

Transferts thermiques dans la zone de stabilisation d'une flamme non-prémélangée attachée : effets de la conductivité thermique du brûleur

Sylvain LAMIGE^{1*}, Cédric GALIZZI¹, Manuel KÜHNI¹, Dany ESCUDIÉ¹

¹Centre d'Énergétique et de Thermique de Lyon, CETHIL – UMR5008, Université de Lyon, INSA-Lyon, CNRS, Bât. Sadi Carnot, Campus LyonTech-la Doua – 69621 Villeurbanne Cedex

* (auteur correspondant : sylvain.lamige@insa-lyon.fr)

Résumé - La conductivité thermique du matériau constituant le brûleur sur lequel se stabilise une flamme-jet attachée non-prémélangée conditionne la température atteinte par les lèvres du brûleur T_w , dont dépend le rôle relatif des modes de coincement thermique et chimique de la flamme par la paroi du brûleur. Ainsi, pour deux matériaux aux propriétés thermiques identiques mais qui diffèrent par leur nature chimique, la hauteur d'attachement H_a qui sépare axialement la base de la flamme du brûleur sera identique à faible T_w (coincement thermique dominant), mais distincte à T_w élevée (coincement chimique plus important), comme c'est ici le cas pour le Macor® et la pyrophyllite. Des mesures de température dans la zone d'attachement de la flamme viennent compléter l'analyse.

Nomenclature

H_a	hauteur d'attachement, <i>mm</i>	U_{fuel}	vitesse du jet combustible, <i>m.s⁻¹</i>
r_a	rayon d'attachement, <i>mm</i>	U_{ox}	vitesse de l'écoulement oxydant, <i>m.s⁻¹</i>
Re	nombre de Reynolds du jet, -	<i>Symboles grecs</i>	
T_w	température des lèvres, de surface, <i>K</i>	λ	conductivité thermique, <i>W.m⁻².K⁻¹</i>

1. Introduction

Dans une configuration de flamme-jet non-prémélangée, une paroi sépare initialement combustible et oxydant. L'interaction flamme/paroi participe donc à tous les couplages aérothermochimiques qui interviennent dans la stabilisation d'une flamme attachée. Les effets aérodynamiques sont reconnus, notamment ceux liés à l'épaisseur des lèvres du brûleur sur la stabilité de la flamme [1,2] ; la température des lèvres T_w du brûleur [3,4] montre aussi l'implication des transferts thermiques ; enfin les effets chimiques incluent surtout le coincement qui se traduit par la destruction de radicaux à la paroi.

Le rôle relatif des modes de coincement thermique et chimique d'une flamme par une paroi dépend de la température de surface T_w [5-9]. Le coincement thermique, qui se produit « quand la chaleur générée par la combustion ne compense plus les pertes thermiques aux parois » [6], domine à T_w faible. Si T_w s'élève, le coincement chimique (« processus cinétique hétérogène au cours duquel des radicaux intermédiaires très réactifs subissent des réactions de terminaison à la paroi » [6]) devient important. En effet, les pertes thermiques sont réduites, et des réactions de recombinaison peuvent être favorisées car T_w influence les mécanismes de rupture de chaînes. En revanche, la littérature diverge sur la valeur de T_w pour laquelle s'opère la transition, entre 400 K et 900 K [5-9]. En réalité, l'adsorption, la recombinaison et la désorption de radicaux dépendent certes de T_w , mais aussi de la nature de la paroi et des radicaux. Le matériau de surface joue donc un rôle important sur le coincement de flammes prémélangées [6-9]. La distance de coincement est quasi indépendante du matériau quand T_w est faible, elle est sinon plus élevée pour l'acier inoxydable que pour les oxydes (Al_2O_3 ou SiO_2) [6,8,9]. Yang et al. [9] montrent une corrélation entre cette distance et la part d'oxygène

chimisorbé. Ils ont aussi suggéré qu'une couche de groupes OH couvrant la surface à faible T_w pouvait désorber à T_w plus élevée, laissant libres des sites pour piéger d'autres radicaux.

D'autres études ont porté sur la hauteur d'attachement H_a , définie comme la distance axiale entre la base d'une flamme-jet non prémélangée attachée et les lèvres du brûleur. H_a dépend des propriétés réactives des écoulements réactants [10], et diminue avec l'augmentation de la température initiale des réactifs [11,12], témoignant du rôle important des couplages thermiques dans les mécanismes de stabilisation. Le préchauffage des réactants influence même la stabilité de la flamme dans son ensemble [12,13], tout en modifiant significativement les transferts thermiques dans la zone de stabilisation. Sans préchauffage en revanche, la chaleur dégagée par la flamme est la seule source intervenant dans les transferts thermiques au brûleur. Dans un tel cas, la chaleur générée à la base de la flamme se trouve transférée davantage au jet qu'à l'écoulement coaxial ou encore au brûleur [14]. Dans tous les cas, la chaleur transmise au brûleur est souvent réintroduite *in fine* dans la flamme, que ce soit via l'écoulement combustible ou l'air coaxial [15]. La position axiale dans la flamme à laquelle cette chaleur est réintroduite (entre la zone d'attachement et plus en aval) dépend néanmoins des couches limites (thermiques comme dynamiques) le long des parois du tube.

