

Conditions critiques de retour de flamme

Athéna WANGHER¹, Joël QUINARD^{1*}, Jean-Marie TRUFFAUT¹,
Laurent DUCHEMIN¹, Geoff SEARBY¹, Christophe LE NILIOT²,
Vadim KOURDIOUMOV³

¹ IRPHE, 49 rue F. Joliot Curie, BP 146, 13384 MARSEILLE CEDEX 13

² IUSTI, POLYTECH MARSEILLE–DME, 5 Rue Enrico Fermi, 13453 MARSEILLE CEDEX 13

³ CIEMAT, Departamento de Combustibles Fósiles, Avda. Complutense 22, 28040, Madrid, España

* auteur correspondant : joel.quinard@irphe.univ-mrs.fr

Résumé – Ce travail confronte des résultats numériques et expérimentaux visant à identifier les paramètres qui contrôlent le retour de flamme dans la configuration élémentaire d'une flamme laminaire remontant la couche limite près d'une paroi. En particulier nous utilisons la thermographie IR pour déterminer les pertes en paroi et interpréter plus finement les valeurs d'un nombre de Damköhler critique.

Nomenclature

A	: gradient de vitesse en paroi	T_w	: température de paroi
B	: préfacteur de la vitesse de réaction	T_{ac}	: température d'activation
C_p	: chaleur spécifique du mélange	U_L	: vitesse asymptotique de la flamme plane
D	: diamètre du brûleur	u_x	: vitesse axiale des gaz
Da	: nombre de Damköhler	u_y	: vitesse radiale des gaz
D_{T0}	: diffusivité thermique dans les gaz frais	x	: abscisse longitudinale
K	: coefficient de perte en paroi externe	y	: abscisse transverse
Y_0, Y	: fraction massique de combustible	$\delta_f = D_{T0}/U_L$: épaisseur de flamme
Le	: nombre de Lewis du combustible	ϕ	: richesse du mélange combustible
Q	: chaleur de combustion	ρ	: densité du mélange
Q_v	: débit volumique	θ	: température réduite des gaz
T_0, T	: température des gaz	θ_w	: température réduite de paroi
t_0	: temps caractéristique de réaction	Ω	: vitesse de réaction
T_a	: température adiabatique de combustion		
U_f	: vitesse de propagation de la flamme dans la couche limite		
κ	: rapport des conductivités thermiques entre le verre et le gaz		

1. Introduction

La réduction des émissions polluantes conduit à utiliser des mélanges pauvres qui exposent les brûleurs aux risques de retour de flamme. Dans ce domaine, l'étude de Lewis et von Elbe [1] fait référence en comparant le gradient de vitesse dans l'écoulement en sortie d'injecteur à un gradient critique construit avec la vitesse et l'épaisseur de flamme. Cette approche est toutefois insuffisante pour prendre en compte les effets de courbure de la flamme qui modifient l'écoulement en amont [2] ou les effets de diffusion préférentielle et d'étirement qui contrôlent la vitesse de propagation de la flamme courbe dans une couche limite et génèrent des variations importantes suivant le combustible utilisé. Par ailleurs, plusieurs études ont été faites pour déterminer plus précisément les diamètres de coincement en prenant en compte des pertes thermiques aux parois [3,4], mais elles ne concernent que des tubes de petit diamètre

où les effets d'expansion peuvent être négligés pour décrire la propagation de la flamme à l'aide d'un modèle thermo-diffusif plus simple.

Une approche encore plus élémentaire a ensuite été proposée [5] en ne considérant que la propagation d'une flamme de prémélange dans la couche limite de vitesse $2D$ avec l'avantage que les effets de diffusion préférentielle pouvaient être pris en compte. Cette étude, essentiellement numérique, a été validée expérimentalement en suivant la propagation d'une flamme à contre-courant dans un écoulement de Poiseuille à l'intérieur d'un tube de diamètre grand devant l'épaisseur de flamme pour comparer les résultats au modèle $2D$ [6]. Les conditions limites de flash-back dépendent faiblement du taux d'expansion, de la vitesse de flamme ou de l'énergie d'activation. Elles varient par contre de façon très importante en fonction du nombre de Lewis du réactant et du taux de pertes thermiques aux parois qui restait donc à déterminer pour conforter les résultats.

