

Comportement d'une combustion en air enrichi en oxygène dans un brûleur à contre-courants

J-M. Most^{1*}, S. Dahikar¹, D. Damien¹, A. Claverie¹, L. Pillier² et S. de Persis²

¹Institut Pprime, CNRS, ISAE-ENSMA, Université de Poitiers, 1 avenue Clément Ader
86961 Futuroscope Cedex

² ICARE CNRS, 1C Av de la recherche Scientifique, 45071 Orléans Cedex 2

1. Contexte

Le changement climatique n'est plus une vision, mais la réalité. Au cours du 20^{ème} siècle, la température de la planète a augmenté globalement de 0,74°C par rapport au niveau de la période pré-industrielle alors que le niveau des mers s'est élevé de 17cm comme conséquence de l'expansion thermique des océans et de la fonte des glaciers. Cette modification du climat induit de fréquentes et sévères inondations, sécheresses et vagues de chaleur. Sans modification des politiques gouvernementales, l'augmentation de la dépendance en combustibles fossiles conduira à un rapide accroissement de la concentration en gaz à effet de serre dans l'atmosphère aux environs de 1000ppm équivalent CO₂, l'augmentation de température de la planète atteindrait alors 6°C. Pour inverser cette tendance et limiter la montée de température à 2°C, l'emploi des énergies décarbonées doit être privilégié pour que cette concentration en gaz à effet de serre dans l'atmosphère ne dépasse pas le seuil de 450ppm équivalent CO₂. Dans ce scénario 450, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables offrent les meilleurs atouts mais exigent une réduction des émissions de CO₂ dans les secteurs des transports, de l'industrie, et du bâtiment. Le déploiement de grosses unités de production d'énergie (turbines à gaz, fours ou chaudières à charbon ou fuels lourds) à zéro émission gazeuse, liquide et solide pourrait réduire de 80 à 90% les rejets de CO₂ dans l'atmosphère si ces usines se dotaient de systèmes de Capture et de Stockage du CO₂ (CCS). Ce procédé, qui consiste à stocker le CO₂ pendant des centaines d'années, exige que le CO₂ soit capté dans les effluents, compressé dans des conditions supercritiques, transporté jusqu'au site de stockage et enfin stocké. Malheureusement, ce procédé augmente de 25% à 40% le coût énergétique, dû principalement à la capture. Parmi les techniques CCS, on note la capture en post-combustion (coût élevé pour la séparation du mélange CO₂/N₂ dans les fumées), l'oxy-combustion (coût réduit de capture car les fumées contiennent principalement du CO₂, mais coût important pour la production d'oxygène par cryogénie), et enfin la capture en pré-combustion (capture du carbone avant combustion et combustion de l'hydrogène). Parmi ces procédés, c'est la capture en post-combustion qui nécessite le plus faible investissement par une mise à jour des unités actuelles.

2. Objectifs de l'étude

Ce travail a pour objectif de contribuer à l'évaluation d'un procédé innovant capable de réduire significativement le coût du captage du CO₂ en post combustion dans un système (CCS). Il est basé sur une séparation du mélange CO₂/N₂/O₂ contenu dans les fumées au moyen de membranes. Mais, pour qu'un tel procédé soit énergétiquement et économiquement compétitif vis à vis d'un système classique avec séparation par des amines, la concentration en CO₂ dans les produits de combustion doit être supérieure à 30% à comparer aux 7 à 10% pour une combustion classique à l'air. Pour cela la concentration en oxygène dans les réactifs doit être supérieure à celle dans l'air. Deux contraintes se manifestent, la température des produits de combustion doit rester compatible avec la tenue thermique de la chambre ou des aubes de turbine, et les rejets en polluants (CO et NOx) doivent satisfaire à la régulation. Aussi, les réactifs sont dilués dans le CO₂ provenant de la recirculation d'une

partie des fumées. La combustion s'effectuera alors en air synthétique $O_2/N_2/CO_2$ enrichi en oxygène, $X_{O_2} > 0,21$ où X_{O_2} est la fraction volumique d'oxygène dans l'air synthétique.