H_a dépend également, de façon non monotone, de la vitesse d'injection du combustible U_{fuel} [3,10-12]. Pour U_{fuel} très faible (en général tel que $U_{\text{fuel}}/U_{\text{ox}} < 1$), H_a décroît quand U_{fuel} augmente [3,12], tandis que le rayon d'attachement r_a lui croît [3]. Ce déplacement radial de la flamme avec l'accroissement de U_{fuel} (à valeurs faibles) est dû à l'augmentation de la part de combustible s'écoulant hors du tube par-dessus la lèvre, repoussant la ligne stœchiométrique et donc la flamme du côté de l'air [3], que la flamme se stabilise dans des conditions stœchiométriques ou bien plus pauvres [16]. En conséquence, pour U_{fuel} modérée, la localisation du point de stabilisation de la flamme se déplace vers l'amont et l'extérieur, jusqu'à une position extrême intervenant pour $U_{\text{fuel}}/U_{\text{ox}}$ dans la gamme 2–4 [3] et donnant simultanément H_a minimal et r_a maximal. Si U_{fuel} augmente encore, la quantité de mouvement du jet s'accroît et conduit à un entrainement d'air qui ramène la ligne stœchiométrique et la flamme vers l'intérieur [3]. La flamme se stabilise donc dans des conditions de vitesse locale de plus en plus grande (sous l'élévation de U_{fuel} couplée au rapprochement du jet dont les vitesses sont élevées), et finit par se suspendre [15].

Quatre régions peuvent être définies selon U_{fuel} , correspondant chacune à une évolution monotone avec U_{fuel} des caractéristiques de la zone d'attachement (H_a , r_a et T_w) [3]. Ces régions restent les mêmes avec différents matériaux de conductivités thermiques distinctes [3]. Une conductivité thermique λ plus faible entraîne par ailleurs une élévation de T_w , mais des valeurs identiques de H_a ont en revanche été obtenues quelque soit le matériau, à l'exception de la pyrophyllite ayant le plus faible λ des matériaux testés et pour laquelle H_a est résolument plus petit [3]. Une valeur critique de T_w obtenue grâce au faible λ avait alors été suggérée comme responsable de la réduction de H_a [3], d'autant plus que la baisse de T_w à l'approche de la suspension (suite à l'augmentation des transferts convectifs dans le tube) entraîne l'élévation de H_a pour la pyrophyllite jusqu'à des valeurs comparables à celles de l'ensemble des autres matériaux. Néanmoins, certaines études déjà citées [6,9] n'ont pas trouvé de corrélation entre λ et les distances de coincement mesurées sur différents matériaux, qui ne s'ordonnent pas selon λ .

Il faut donc évaluer si les faibles hauteurs H_a obtenues avec un brûleur en pyrophyllite [3] proviennent seulement d'une forte température T_w résultant d'un λ plus faible, ou bien si ce comportement de coincement particulier est d'origine chimique. Afin de résoudre cette délicate question traitant de l'importance relative des effets thermiques et chimiques, l'originalité consiste ici à faire varier indépendamment les caractéristiques thermiques et

chimiques. Ceci est rendu possible grâce au choix spécifique de matériaux, puisque cette étude utilise du Macor®, matériau à très faible λ comme la pyrophyllite mais de nature chimique distincte.

2. Dispositif expérimental

Cette étude utilise un foyer vertical à pression atmosphérique déjà employé précédemment [3,10,11,13]. Le brûleur (un tube droit de 6 mm de diamètre intérieur et 2 mm d'épaisseur de lèvres, figure 1) permet l'injection du combustible (méthane) dans un écoulement coaxial d'air, au sein d'une chambre de combustion à section carrée (25 cm de côté). Le brûleur est constitué d'une base en alumine (Al_2O_3), sur laquelle est ajusté un embout en Al_2O_3 ou en Macor® (Corning Inc.). Le tableau 1 détaille leur composition et leur conductivité thermique λ , avec d'autres matériaux utilisés antérieurement, dont la pyrophyllite (Stumatite, ELIT SA) [3]. Dans chaque cas, un thermocouple (type K, diamètre de gaine = 0,5 mm, diamètre de brin $\approx 0,75 \mu\text{m}$) affleure au centre de la lèvre du brûleur pour mesurer la température des lèvres T_w .

