.
- [6] J. Jarosinski, R.A. Strehlow and A. Azarbarzin, 'The Mechanisms of Lean Limit Extinguishment of an Upward and Downward Propagating Flame in a Standard Flammability Tube', Nineteenth Symposium International on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburg, p. 1549, 1982.
- [7] D. Dunn-Rankin, P.K. Barr and R.F. Sawyer, 'Numerical and Experimental Study of Tulip Flame Formation in Closed Vessel', 21st Symposium International on Combustion, The Combustion Institute., Pittsburg, pp. 1291 – 1301, 1986.
- [8] Satoshi Kadowaki, 'The Effects of Heat Loss on the Burning Velocity of Cellular Premixed Flames Generated by Hydrodynamic and Diffusive Thermal Instabilities', Combustion and Flame, Vol. 143, pp. 174 – 182, 2005.
- [9] B. Denet and P. Haldenwang, 'Numerical Study of Thermal Diffusive Instability of Premixed Flames', Combustion Science and Technology, Vol. 86, pp. 199 - 221, Gordon and Breach Science Publishers, U.K, 1992.
- [10] B. Denet and P. Haldenwang, 'A Numerical Study of Premixed Flames Darrius-Landau Instability', Combustion Science and Technology, Vol. 104, pp. 143 - 167, 1995.
- [11] J. Daou and M. Matalon, 'Influence of Conductive Heat Losses on the Propagation of Premixed Flames in Channels', Combustion and Flame, Vol. 128, pp. 321 – 339, 2002.
- [12] Daou J. and M. Matalon, 'Flame Propagation in Poiseuille Flow under Adiabatic Conditions', Combustion and Flame, Vol. 124, pp 337 – 349, 2001.
- [13] C. Cui, M. Matalon and T.L. Jackson, 'Pulsating Mode of Flames Propagation Two Dimensional Channels', AIAA Journal, Vol. 43, N°6, pp. 1284 – 1292, 2005.
- [14] S. Suard, P. Haldenwang and C. Nicoli, 'Different Spreading Regimes of Spray Flames', Comptes Rendus en Mécanique, Vol. 332, pp. 387 - 396, 2004.
- [15] V.N. Kurdyumov and E. Fernandez-Tarrazo, 'Lewis Number Effect on the Propagation of Premixed Laminar Flames in Narrow Open Ducts', Combustion and Flame, Vol. 128, pp. 382 – 394, 2002.
- [16] Z.B. Song, X.W. Ding, J.L. Yu and Y.Z. Chen, 'Propagation and Quenching of Premixed Flames in Narrow channels', Combustion, Explosion and Shock Waves, Vol. 42, N°3, pp. 268 – 276, 2006.
- [17] P. Clavin, 'Dynamical Behavior of Premixed Flame Fronts in Laminar and Turbulent Flows', Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 11, pp. 1 - 59, 1985.
- [18] P. Haldenwang and D. Pignol, 'Dynamically Adapted Mesh Refinement for Combustion Front Tracking', Computers and Fluids, Vol. 31, pp. 589 - 606, 2002.
- [19] W.B. Bush and F.E. Fendel, 'Asymptotic Analysis of Laminar Flames for General Lewis Number', Combustion Science and Technology, Vol. 1, p. 421, 1970.
- [20] G.L. Sivashinsky, 'Diffusional Thermal Theory of Cellular Flames', Combustion Science and Technology, Vol. 15, pp. 137 - 145, 1977.
- [21] O. Roussel and K. Schneider, 'Numerical Study of Thermodiffusive Flame Structures Interacting with Adiabatic Walls Using an Adaptative Multiresolution Scheme', Combustion Theory and Modelling, Vol. 10, N°2, pp. 273 – 288, 2006.
- [22] C.R. Ferguson and J.C. Keck, 'On Laminar Flame Quenching and its Application to Spark Ignition Engines', Combustion and Flame, Vol. 28, pp. 197, 1977.