2. Méthode expérimentale

Le brûleur est constitué d'un tube de verre borosilicaté de 1,49 m de long avec un diamètre intérieur de 21,4 mm et une épaisseur de parois de 1,3 mm. Le mélange combustible est injecté à la base au travers d'un lit de billes d'acier de 4 mm de diamètre et 4 cm de hauteur, suivi d'un nid d'abeilles en céramique de 1 cm de hauteur avec un pas de 1 mm. Avec les mélanges utilisés, le nombre de Reynolds reste inférieur à 150 de sorte que l'écoulement est toujours laminaire et nous avons vérifié que l'écoulement est complètement développé au niveau de la flamme avec un profil de Poiseuille (Fig. 1). Le débit massique de chaque gaz est régulé par des cols soniques calibrés pour contrôler précisément la richesse du mélange qui alimente un brûleur principal et un brûleur secondaire. Le débit dans le brûleur principal est ajusté par des vannes de précision et mesuré par un rotamètre avec une précision de 2%.

Dans une première phase destinée à évaluer les conditions limites de flashback, la flamme est initialement allumée en sortie de brûleur, puis le débit est réduit progressivement jusqu'à ce que la flamme s'incline et commence à remonter l'écoulement dans la couche limite. Le débit est ensuite progressivement augmenté pour arrêter la progression de la flamme dans la zone de mesure à 20 cm de la sortie de tube. La figure 1 présente une flamme de propane dans l'air avec une richesse $\phi=0.65$ stabilisée dans le tube en position verticale, le mélange combustible étant ensemencé en particules réfractaires (CsO_2) pour visualiser les lignes de courant par plan laser (Fig. 1_a) ou déterminer le champ de vitesse par PIV (Fig. 1_b). La couleur laiteuse des gaz chauds derrière la flamme est due au rayonnement thermique de ces particules. Les profils de vitesse axiale reconstitués à différentes abscisses en amont de la flamme montrent que l'écoulement est effectivement parabolique à une distance d'environ un demi diamètre du tube, puis les profils sont affectés par la déflexion des lignes de courant induite par la flamme courbe (Fig. 1_c). Connaissant le débit volumique Q_v , le gradient critique peut alors être calculé simplement sur la base d'un écoulement de Poiseuille avec $A = 32 Q_v / \pi D^3$.

Afin d'évaluer les conditions thermiques en parois, nous avons enregistré les thermogrammes d'un brûleur dans les mêmes conditions, mais préparé par sablage sur sa partie externe pour limiter les problèmes liés à l'émissivité du verre (Fig. 2_a). Une caméra de type matrice de microbolomètres 320×256 pixels (FLIR[®] A40, non refroidie) opérant dans la bande 8-12 μm a été utilisée pour viser la face externe du tube. La flamme étant stabilisée, un moteur pas à pas entraîne la rotation du tube sur son axe afin de déterminer le champ de température sur tout le pourtour du brûleur. Pour éviter les problèmes d'indicateur d'émission, seule une bande large de 3 pixels et centrée sur la direction d'observation est retenue. Une séquence de 100 images permet de reconstituer le champ de température sur 360° et une hauteur de 120 mm (Fig. 2_b). La température mesurée est alors moyennée sur 32×20 éléments de surface (éléments quadrilatères 4 points) ce qui permet d'imposer une

condition limite sur la face externe. La mesure de la température externe est de l'ordre de 500°C. Un bilan convectif et radiatif est alors fait pour évaluer le champ de densité de flux en surface et reconstituer le champ de température et de flux sur la paroi interne (Fig. 2_c). Le modèle d'inversion est basé sur une résolution de l'équation de la chaleur par la méthode des éléments de frontière. Une approche similaire a été décrite dans [7] pour un problème 2D avec la différence que la solution est régularisée ici par troncature de spectre au lieu de régulariser par pénalisation. Le niveau de troncature est déterminé par la méthode dite « de la courbure en L » [8]. La température de paroi vue par la partie pilote de la flamme est alors de l'ordre de 450°C, ce qui permet d'évaluer le coefficient réduit de transfert aux parois à $K \sim 0.02$ (Cf. §3).