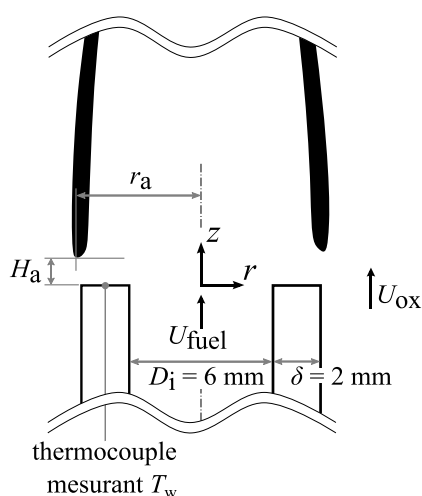


Figure 1 : Coupe schématique de la flamme et du brûleur illustrant les mesures de T_w , H_a et r_a .

	Matériau	λ
	-	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Cu	cuivre	395
laiton	laiton au plomb CuZn39Pb3	120
bronze	bronze CuSn12	55
Al_2O_3	oxyde d'aluminium (alumine)	20,0
ss-310	acier inoxydable réfractaire, nuance 310	13,8
Stumatite	pyrophyllite cuite à 1250°C $\text{Al}_2(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	2,0
Macor®	3. dont 46% SiO_2 , 17% MgO , 16% Al_2O_3 , 10% K_2O , 7% B_2O_3 , 4% F	1,5

Tableau 1 : Composition et conductivité thermique des brûleurs des précédente [3] et présente études.

La vitesse d'air U_{ox} vaut $0,2 \text{ m.s}^{-1}$ pour l'ensemble des expériences tandis que celle du jet combustible U_{fuel} varie (de moins de $0,01 \text{ m.s}^{-1}$ à plus de 10 m.s^{-1}) sur l'ensemble du domaine de flamme attachée. Cette large gamme couvre pour le jet les régimes d'écoulement laminaire comme turbulent (la transition intervenant pour U_{fuel} autour de $5,0\text{--}5,5 \text{ m.s}^{-1}$). Les vitesses reportées dans ce papier sont des vitesses moyennes débitantes. Des débitmètres massiques (BROOKS, modèles 5853s et 5850TR) sont utilisés pour le contrôle et la mesure des débits, avec une pleine échelle adaptée (e.g., 1,00, 10,0 ou 100 NL.min^{-1} pour le méthane).

Une caméra CCD intensifiée (Princeton Instruments PI-MAX2) est équipée d'un objectif Canon 100 mm f/2,0, pour une résolution de $0,031 \text{ mm.pixel}^{-1}$. Un filtre interférentiel est également employé, ayant une largeur à mi-hauteur de 5 nm et centré sur la longueur d'onde 431 nm qui correspond au pic d'émission chimiluminescente du radical CH^* , marqueur de la zone réactionnelle utilisé pour localiser la flamme. La durée d'exposition est fixée à 100 ms, et des séries de 200 images sont enregistrées dans chaque cas. Un post-traitement basé sur l'intensité de CH^* permet de localiser le point à la base de la flamme le plus extérieur, à partir duquel sont mesurés la hauteur d'attachement H_a (distance axiale entre l'extrémité du brûleur et la base de la flamme) et le rayon d'attachement r_a (distance radiale entre le côté externe de

la flamme à H_a et l'axe de symétrie), tel qu'indiqué sur la figure 1. Les calculs sont effectués sur chaque image mais seules les valeurs moyennes de chaque série sont reportées.

