

Influence de la température initiale des réactants sur la stabilisation d'une flamme non-prémélangée méthane/air.

Sylvain LAMIGE^{1*}, Cédric GALIZZI¹, Frédéric ANDRÉ¹, Dany ESCUDIÉ¹

¹INSA-Lyon, CNRS, Univ Lyon 1, CETHIL, UMR5008

9, rue de la Physique, Campus LyonTech - La Doua – F-69621 Villeurbanne

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

Résumé - Des résultats expérimentaux sont présentés, portant sur l'analyse de l'impact de la température d'injection des réactants (jusqu'à 850 K) sur la stabilisation d'une flamme-jet non-prémélangée méthane/air. L'étude souligne une nette augmentation de la stabilité de la flamme avec le préchauffage des réactants, notable à travers une diminution des hauteurs de stabilisation (hauteurs d'attachement et de suspension), ainsi qu'une augmentation des vitesses de suspension et de rattachement qui délimitent la zone d'hystérésis vers des valeurs plus élevées de vitesse du jet.

Nomenclature

D_i	diamètre intérieur de l'injecteur, mm	<i>Indices</i>	
H	hauteur de stabilisation, mm	0	relatif à la température ambiante de référence, $295\ K$
$S_{L/st}$	vitesse de flamme laminaire prémélangée à la stœchiométrie, $m.s^{-1}$	a	attachement (s'agissant de la hauteur H), rattachement (s'agissant de la vitesse U)
T	température initiale mesurée, K	<i>air</i>	relatif à l'écoulement d'air
T_{air}	température initiale de référence, K	<i>CH4</i>	relatif au jet de méthane
U	vitesse moyenne débitante, $m.s^{-1}$	l	suspension (s'agissant de la vitesse U et de l'exposant α)
<i>Symboles grecs</i>		L	suspension (s'agissant de la hauteur H)
α	exposant de régression en puissance, -	S	relatif à $S_{L/st}$
δ	épaisseur de lèvre du tube d'injection, mm		

1. Introduction

Dans un souci d'efficacité énergétique, de nombreux brûleurs industriels fonctionnant en combustion non-prémélangée utilisent des procédés de récupération de chaleur. Dans ce cas, les niveaux de températures atteints sont plus élevés et ont donc un impact sur le processus de stabilisation de la flamme. Par ailleurs, les mécanismes de stabilisation ne font toujours pas l'objet d'un consensus, comme revu récemment par Lawn [1] dans le cas de flammes suspendues. Au vu de la température initiale des réactants rencontrée en pratique, il apparaît donc comme essentiel d'étudier son influence sur la stabilisation de ce type de flamme.

Certaines grandeurs macroscopiques des flammes-jets sont généralement employées pour étudier les différents régimes de stabilité et les transitions entre ces régimes observées par variation de la vitesse du jet. En régime de flamme attachée (*attached flame*), la distance séparant la sortie du brûleur de la base de la flamme (voir figure 3a) est définie comme étant la hauteur d'attachement H_a (*attachment height*). L'augmentation de la vitesse du jet va progressivement modifier l'équilibre local dans la zone de stabilisation jusqu'à atteindre la vitesse de suspension U_1 (*lift-off velocity*) marquant la transition brusque vers le régime de flamme suspendue (*lifted flame*). La flamme se stabilise alors plus en aval dans l'écoulement, séparée de l'injecteur (voir figure 3b) par la hauteur de suspension H_L (*lift-off height*). Si la vitesse d'injection est encore augmentée, H_L augmente jusqu'au soufflage (*blow-out*) de la

flamme. Avant d'atteindre cette limite, la vitesse du jet peut aussi être redescendue bien en deçà de U_1 jusqu'à la vitesse de rattachement U_a (*reattachment velocity*), pour laquelle la flamme revient brusquement se stabiliser à proximité des lèvres du brûleur. Les vitesses critiques de transition entre les différents régimes, U_1 et U_a , marquent donc les limites d'une zone d'hystérésis (voir figure 4) caractéristique des flammes-jets au sein de laquelle la flamme peut être soit attachée soit suspendue selon son état initial.

Ces grandeurs seront naturellement utilisées dans cette étude sur l'influence de la température initiale des réactants. Les premiers travaux à ce sujet sont ceux de Takeno et Kotani [2], portant sur une flamme non-prémélangée gaz de ville/air ou hydrogène/air avec des réactants préchauffés jusqu'à 1000 K. Avec l'augmentation de la température initiale, ces auteurs ont principalement observé une augmentation des vitesses de transition entre les différents régimes de combustion.