3. Modèle numérique

Les simulations numériques ont été réalisées dans les mêmes conditions que pour les travaux antérieurs [5,6] à l'exception des conditions à la paroi qui prennent en compte la conduction à travers l'épaisseur du verre avec un transfert vers l'extérieur décrit par

$$\frac{\partial \theta_w}{\partial y} = K \theta_w \text{ pour } y = -h, h \text{ étant l'épaisseur de paroi réduite par l'épaisseur de flamme et}$$

$\theta_w = (T_w - T_0)/(T_a - T_0)$ la température réduite de paroi. T_a est la température adiabatique de combustion, $T_a = T_0 + Q Y_0 / C_p$, T_0 la température d'injection des gaz loin en amont et T_w la température dans l'épaisseur de paroi. L'écoulement dans la couche limite loin en amont est décrit par $u_x = Ay$, $u_y = 0$. Pour une valeur donnée du gradient de vitesse A , la vitesse de propagation de la flamme dans l'écoulement U_f est constante. Le problème stationnaire est alors résolu dans le référentiel du front de flamme. La combustion est décrite par une seule réaction irréversible du type $F \rightarrow P + Q$ où F représente le combustible supposé minoritaire. La vitesse de réaction suit une loi d'Arrhenius, $\Omega = \rho^2 B Y \exp(-T_{ac}/T)$, seulement fonction de la fraction massique Y du combustible. ρ est la densité du mélange, B un facteur pré-exponentiel, T_{ac} une température d'activation et T la température locale. Les échelles caractéristiques sont alors données par l'épaisseur de flamme $\delta_T = D_{T0}/U_L$ et le temps de transit dans la flamme $t_0 = \delta_T / U_L$, U_L étant la vitesse de la flamme plane à la limite asymptotique,

Toutes les grandeurs diffusives des gaz sont supposées constantes de même que leur chaleur spécifique C_p et les propriétés de la paroi solide. Les équations de conservation de masse, espèce, énergie et impulsion sont réduites et traitées dans l'hypothèse d'un milieu incompressible et d'un gaz parfait. Les conditions limites sont données loin en amont et en aval :

$$x \rightarrow -\infty : \theta, \theta_w \rightarrow 0; Y \rightarrow 1$$

$$x \rightarrow +\infty : \partial \theta / \partial x, \partial \theta_w / \partial x, \partial Y / \partial x \rightarrow 0$$

$$\text{et sur la surface interne, } y = 0 : \partial Y / \partial x = 0; \theta = \theta_w; \partial \theta / \partial y = \kappa \partial \theta_w / \partial y; u_y = 0.$$

4. Résultats

Cette étude est focalisée sur la prise en compte des pertes en paroi qui fixent les conditions critiques de retour de flamme entre les valeurs limites correspondant à une paroi adiabatique, $K=0$, et à une paroi isotherme à $T_w = T_0$ avec K infini, le nombre de Damköhler critique $Da = AD_{T0}/U_L^2$ pouvant varier d'un facteur 10 entre ces deux limites [6]. La figure 3 montre les résultats numériques pour l'évolution de la vitesse de propagation de la flamme dans la couche limite en fonction du nombre de Damköhler. À U_L fixé, lorsque le gradient de vitesse est faible, la flamme remonte l'écoulement avec une vitesse U_f positive qui se réduit au fur et à mesure que le gradient augmente jusqu'à une valeur critique où la flamme est immobilisée. Au-delà de cette valeur critique, la flamme est repoussée par l'écoulement avec

une vitesse d'autant plus faible que la température de paroi est élevée. Ce calcul a été fait avec $Le = 1$ et une vitesse de flamme $U_L = 17$ cm/s pour simuler une flamme pauvre de méthane. Dans ces conditions on retrouve les températures de parois mesurées par thermographie pour des valeurs de K comprises entre 0.015 et 0.02.

La mesure des vitesses de propagation de flamme en fonction du gradient de vitesse a été faite en plaçant d'abord la flamme en condition limite de flashback près de la sortie du brûleur, puis le débit de gaz est changé rapidement à une valeur prédéterminée et la propagation de la flamme est enregistrée au moyen d'une caméra vidéo rapide à 1000 ips (caméra PHANTOM V5 Monochrome avec objectif Micro NIKKOR F55mm f/2,8). La vitesse de progression de la flamme peut alors être déterminée par analyse d'images. Les résultats sont reportés sur la figure 4-a pour deux mélanges pauvres de méthane-air, $\phi = 0,7$ et $0,75$. On retrouve bien l'allure des courbes obtenues par simulation numérique. D'abord la vitesse de flamme diminue rapidement avec une augmentation du gradient de vitesse. Ce régime correspond à une condition où la propagation de la flamme est trop rapide pour que la température de surface s'ajuste à la température de flamme. Ensuite les effets de paroi se font sentir et le gradient de vitesse doit être notablement augmenté pour atteindre la condition critique. Au-delà de cette valeur critique, la flamme est lentement repoussée par l'écoulement, mais sa vitesse de recul est très faible en raison du temps nécessaire pour refroidir la paroi. Le tracé en coordonnées semi-logarithmique (Fig. 4-b) montre qu'il est possible d'évaluer ainsi un nombre de Damköhler critique de l'ordre de 0,1 en bon accord avec la simulation numérique.