La température des gaz au-dessus des lèvres du brûleur Al_2O_3 a été mesurée pour plusieurs vitesses U_{fuel} avec un thermocouple (type R, diamètre de brin = 50 μm) monté sur un système de positionnement motorisé (OWIS). L'erreur de positionnement (inchangée pour l'ensemble des champs de température) est comprise dans l'incertitude relative de positionnement : $\pm 0,10$ mm et $-0,10$ mm/ $+0,15$ mm dans les directions radiale et axiale, respectivement. Dans le système de coordonnées cylindriques (r , z , avec une origine sur l'axe de symétrie au sommet du brûleur), le champ de mesure couvre $r \in [2,75$ mm, 5,50 mm] et $z \in [-0,50$ mm, 1,50 mm] (pour $r \geq 5,10$ mm, $z \geq 0,10$ mm sinon). Le pas de la mesure est de 0,25 mm dans les deux directions sauf près du brûleur ; le thermocouple en est alors maintenu à une distance de 0,10 mm. Les valeurs moyennes de température sont enregistrées (Grapthec GL900) en régime établi. Les fils nus du thermocouple sont recouverts d'un fin revêtement protecteur afin d'empêcher toute réaction de catalyse sur le platine. Une estimation préliminaire de correction des mesures utilise des hypothèses simples mais usuelles ne prenant en compte que la convection et le rayonnement : (i) le gaz est assimilé à un mélange uniquement de combustible et d'air dont la composition dépend de r mais pas de z ; (ii) les vitesses sont supposées suivre (indépendamment de z) un profil parabolique côté jet, un profil de couche limite côté oxydant estimé à partir de mesures par vélocimétrie par images de particules (non présentées) et un profil linéaire entre les deux ; (iii) le rayonnement n'est considéré que vers les parois, assimilées à un corps noir à température uniforme (qui dépend de la chaleur dégagée par la flamme, donc de U_{fuel}) avec un facteur de forme depuis la jonction du thermocouple vers les parois ainsi égal à un. L'écart entre la température ainsi corrigée et celle mesurée ne dépasse pas 20 K (quels que soient r , z et U_{fuel}). Puisque l'intérêt réside ici dans les gradients et positions relatives des pics de température plus que dans les valeurs absolues, les valeurs présentées restent brutes.

3. Résultats et discussion

3.1. Rôle relatif des modes de coincement thermique et chimique

La figure 2 présente la hauteur d'attachement (H_a) et le rayon d'attachement (r_a) mesurés pour des flammes attachées sur le brûleur en Macor® selon une large gamme de vitesse du jet combustible U_{fuel} . De manière complémentaire, la figure 3 présente la température des lèvres (T_w) correspondante mesurée simultanément. Certains résultats obtenus avec d'autres matériaux [3] sont également reportés sur les figures 2 et 3, incluant la pyrophyllite. Le comportement avec U_{fuel} de la flamme attachée sur le brûleur en Macor® reste le même que pour l'ensemble des matériaux testés : un minimum pour H_a est obtenu simultanément avec un maximum pour r_a . Cela correspond à une position extrême de la flamme, obtenue pour $U_{\text{fuel}} = 0,70$ m.s⁻¹ quel que soit le matériau et donc λ . Cette valeur particulière de U_{fuel} indique une transition entre les régions (I-II) et (III-IV), chaque région correspondant à une évolution monotone avec U_{fuel} des caractéristiques d'attachement H_a , r_a et T_w [3].

La distinction entre les régions I et II s'effectue selon des considérations thermiques pour T_w se situant de part ou d'autre d'une valeur maximale obtenue à $U_{\text{fuel}} = 0,15$ m.s⁻¹. L'évolution radiale du positionnement de la flamme avec U_{fuel} dépend essentiellement du positionnement radial de la ligne stœchiométrique : dans les régions (I-II) à faible vitesse U_{fuel} , davantage de combustible s'écoule hors du tube par-dessus la lèvre avec l'augmentation de U_{fuel} , ce qui repousse la ligne stœchiométrique vers l'écoulement coaxial. Dans les régions (III-IV) à vitesse U_{fuel} plus importante, la quantité de mouvement du jet s'accroît quand U_{fuel} augmente, ce qui conduit à un entrainement d'air plus important de la part du jet, ramenant

ainsi la ligne stœchiométrique vers l'intérieur. En ce qui concerne l'évolution axiale du positionnement de la flamme H_a , elle est globalement en opposition à celle de r_a , excepté dans la région (IV) pour laquelle davantage de variations existent selon les matériaux même si dans l'ensemble H_a dans la région (IV) n'évolue quasiment pas (relativement aux autres régions) quel que soit le matériau considéré. L'exception concerne la pyrophyllite, pour laquelle H_a dans la région (IV) augmente jusqu'à des valeurs comparables à celles des autres matériaux.