Mais, le remplacement de l'azote par du CO_2 modifie le comportement de la flamme [1], [2], [3]. Il est observé que la recirculation des fumées et la température des réactifs jouent un rôle significatif, non seulement sur les mécanismes de stabilisation de la flamme, mais aussi sur la modification du régime de combustion [4], [5], [6], [7]. Par exemple, des études montrent qu'il est nécessaire d'accroître la fraction d'oxygène pour conserver une efficacité thermodynamique comparable à l'air. Mais alors, les concentrations en oxygène et combustible diluées dans du CO_2 peuvent modifier la structure de la flamme et en voie de conséquence, la formation en suies. Ce présent travail se focalisera sur la caractérisation de la combustion en air enrichi en oxygène et diluée dans du CO_2 afin d'identifier les phénomènes responsables de changement de comportement de la combustion.

Le comportement de la combustion en air synthétique est étudié dans une configuration simplifiée de flamme de diffusion laminaire avec un brûleur à contre-courants. L'influence de CO_2 sur la combustion est caractérisée pour différentes fractions volumiques de CO_2 normées $X^* = [X_{CO_2} / (X_{CO_2} + X_{N_2})]$ pour une flamme de diffusion méthane/air synthétique enrichie en oxygène.

Le second objectif de cette communication est de décrire la métrologie employée pour caractériser la combustion du méthane avec de l'air synthétique $O_2/N_2/CO_2$. Les variations des propriétés thermiques, physiques et chimiques de la flamme seront corrélées aux variations de l'épaisseur δ_0 et de la position P de la flamme déterminées à partir d'un traitement d'images de Fluorescence Induite par Laser sur le radical OH (PLIF-OH). Les résultats de la mesure des caractéristiques de la flamme seront comparés à des simulations numériques afin de vérifier la validité du schéma cinétique dans ces conditions de combustion en air synthétique enrichi en oxygène.

3. Dispositif expérimental

3.1. Le brûleur à contre-courants

Le schéma de la figure 1 présente le brûleur à contre-courants utilisé pour cette étude. Il comprend deux injecteurs symétriques verticaux et opposés: l'écoulement combustible ($CH_4/N_2/CO_2$) est injecté par le brûleur supérieur, l'oxydant ($O_2/N_2/CO_2$) par le brûleur inférieur, les écoulements sont préchauffés électriquement de la température ambiante jusqu'à 750K, simulant la température de sortie d'un compresseur. La distance de séparation H entre les deux injecteurs est de 0,032m et leur diamètre interne D est 0,035m. Une grille en nid d'abeilles est placée à 0,025m en amont de l'injecteur pour assurer l'uniformité aérodynamique des flux opposés. Un écoulement coaxial d'azote (N_2) forme un rideau gazeux qui isole le combustible de l'air ambiant.

Le débit massique de l'écoulement gazeux Q_c et la puissance thermique P_{th} sont fixés respectivement à $4,82 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ et 6,1kW. La vitesse moyenne d'injection de chacun des gaz réactifs u_h suit la loi linéaire: $u_h = [(u_c/T_c) \times T_{pr}] \text{ m/s}$, u_c étant la vitesse de l'écoulement à froid fixée à $u_c = 0,5 \text{ m/s}$, T_c la température ambiante (298 K) et T_{pr} la température de préchauffage (298-750K). Tous les paramètres n'étant pas indépendants, T_{pr} influence les propriétés physiques des fluides ainsi que la force de cisaillement σ . Le rapport d'équivalence global ϕ est conservé lors de cette étude ($\phi = 3$) qui correspond à une combustion globalement riche (condition standard utilisée pour stabiliser une flamme à contre-courants). La composition des diluants, mélange N_2 / CO_2 , est représentée par la variable $X^* = [X_{CO_2} / (X_{CO_2} + X_{N_2})]$; cette dernière varie de 0 à 1, elle est conservée dans les flux oxydant et combustible. La fraction volumique de O_2 dans le flux oxydant, X_{O_2} , varie entre 0,21 et 0,35. Des thermocouples et des débitmètres massiques contrôlent et mesurent les conditions expérimentales.