5- Conclusion

L'étude des conditions limites de retour de flamme a été revisitée en considérant le modèle très simplifié d'une flamme de prémélange avec une seule réaction exothermique décrite par une loi d'Arrhenius et se propageant dans une couche limite décrite par le seul gradient de vitesse en paroi. La détermination du nombre de Damköhler critique nécessite de connaître assez précisément les conditions thermiques à la paroi pour évaluer les pertes ressenties par la flamme. La thermographie IR a permis d'évaluer une température de paroi réaliste et déterminer ainsi la valeur du coefficient de pertes K à injecter dans le modèle numérique pour représenter les pertes à travers la paroi. L'accord entre expériences et simulations est alors très satisfaisant et cette approche devrait permettre de mieux comprendre comment la diffusion préférentielle, caractérisée par le nombre de Lewis, affecte ces limites de retour de flamme.

Référence

- [1] B. Lewis and G. von Elbe, Stability and Structure of Burner Flames, *J. Chem. Phys.*, 11 (1943), 75-97.
- [2] S.T. Lee, J.S. Tien, A Numerical Analysis of Flame Flashback in a Premixed Laminar System, *Comb. And Flame*, 48, (1982), 273-285.
- [3] C.R. Ferguson and J.C. Keck, On Laminar Flame Quenching and Its Application to Spark Ignition Engines, *Comb. And Flame*, 28, (1977), 197-205
- [4] J. Daou and M. Matalon, Influence of Conductive Heat-Losses on the Propagation of Premixed Flames in Channels, *Comb. And Flame*, 128, (2002), 321-339.
- [5] V.N. Kurdyumov, E. Fernandez and A. Linàn, Flame Flashback and Propagation of Premixed Flames Near a Wall, *Proc. Combust. Inst.* Volume 28, (2000), 1883-1889.
- [6] V. Kurdyumov, E. Fernández-Tarrazo, J.M. Truffaut, J. Quinard, A. Wangher, G. Searby, Experimental and numerical study of premixed flames flashback, *Proc. Combust. Inst.* Volume 31, Issue 1, (2007), 1275-1282.
- [7] C. Le Niliot, P. Gallet, Infrared thermography applied to the resolution of inverse heat conduction problems: recovery of line sources and boundary conditions, *Rev. Gén. Therm.*, Volume 37, (1998) 629-643.
- [8] P.C. Hansen, *Rank-Deficient and discrete Ill-posed Problems*, SIAM, Philadelphie (1998).