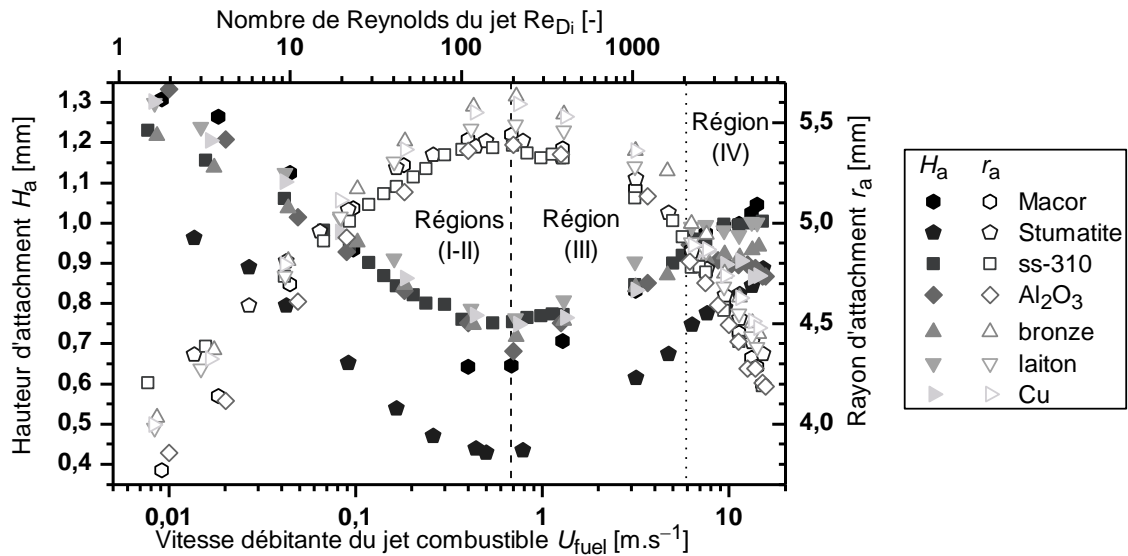


Figure 2 : H_a et r_a en fonction de U_{fuel} et Re pour les brûleurs en Macor® et en d'autres matériaux [3].

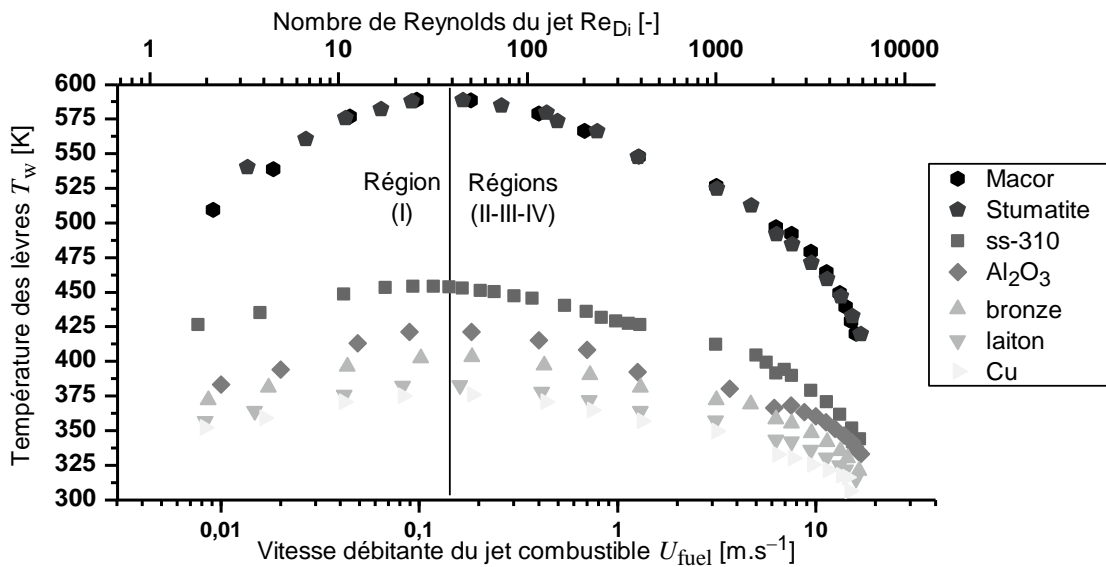


Figure 3 : T_w en fonction de U_{fuel} et Re pour les brûleurs en Macor® et en d'autres matériaux [3].

Les présents résultats pour le Macor® sont donc en accord avec cette division en régions. Toutefois, cette étude se focalise à présent sur l'évolution axiale du positionnement de la flamme avec U_{fuel} , notamment par comparaison des comportements observés au-dessus des brûleurs en Macor® et en pyrophyllite. En cohérence avec leur très proche λ , la figure 3 montre que T_w est toujours identique pour ces deux matériaux quelle que soit U_{fuel} . En revanche, H_a est clairement distincte pour ces deux matériaux (figure 2). La stabilisation plus proche du brûleur obtenue avec la pyrophyllite ne trouve donc pas sa seule origine dans une réduction des pertes thermiques avec l'augmentation de T_w . Au contraire, des phénomènes de nature chimique sont responsables de ce comportement particulier d'interaction flamme/paroi.