Les paramètres de l'étude sont la température de préchauffage T_{pr} , les fractions volumiques d'oxygène X_{O_2} , de CO_2 X_{CO_2} . Dans ce travail le rapport d'équivalence global ϕ , la distance H et le cisaillement σ_0 sont conservés constants respectivement à 3, 0,032m et $15,62 \text{ s}^{-1}$ (condition à température ambiante).

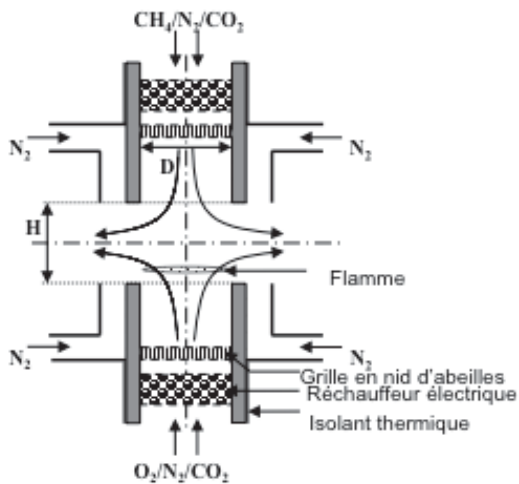


Figure 1. Dispositif expérimental

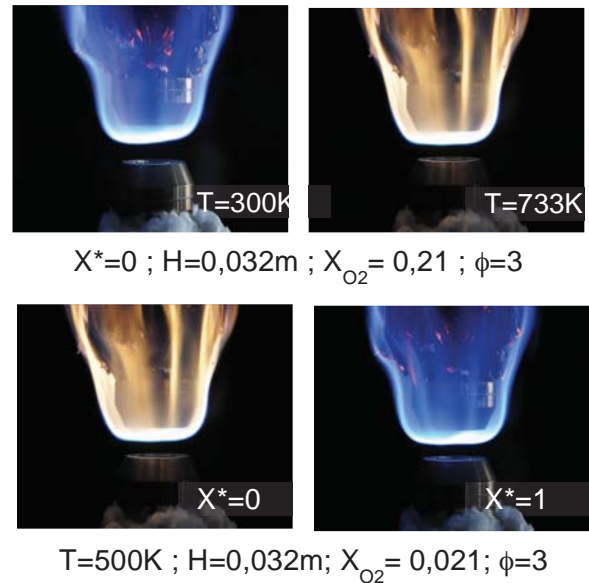


Figure 2 : Clichés de la flamme

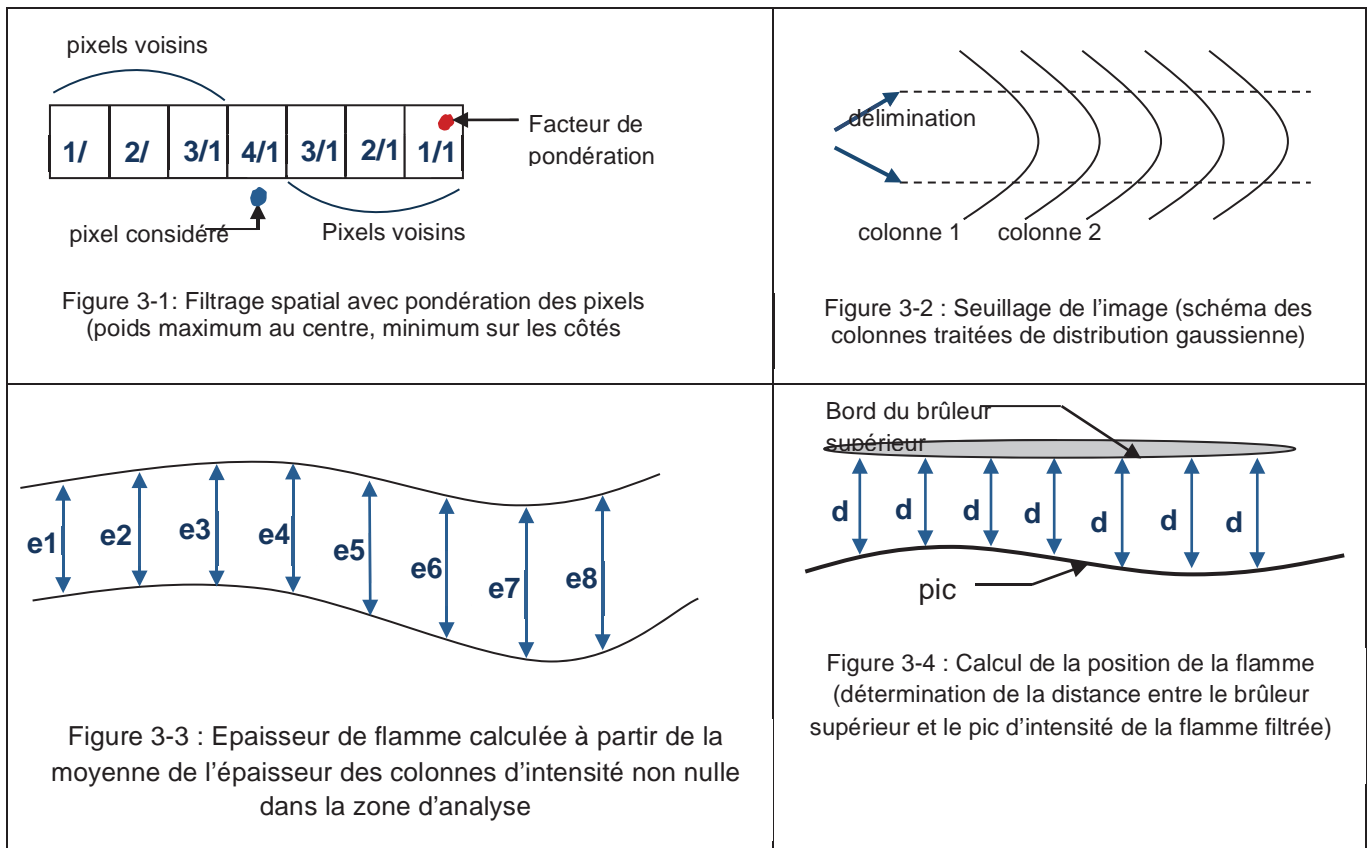
3.2. Méthodes de diagnostic

Dans ce travail, on supposera que l'épaisseur de flamme δ_0 et sa position P (distance du brûleur supérieur) sont représentatives du comportement de la flamme car liées aux phénomènes de transport, thermiques, chimiques et physiques impliqués dans cette combustion en air synthétique. Une chaîne de Fluorescence Induite par Laser sur le radical OH (PLIF-OH) est utilisée pour caractériser la combustion. Les grandeurs δ_0 et P de la zone réactive sont déterminées par traitement d'images à partir de la distribution du signal d'émission induite de OH le long de l'axe des brûleurs. L'absorption du signal de PLIF-OH par la molécule de CO_2 (*quenching*) n'est pas prise en considération, il est supposé négligeable étant donné le petit volume de la flamme.