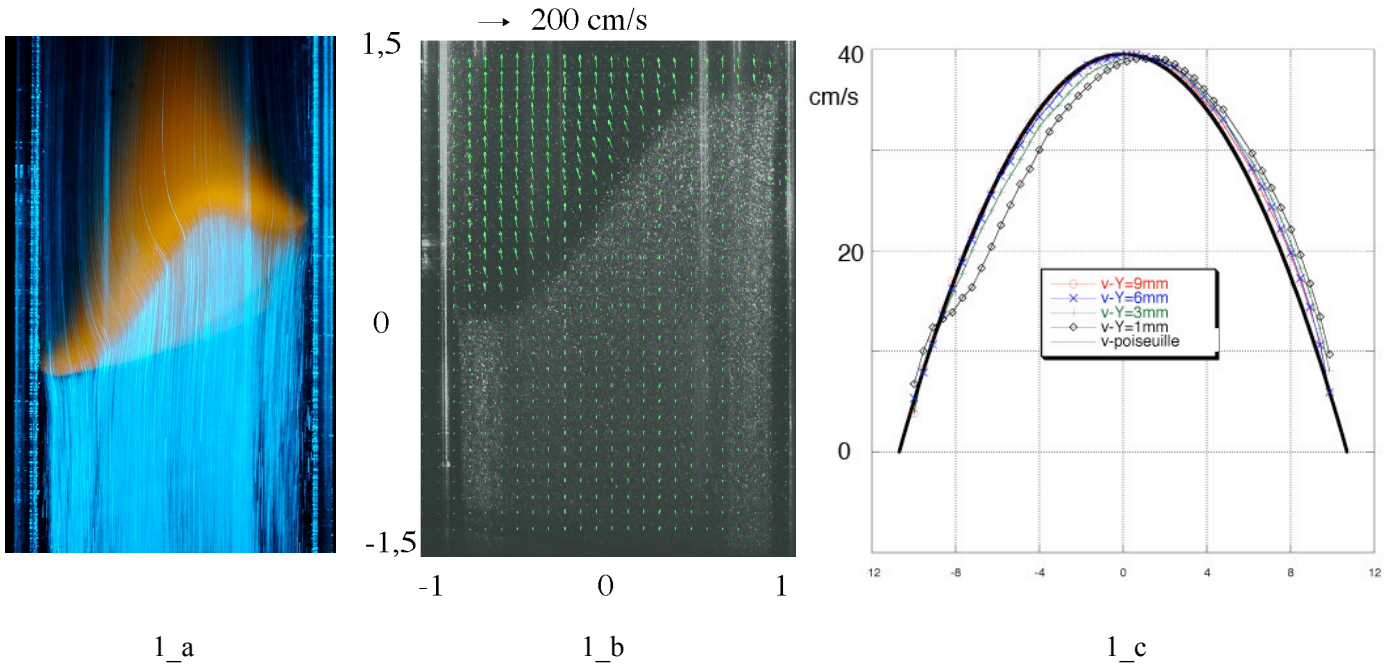


Figure 1 : Visualisation et champ de vitesse d'une flamme propane-air pauvre en conditions critiques de flashback; $\phi = 0.65$, $U_L = 14$ cm/s.

1-a : Forme de flamme et lignes de courant visualisées par plan laser. La zone orangée (laiteuse en NB) est due au rayonnement thermique des particules réfractaires (CSO_2).

1-b : Champ de vitesse reconstitué par PIV.

1-c : Profils radiaux de vitesse axiale dans les gaz frais à différentes distances devant la flamme.

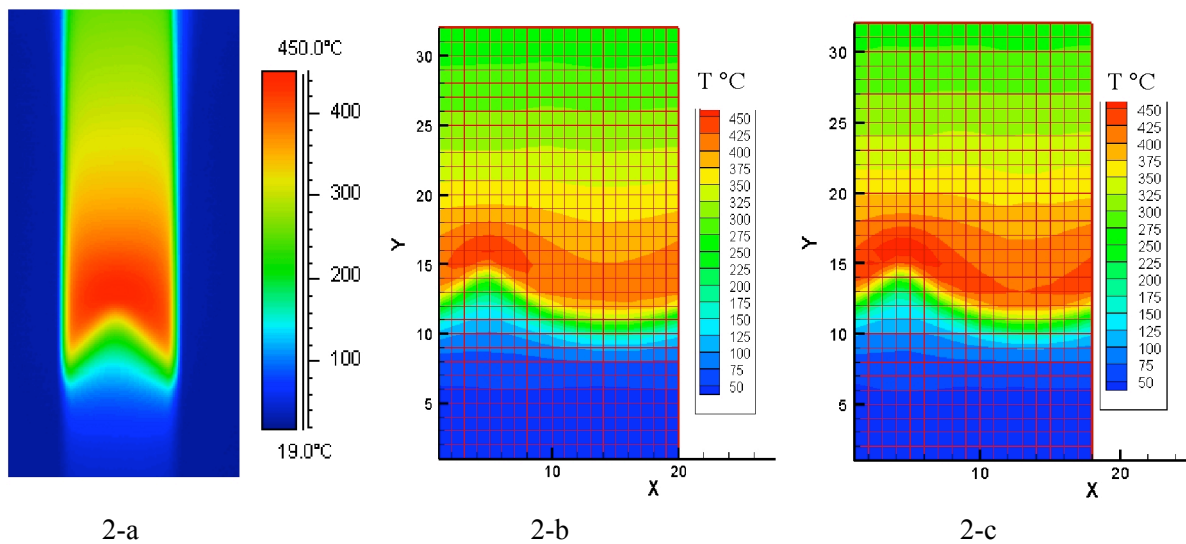


Figure 2 : Thermogramme (2-a) et reconstitution du champ de température de la surface externe (2-b) et interne du brûleur (2-c) avec une flamme stabilisée à la limite de flashback :

$\phi = 0.65$, $U_L = 14$ cm/s. L'axe X représente un tour complet de la circonférence externe (20 éléments) et la hauteur Y est de 120 mm (32 éléments).