Des pertes thermiques moindres sont responsables d'une diminution de H_a quand T_w augmente [11,12] ; c'est ce qui est observé ici pour le Macor® avec T_w dépassant les 550 K et pour $U_{\text{fuel}}/U_{\text{ox}}$ compris dans la gamme 3–5. Dans la présente configuration aérodynamique cependant, cette diminution du mode de coincement thermique reste relativement modérée car T_w reste inférieur à 600 K. D'autre part, le coincement des radicaux est drastiquement diminué quand le brûleur en pyrophyllite est employé (figure 2). Ce phénomène est ici attribué à une possible désorption avec l'accroissement de T_w de groupes hydroxyles couvrant la surface de la pyrophyllite $\text{Al}_2(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2$. Ce dégagement de radicaux hautement réactifs favorise alors le schéma réactionnel de combustion, permettant ainsi à la flamme de se stabiliser à une distance plus proche de la paroi. Vlachos et al. [17] ont en effet montré qu'OH composait l'un des principaux viviers de radicaux affectant l'extinction d'une flamme à la paroi. De manière similaire, Prakash et al. [7] ont établi que la concentration en OH en proche paroi augmentait pour T_w plus élevée tandis que « l'action chimique » de la surface (effet d'une paroi sur le gradient relatif de la concentration en OH) diminuait. Néanmoins, cette inversion du rôle relatif des modes de coincement thermique et chimique semble disparaître aux basses valeurs de T_w obtenues pour la pyrophyllite proche de la suspension lorsque le brûleur est refroidi par convection dû aux vitesses U_{fuel} élevées. Dans ce cas, les valeurs de H_a mesurées sur le brûleur en pyrophyllite augmentent graduellement avec U_{fuel} jusqu'à être comparables à celles obtenues avec les autres matériaux, estompant ainsi les différences.

3.2. Températures mesurées dans la zone de stabilisation d'une flamme attachée

La figure 4 présente les champs de température mesurés en fonction de U_{fuel} pour des flammes attachées sur le brûleur Al_2O_3 . Ces champs sont cohérents avec l'évolution à la fois de T_w et de la localisation de la flamme telle que discutée précédemment (cf. [3], 1 et 3.1). Le pic de température mesuré dans la zone de stabilisation se déplace dans un premier temps vers l'amont et l'extérieur avec l'augmentation de U_{fuel} dans les régions (I-II), puis revient vers l'intérieur et l'aval quand U_{fuel} est augmentée davantage dans la région (III). Il est également possible de distinguer la région (IV), pour laquelle le pic de température est translaté vers l'intérieur avec l'augmentation de U_{fuel} tandis que sa position axiale n'augmente plus. Au contraire, une très légère baisse de H_a observée à la fin de la région (IV) pour le brûleur Al_2O_3 dans la figure 2 est également identifiable dans la figure 4. Par ailleurs, les gradients de température s'accroissent avec l'augmentation de U_{fuel} , aussi bien du côté du jet que de l'écoulement coaxial ainsi qu'en amont vers le brûleur. Ce dernier point confirme des pertes thermiques au brûleur plus élevées avec la diminution de T_w à l'approche de la suspension.

Quantitativement, le pic de température est toujours situé radialement plus à l'intérieur que le rayon d'attachement r_a (cf. figure 2). Ceci provient en premier lieu de la définition retenue ici pour r_a (cf. figure 1), à savoir la distance entre l'axe de symétrie et le point à la base de la flamme le plus extérieur, qui est basée sur l'intensité de CH^* . En réalité la flamme a une épaisseur finie, ce qui signifie que r_a se situe du côté extérieur du point de stabilisation de la flamme, d'où une certaine différence avec le pic de température attendu dans l'épaisseur de la flamme au centre du noyau réactionnel de stabilisation. Un autre élément d'explication provient du fait que la jonction du thermocouple voit sa température abaissée par conduction quand elle est située au niveau du pic de température mais que les fils conduisent vers une région nécessairement plus froide. À l'opposé, la température de la jonction une fois située radialement plus à l'intérieur par rapport au pic de température réel sera accrue par conduction depuis les fils traversant la zone du pic de température réel. Les profils se trouvent de la sorte légèrement décalés vers l'intérieur, amplifiant encore un peu l'écart radial de positionnement entre r_a et le pic de température mesuré. Toutefois, l'évolution relative du pic de température avec U_{fuel} est cohérente avec celle de r_a et cette corrélation reste donc valide.