Les études conduites depuis en conditions préchauffées concernaient peu la stabilisation des flammes-jets mais s'intéressaient plutôt à la production de suies ou NO_x ou bien à un nouveau régime dit de « combustion sans flamme » (*flameless combustion*). Toutefois, comme évoqué par Oldenhof et al. [3], les mécanismes de stabilisation de ce régime sont très différents de ceux des flammes-jets suspendues conventionnelles.

Il faut tout de même noter les travaux récents de Kim et al. [4] sur une flamme-jet turbulente propane/air en conditions préchauffées. Ces auteurs ont montré que les vitesses U_1 et U_a , normalisées par la vitesse de flamme laminaire prémélangée à la stœchiométrie $S_{L|st}$ – qui augmente avec la température [5] –, restaient quasiment constantes indépendamment de la température initiale. Cette vitesse $S_{L|st}$ a d'ailleurs un rôle prépondérant dans les corrélations utilisées par Kim et al. pour prédire les grandeurs macroscopiques de la flamme, confirmant ainsi son rôle clé dans la stabilisation des flammes non-prémélangées.

La présente étude vient donc compléter les données nécessaires à la compréhension des mécanismes de stabilisation des flammes-jets en s'intéressant à la température initiale des réactants jusqu'à une valeur de 850 K. Les vitesses de transition entre les différents régimes et les hauteurs de stabilisation seront plus particulièrement considérées.

2. Dispositif expérimental

Des campagnes expérimentales ont été réalisées sur une flamme issue d'un jet central de méthane débouchant dans un écoulement coaxial d'air au sein d'une chambre de combustion à pression atmosphérique (voir figures 1 et 2). L'injecteur est un tube droit de diamètre intérieur D_i 6,0 mm, d'épaisseur de lèvre δ 2,1 mm et dont la longueur permet l'obtention d'un profil de vitesse en sortie pleinement développé. La combustion a lieu dans une veine de section carrée $250 \times 250 \text{ mm}^2$, équipée de hublots de visualisation pour les accès optiques. Grâce à un préchauffeur électrique intégré sur la ligne d'alimentation en air, la température initiale d'air T_{air} au niveau de l'injection peut atteindre 580°C (850 K). Le méthane est également préchauffé mais de manière indirecte par échanges thermiques avec l'écoulement d'air : sa température T_{CH_4} n'est donc pas contrôlée directement ; elle dépend notamment de la température de préchauffage de l'air ainsi que des débits d'air et de méthane. Des écarts sont donc constatés entre la température initiale de référence $\underline{T}_{\text{air}}$ reportée dans cette étude et les températures mesurées T_{air} et T_{CH_4} , dans la limite $|T_{\text{air}} - \underline{T}_{\text{air}}|_{\text{max}} = 36 \text{ K}$ et $|T_{\text{air}} - T_{\text{CH}_4}|_{\text{max}} = 50 \text{ K}$ dans le cas attaché et 150 K dans le cas suspendu (T_{CH_4} étant toujours inférieure à T_{air} dans ce cas).

Les températures T_{air} et T_{CH_4} sont mesurées au moyen de thermocouples de type K plongés en continu dans l'écoulement d'air et ponctuellement dans celui de méthane de manière à ne pas perturber la flamme. Les débits d'air et de méthane sont mesurés par des débitmètres

massiques, et les vitesses présentées dans cette étude sont les vitesses moyennes débitantes calculées en prenant en compte la variation de masse volumique avec la température initiale. La gamme de vitesse d'air U_{air} varie entre 0,05 et 0,85 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ et celle de méthane U_{CH_4} entre 1 et 85 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