Pour exciter les raies d'absorption du radical OH, un laser Nd: YAG doublé à 532nm (Continuum Surelite III) est utilisé pour pomper un laser à colorant accordable (Continuum ND6000). La longueur d'onde du faisceau est ajustée à 282,910nm pour exciter la transition Q1(6) de la bande spectrale A-X(1-0) du radical OH. Le faisceau est étiré optiquement suivant un plan vertical, le plan lumineux de lumière ainsi formé traverse le plan central des brûleurs. Une caméra ICCD (PI-MAX2, Princeton Instruments) équipée d'un objectif UV en quartz (Cercos 2017 UV-VIS-NIR, 45mm, f/1,8) est employée pour détecter le signal de fluorescence 2D des radicaux OH excités. Un assemblage de filtres Schott UG11 et WG305 est positionné devant la caméra pour collecter la fluorescence associée et éviter la détection de l'émission spontanée de la flamme ainsi que des lumières diffractées parasites. Les images sont collectées dans la direction orthogonale au plan laser sur une matrice de 581x591 pixels². La résolution spatiale est de 133µm par pixel. Afin de fournir une statistique suffisante des intensités de signal pour l'analyse, un minimum de 200 tirs laser est acquis pour chacune des conditions de flamme.

Le traitement d'images est effectué au moyen de la plateforme SLIP développée au laboratoire. Il consiste à calibrer la position des sorties des brûleurs, à délimiter la zone d'émission des OH afin de réduire le temps de traitement, de filtrer spatialement l'image (figures 3-1 à 3-4), de centrer le signal pour éliminer le bruit sur ses bords tout en réduisant le temps de calcul, d'identifier le maximum d'intensité du signal de fluorescence de OH, de définir un seuil au signal avant d'extraire l'épaisseur de la zone d'émission des OH. Le seuil est déterminé à partir de la méthode des moindres carrés pour ajuster le profil d'émission expérimental de OH à une distribution gaussienne. Enfin, l'épaisseur de la zone réactive est alors déterminée à partir de la largeur de la distribution normale au niveau du point d'inflexion. Le filtrage spatial du signal PLIF-OH a permis d'accroître la précision sur la distribution

axiale de l'intensité du signal de fluorescence en s'affranchissant de mouvements de la flamme parfois rencontrés.



4. Modélisation numérique

La flamme de diffusion est modélisée à l'aide du logiciel OPPDIF [8] de CHEMKIN [9], [10] utilisant le mécanisme cinétique détaillé GRI-3.0 [11] et celui de San Diego [12]. Le modèle prend en compte les phénomènes de transport mais ne considère pas les transferts radiatifs. Les épaisseurs de la zone réactive (émission de OH) sont calculées à partir de la largeur du pic au maximum de température ou de concentration de OH [9], [13] avant d'être comparées aux relevés expérimentaux.

5. Résultats et discussion

5.1. Etude de flammabilité

La première étape de l'étude a consisté à déterminer les limites d'extinction de la combustion en fonction des paramètres de fonctionnement. Les résultats montrent que l'augmentation de la température de préchauffage T_{pr} ou/et de X_{O_2} élargit les limites d'extinction sur tout le domaine d'étude et rend la combustion plus stable. A l'inverse, l'augmentation de X^* les réduit et peut mener à l'extinction. En conséquence, on peut contrebalancer des conditions de combustion dégradées par le remplacement de N_2 par du CO_2 , par une augmentation de la concentration en oxygène X_{O_2} ou de la température de préchauffage (paramètre dépendant de la température de sortie de compresseur).

5.2. Couleur de la flamme

La figure 2 montre que la zone de réaction bleue (rayonnement des radicaux CH^*) prend une teinte jaune (formation croissante de suies) quand T_{pr} ou X_{O_2} augmentent et X^* diminue. Ce résultat qualitatif confirme que lorsque CO_2 est ajouté aux réactifs, la luminosité de la flamme diminue avant d'atteindre l'extinction.