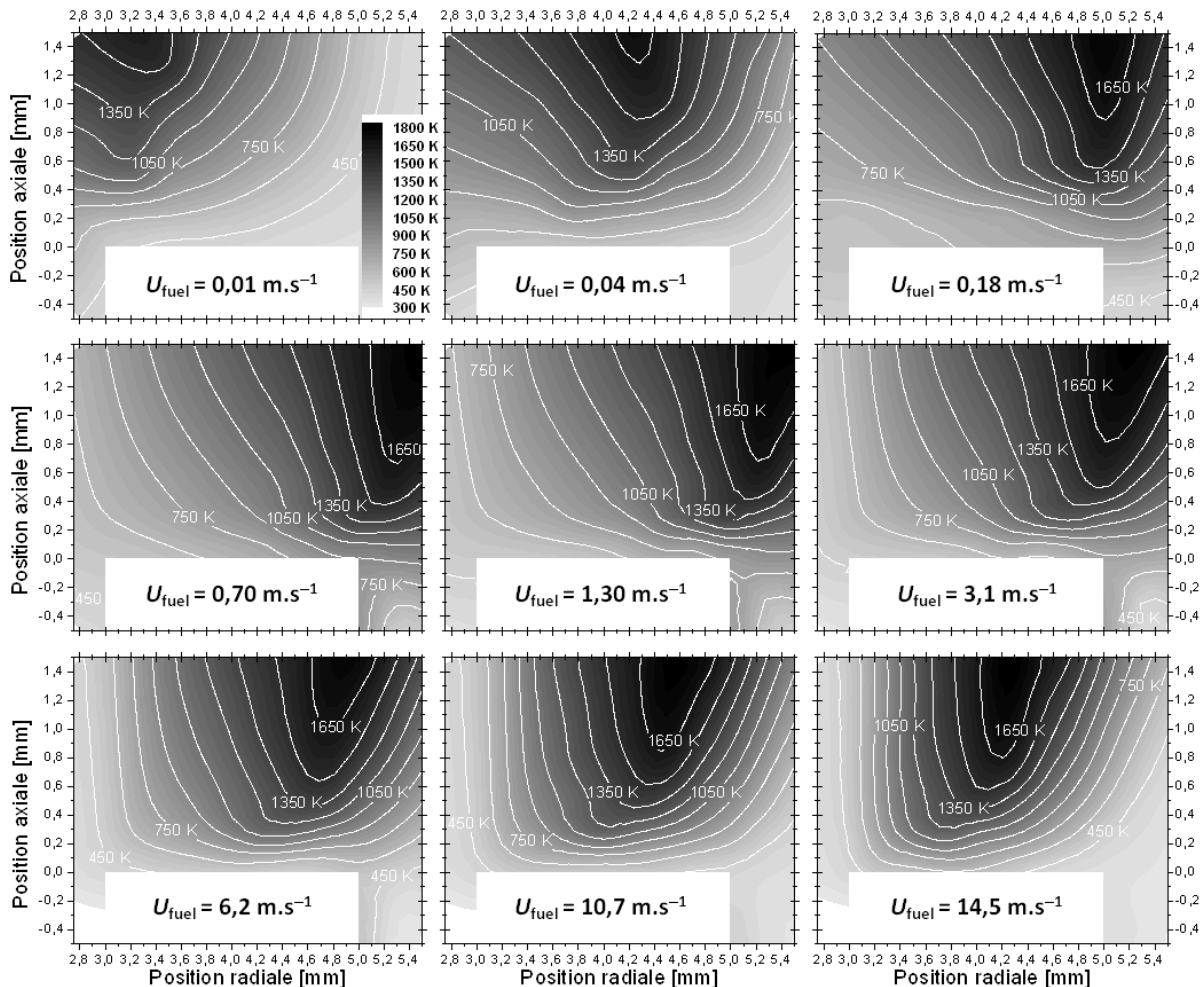


Figure 4 : Champs de température d'une flamme attachée sur le brûleur Al_2O_3 en fonction de U_{fuel} .

Une question qui se pose alors est de savoir « qui » de la température ou de la localisation gouverne. L'observation (simple) des régimes transitoires apporte un élément de réponse. En effet, suite à une modification de U_{fuel} , la nouvelle position de stabilisation de la flamme (H_a , r_a) est atteinte en un temps de réponse de quelques secondes, nettement inférieur à celui nécessaire à l'établissement du nouveau gradient de température au sein du tube (quelques minutes). Bien qu'ayant nécessairement un effet couplé sur la stabilisation de la flamme, les champs thermiques apparaissent donc comme une conséquence des conditions aérochimiques des écoulements réactants qui contrôlent *a priori* le positionnement de la flamme.

4. Conclusions

La température des lèvres T_w en aval desquelles se stabilise une flamme-jet attachée non-prémélangée dépend de la conductivité thermique λ du matériau du brûleur. De T_w dépend le rôle relatif des modes de coincement thermique et chimique de la flamme par la paroi du brûleur. À faible T_w (coincement thermique dominant), la hauteur d'attachement H_a qui sépare axialement la flamme du brûleur est indépendante du matériau. L'élévation de T_w par voie passive (baisse de λ et faibles échanges convectifs dans le tube) favorise une stabilisation plus proche du brûleur. Mais la réduction des pertes thermiques augmente surtout le rôle relatif du mode de coincement chimique. À T_w identiquement élevée comme ici pour le Macor® et la pyrophyllite (λ très faible), H_a diffère nettement dû aux propriétés de surface distinctes : des groupes hydroxyles adsorbés à la surface de la pyrophyllite peuvent désorber à forte T_w . Ces résultats inédits ouvrent des pistes d'actions futures, parmi lesquelles l'augmentation de T_w

par voie active ou bien encore la détermination, en fonction du matériau du brûleur, de l'importance de l'humidité ambiante initiale (plus ou moins de groupes hydroxyles adsorbés à la surface) sur le coincement et la stabilisation d'une flamme attachée.