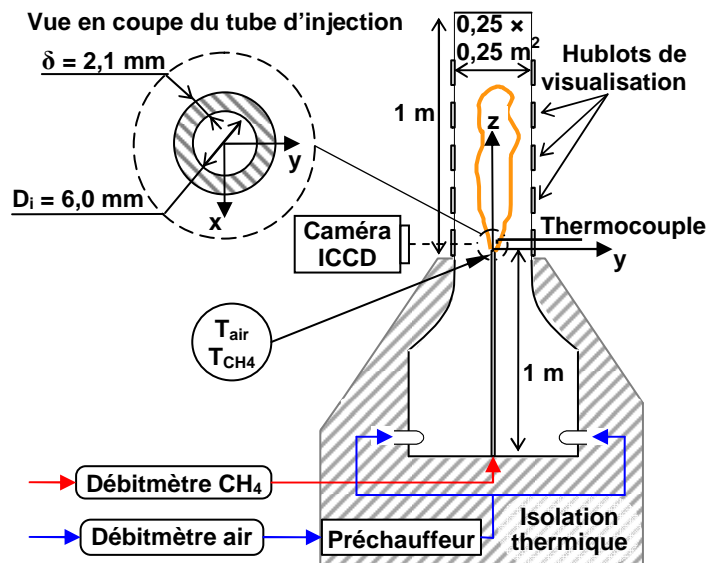


Figure 1 : Schéma du dispositif expérimental (proportions non conservées)



Figure 2 : Photos du dispositif expérimental

Une caméra ICCD¹ munie d'un filtre UV centré sur 431 nm (largeur à mi-hauteur de 5 nm) permet l'acquisition de la chimiluminescence directe du radical CH^* , considéré comme un bon marqueur de la zone réactive. Les images acquises sont ensuite post-traitées pour déterminer les hauteurs de stabilisation H_a et H_L (cf. figure 3).

Des compléments d'information concernant le dispositif expérimental, son comportement thermique et les conditions de mesures et d'acquisition d'images sont disponibles dans la référence [6].

3. Résultats et discussions

3.1. Zone d'hystérésis

Le phénomène d'hystérésis obtenu à température ambiante dans la configuration étudiée est présenté sur la figure 4. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Min et al. [7] avec un dispositif identique. Ils seront utilisés comme référence pour effectuer des comparaisons avec les configurations présentant un fort préchauffage. Il faut noter que les vitesses de suspension U_1 et de rattachement U_a sont indépendantes de la vitesse d'air U_{air} dans la présente gamme d'étude.

L'augmentation de température initiale des réactants modifie significativement les limites de la zone d'hystérésis de la flamme. On note en effet sur la figure 5 une translation de la zone d'hystérésis vers des vitesses de méthane plus élevées. Cette translation s'accompagne d'une extension de la zone d'hystérésis. Une température initiale plus élevée nécessitera donc une vitesse de jet plus importante pour pouvoir suspendre la flamme.

¹ Capteur photographique CCD (Charge-Coupled Device) intensifié.

Les vitesses U_a et U_l sont tracées en fonction de T_{air} sur la figure 6. Ces vitesses semblent augmenter linéairement avec T_{air} dans la gamme s'étendant de 295 à 600 K, mais les cas originaux présentés ici pour $T_{air} = 850$ K s'écartent de cette réponse linéaire. Toutefois, ces cas ont été obtenus lors d'une phase exploratoire dans des conditions d'essai légèrement différentes des cas précédents, ce qui est susceptible d'expliquer ces différences. La vitesse d'air est notamment bien plus élevée ($U_{air} = 0,85$ m.s⁻¹), et ce cas a été réalisé avec isolation des parois de la chambre de combustion ce qui est susceptible d'avoir une influence sur le comportement thermique global du dispositif expérimental notamment par modification des températures de surface des parois de la chambre de combustion et des lèvres du tube d'injection. Des recherches complémentaires sont donc nécessaires pour déterminer si ce changement de conditions thermiques peut expliquer la différence de comportement observée sur ce dernier point.

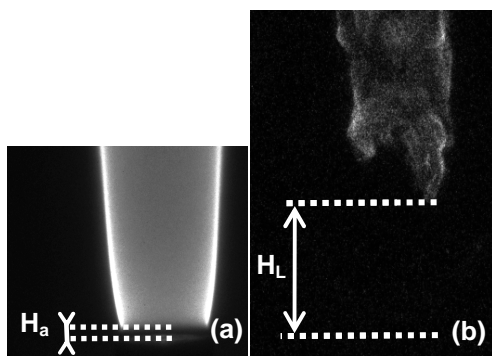


Figure 3 : Illustration des hauteurs
(a) d'attachement H_a et
(b) de suspension H_L