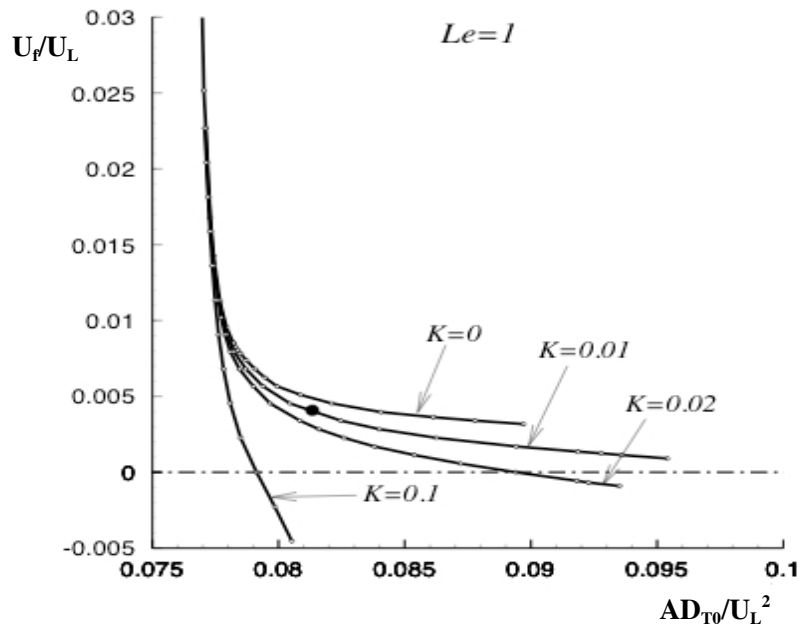
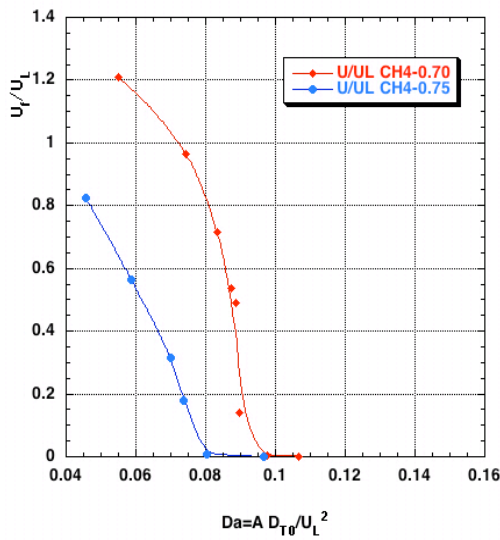
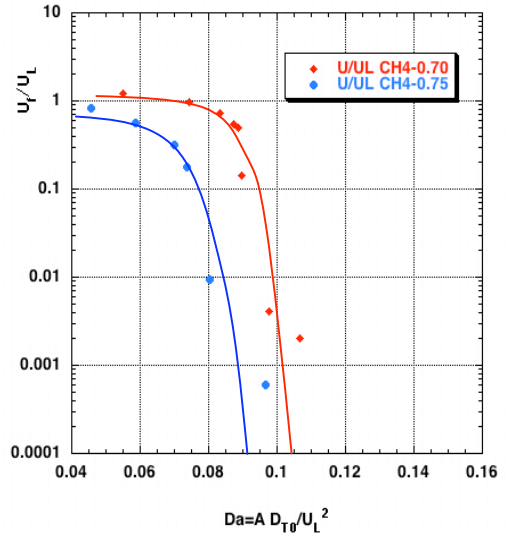


Figure 3 : Calcul numérique de la vitesse de flashback en fonction du nombre de Damköhler correspondant à une flamme de méthane pauvre ($Le = 1$, $U_L = 17$ cm/s) pour différentes valeurs du coefficient de pertes thermiques en parois.



4-a



4-b

Figure 4 : Mesure de la vitesse réduite de flashback en fonction du nombre de Damköhler pour deux flammes de méthane pauvre : $\phi = 0.7$, $U_L = 17$ cm/s et $\phi = 0.75$, $U_L = 21$ cm/s.

4-a : Coordonnées linéaires montrant le comportement loin du seuil.

4-b : Coordonnées semi logarithmiques permettant d'évaluer le nombre de Damköhler critique.