Références

- [1] F. Takahashi, W.J. Schmoll, Lifting criteria of jet diffusion flames, *Proc. Combust. Inst.*, 23-1, (1991), 677–683.
- [2] Y. Otakeyama, T. Yokomori, M. Mizomoto, Stability of CH₄-N₂/air jet diffusion flame for various burner rim thicknesses, *Proc. Combust. Inst.*, 32-1 (2009), 1091–1097.
- [3] S. Lamige, K.M. Lyons, C. Galizzi, F. André, M. Kühni, D. Escudié, Burner lip temperature and stabilization of a non-premixed jet flame, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, (2013), DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2013.11.008.
- [4] Ö.L. Gülder, K.A. Thomson, D.R. Snelling, Effect of fuel nozzle material properties on soot formation and temperature field in coflow laminar diffusion flames, *Combust. Flame*, 144-1/2 (2006), 426–433.
- [5] P. Popp, M. Baum, Analysis of wall heat fluxes, reaction mechanisms, and unburnt hydrocarbons during the head-on quenching of a laminar methane flame, *Combust. Flame*, 108-3 (1997), 327–348.
- [6] C.M. Miesse, R.I. Masel, C.D. Jensen, M.A. Shannon, M. Short, Submillimeter-scale combustion, *Am. Inst. Chem. Eng. J.*, 50-12 (2004), 3206–3214.
- [7] S. Prakash, N.G. Glumac, N. Shankar, M.A. Shannon, OH concentration profiles over alumina, quartz, and platinum surfaces using laser-induced fluorescence spectroscopy in low-pressure hydrogen/oxygen flames, *Combust. Sci. Technol.*, 177-4 (2005), 793–817.
- [8] K.T. Kim, D.H. Lee, S. Kwon, Effects of thermal and chemical surface-flame interaction on flame quenching, *Combust. Flame*, 146-1/2 (2006), 19–28.
- [9] H. Yang, Y. Feng, Y. Wu, X. Wang, L. Jiang, D. Zhao, H. Yamashita, A surface analysis-based investigation of the effect of wall materials on flame quenching, *Combust. Sci. Technol.*, 183-5 (2011), 444–458.
- [10] J. Min, F. Baillet, A. Wyzgolik, E. Domingues, M. Talbaut, B. Patte-Rouland, C. Galizzi, Impact of CO₂/N₂/Ar addition on the internal structure and stability of nonpremixed CH₄/Air flames at lifting, *Combust. Sci. Technol.*, 182-11 (2010), 1782–1804.
- [11] S. Lamige, C. Galizzi, J. Min, J. Perles, F. André, F. Baillet, D. Escudié, Effect of reactant preheating on the stability of non-premixed methane/air flames, *Proc. of 14th Int. Heat Trans. Conf.*, vol. 3 (Washington, 8–13 août 2010), 205–210 (IHTC14-22938).
- [12] K. Fujiwara, Y. Nakamura, T. Hirasawa, Development of “tiny” droplet flame simulator: “super-stabilized” micro-jet flame in a hot air, *J. Therm. Sci. Technol.*, 6-2 (2011), 235–246.
- [13] S. Lamige, J. Min, C. Galizzi, F. André, F. Baillet, D. Escudié, K.M. Lyons, On preheating and dilution effects in non-premixed jet flame stabilization, *Combust. Flame*, 160-6 (2013), 1102–1111.
- [14] T. Kawamura, K. Asato, T. Mazaki, Structure analysis of the stabilizing region of plane, laminar fuel-jet flames, *Combust. Sci. Technol.*, 22-5 (1980), 211–216.
- [15] K. Robson, M.J.G. Wilson, The stability of laminar diffusion flames of methane, *Combust. Flame*, 13-6 (1969), 626–634.
- [16] Y. Ikeda, J.L. Beduneau, Attachment structure of a non-premixed laminar methane flame, *Proc. Combust. Inst.*, 30-1 (2005), 391–398.
- [17] D.G. Vlachos, L.D. Schmidt, R. Aris, Ignition and extinction of flames near surfaces: combustion of CH₄ in air, *Am. Inst. Chem. Eng. J.*, 40-6 (1994), 1005–1017.