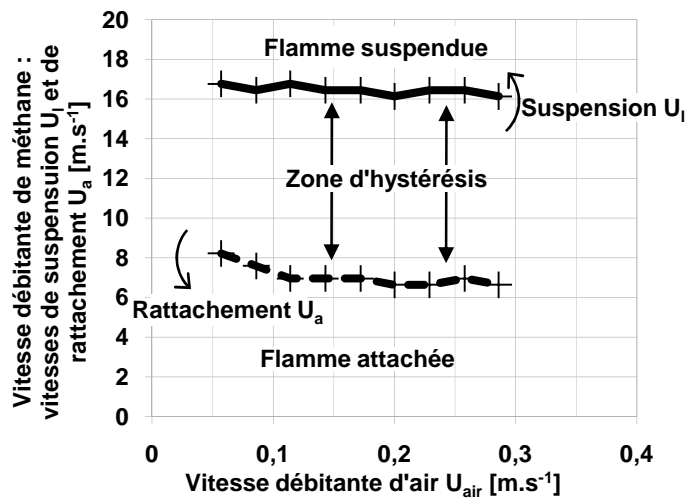


Figure 4 : Zone d'hystérésis à température ambiante

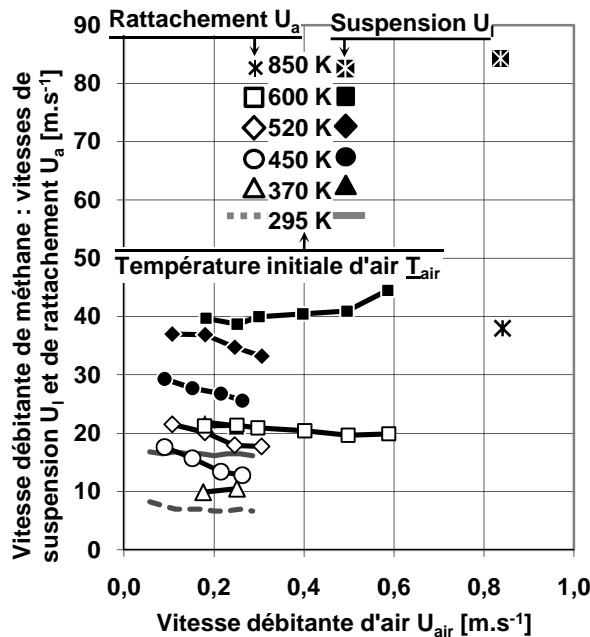


Figure 5 : Zone d'hystérésis avec préchauffage

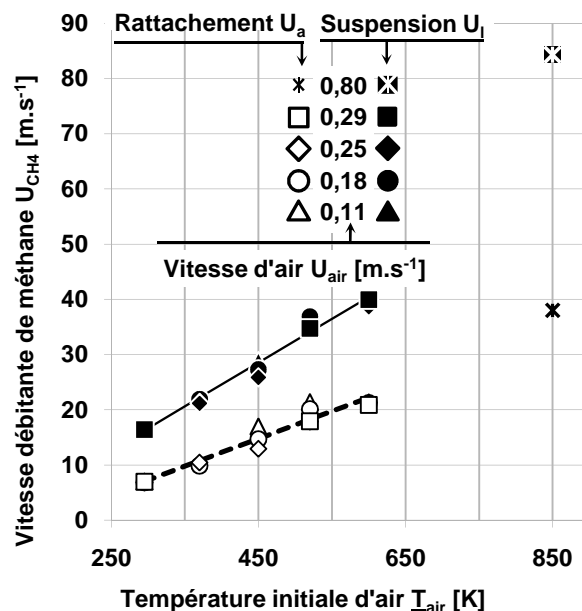


Figure 6 : Vitesses de suspension U_l et de rattachement U_a en fonction de la température initiale d'air T_{air}

Une autre approche consiste à interpréter les résultats en se basant sur la vitesse $S_{L|st}$ et sa sensibilité à la température. Cette vitesse est en effet reconnue comme jouant un rôle prépondérant dans la stabilisation des flammes-jets, comme le rappellent les résultats de Kim et al. [4] sur la constance des rapports $U_1/S_{L|st}$ et $U_a/S_{L|st}$ indépendamment de la température initiale. La vitesse $S_{L|st}$ varie suivant une corrélation en puissance du type $S_{L|st} = S_{L,0|st} \times \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\alpha_S}$, où $S_{L,0|st}$ est la valeur de $S_{L|st}$ à la température ambiante T_0 . La figure 7 présente donc une régression en puissance du même type pour U_1 et U_a en fonction de $\frac{T}{T_0}$. Les vitesses $U_{1,0}$ et $U_{a,0}$ à température ambiante valent respectivement 16,0 et 7,1 $m \cdot s^{-1}$, les exposants correspondants étant α_1 et α_a . La valeur $\alpha_a = 1,579$ pour U_a correspond bien à la valeur d'exposant $\alpha_S = 1,575$ des résultats de Mishra [5] pour $S_{L|st}$. La valeur $\alpha_1 = 1,348$ pour U_1 est en revanche sensiblement inférieure ; on note toutefois que la régression en puissance ne passe toujours pas par le point à 850 K. L'hypothèse est faite que les valeurs de U_1 mesurées entre 370 et 600 K sont légèrement sous-évaluées. En effet, des extinctions locales de la flamme apparaissent en conditions préchauffées peu avant la suspension (voir figure 8). Celles-ci pourraient être dues à des inhomogénéités de température T_{air} inhérentes aux conditions expérimentales et pouvant causer la suspension prématurée de la flamme. Or, ces inhomogénéités de T_{air} sont plus marquées à faible vitesse d'air, mais sont atténuées pour des valeurs de U_{air} élevées comme c'est le cas à 850 K. Des recherches complémentaires en cours devraient là encore permettre de vérifier cette analyse.

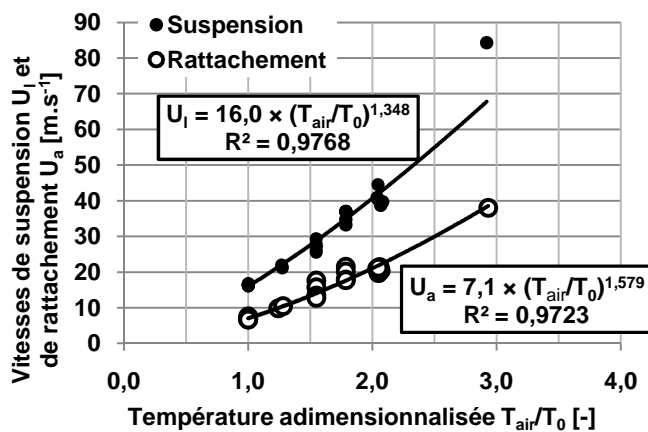


Figure 7 : Vitesses critiques U_1 et U_a en fonction de la température adimensionnée $\frac{T_{air}}{T_0}$

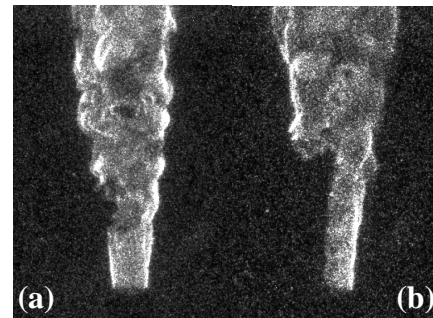


Figure 8 : Visualisation par chimiluminescence CH^* (temps d'exposition 0,1 ms) : extinctions locales de flamme (a) au point de transition (b) en bas de la flamme ; $T_{air} = 600$ K ; $U_{air} = 0,18$ m/s ; $U_{CH_4} = 32$ m/s

3.2. Hauteurs de stabilisation

La figure 9 présente l'évolution de la hauteur d'attachement H_a en fonction de la vitesse de méthane U_{CH_4} pour différentes températures initiales T_{air} . Sans préchauffage (marques et trait gris sur la figure 9), H_a augmente avec U_{CH_4} jusqu'à la suspension. En présence de préchauffage, l'augmentation de H_a avec U_{CH_4} est plus marquée. Même si la valeur de H_a à la suspension ne change pas de manière significative avec T_{air} , l'augmentation de T_{air} conduit à une diminution de H_a pour des vitesses de réactants fixées, comme mis en évidence sur la figure 10 pour $U_{CH_4} = 13$ $m \cdot s^{-1}$.

Les résultats concernant la hauteur de suspension H_L , non présentés ici, suivent la même tendance que ceux concernant la hauteur d'attachement H_a . À partir de la suspension, H_L augmente avec U_{CH_4} mais diminue avec l'augmentation de T_{air} , en accord avec les résultats de Kim et al. [4].

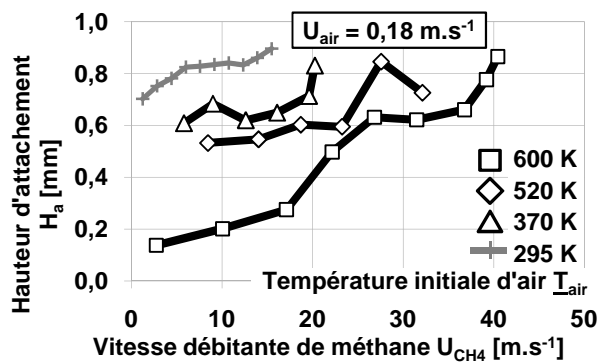


Figure 9 : Hauteur d'attachement H_a en fonction de la vitesse de méthane U_{CH_4} pour différentes températures initiales T_{air} ; $U_{air} = 0,18 \text{ m.s}^{-1}$

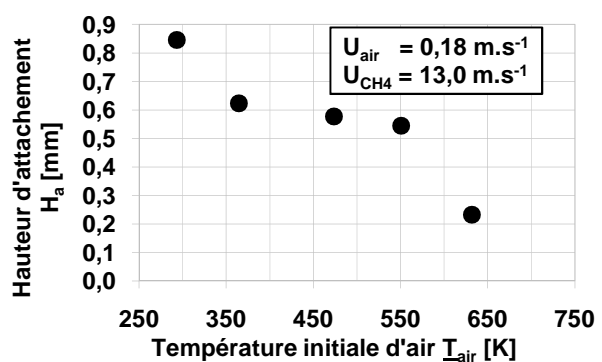


Figure 10 : Hauteur d'attachement H_a en fonction de la température initiale T_{air} ; $U_{air} = 0,18 \text{ m.s}^{-1}$; $U_{CH_4} = 13,0 \text{ m.s}^{-1}$

4. Conclusion

L'influence du préchauffage des réactants sur la stabilisation d'une flamme-jet méthane/air a été étudiée expérimentalement. La stabilité de la flamme est globalement accrue avec l'augmentation de la température initiale, comme en témoigne l'évolution des grandeurs macroscopiques de la flamme : diminution des hauteurs de stabilisation (attachement et suspension) et augmentation des vitesses critiques (vitesses de suspension et de rattachement). Le rôle clé de la vitesse $S_{L|st}$ dans la stabilisation d'une telle flamme est confirmé par l'évolution en puissance similaire de la vitesse $S_{L|st}$ et des vitesses critiques avec l'augmentation de température initiale.

Références

- [1] C. Lawn, Lifted flames on fuel jets in co-flowing air, *Prog. Energy Combust.*, 35-1 (2009), 1-30
- [2] T. Takeno et Y. Kotani, An experimental study on the stability of jet diffusion flame, *Acta Astronaut.*, 2-11/12 (1975), 999-1008
- [3] E. Oldenhof, M. Tummers, E. van Veen, et D. Roekaerts, Ignition kernel formation and lift-off behaviour of jet-in-hot-coflow flames, *Combust. Flame*, 157-6 (2010), 1667-117
- [4] K. N. Kim, S. H. Won et S. H. Chung, Characteristics of turbulent lifted flames in coflow jets with initial temperature variation, *P. Combust. Inst.*, 31-1 (2007), 1591-159
- [5] D. P. Mishra, Effects of initial temperature on the structure of laminar CH₄-air premixed flames, *Fuel*, 82-12 (2003), 1471-1475
- [6] S. Lamige, J. Min, C. Galizzi, J. Perles, F. André, F. Baillot et D. Escudié, Effect of reactant preheating on the stability of non-premixed methane-air flames, *14th Int. Heat Transf. Conf.* (Washington, États-Unis, 8-13 août 2010), IHTC14-22938
- [7] J. Min, F. Baillot, A. Wyzgolik, E. Domingues, M. Talbaut, B. Patte-Rouland et C. Galizzi, Impact of CO₂/N₂/Ar addition on the internal structure and stability of nonpremixed CH₄/air flames at lifting, *Combust. Sci. Technol.*, 182-11/12 (2010), 1782-1804

Remerciements

Cette étude a été menée dans le cadre du programme « STREAM » (ANR-06-BLAN-0255) financé par l'Agence Nationale de la Recherche, en collaboration avec le CORIA (UMR 6614) et le laboratoire EM2C (UPR 288). Les auteurs tiennent plus particulièrement à remercier Jiasheng Min et Françoise Baillot pour leurs contributions à ce travail.