5.3. Epaisseur de flamme (δ_0)

Comme indiqué précédemment, l'épaisseur de la zone d'émission du radical OH est supposée être corrélée à l'épaisseur de la zone de réaction δ_0 , représentative du comportement de la combustion. Les figures 5 et 6 représentent respectivement les variations de δ_0 avec T_{pr} et X_{O_2} pour différentes valeurs du taux de dilution X^* . Une augmentation de δ_0 est observée à la fois avec T_{pr} ou X_{O_2} et un comportement inverse avec X^* . Le premier effet ($\delta_0 \uparrow$ quand $T_{pr} \uparrow$ ou/et $X_{O_2} \uparrow$), pour X^* donnée, peut être interprété par i) un dégagement de chaleur plus important dans la zone réactive qui augmente la température maximum dans la flamme et ii) un coefficient de transfert moléculaire $D_{T,mix}$ plus grand, induisant un élargissement des distributions quasi-gaussiennes de la température, des espèces chimiques et des radicaux dans la zone de diffusion (Figure 7).

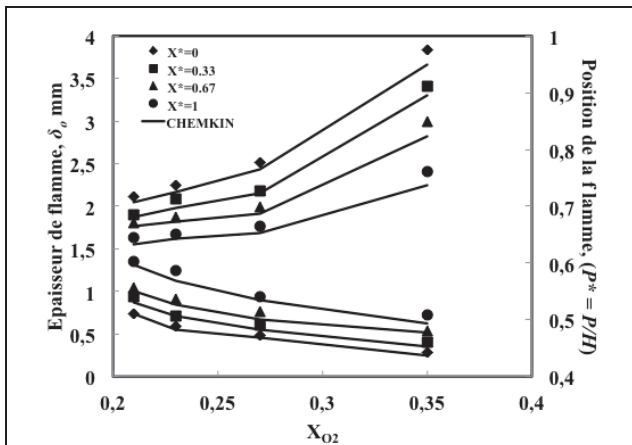


Figure 5. Epaisseur de la zone réactive δ_0 (mm) et position de la flamme en fonction de X^* pour différentes valeurs de X_{O_2} , $H=0,032m$; $T_{pr}=573 K$.

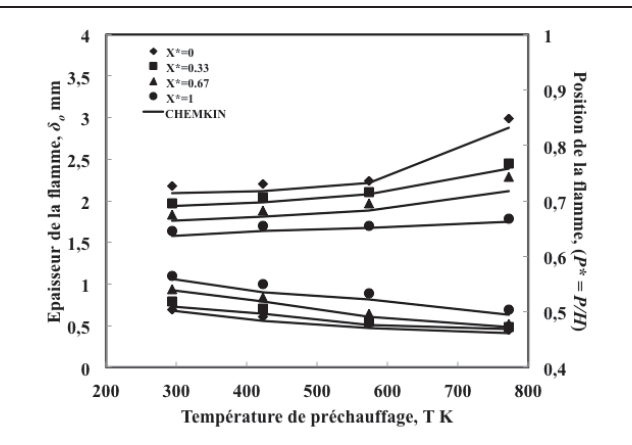


Figure 6. Epaisseur de la zone réactive δ_0 (mm) et position de la flamme en fonction de X^* pour différentes valeurs de T_{pr} , $X_{O_2}=0,21$; $H=0,032m$.

Le second effet ($\delta_0 \downarrow$ quand $X^* \uparrow$) est relié à l'effet physique de X^* qui modifie la masse volumique ρ (ρ en variant de $0,5438kg/m^3$ à $0,3388kg/m^3$ de 300 à 1000K augmente σ mais modifie peu le comportement de la combustion). L'effet thermique se manifeste au travers de la capacité calorifique $C_{p,mix}$ du mélange CO_2/N_2 dans la zone de flamme qui passe de $1,235kJ/kg \cdot K$ à $1,170kJ/kg \cdot K$, de 300 à 1000K. $C_{p,mix}$ augmente donc avec la température locale T ($C_{p,CO_2} > C_{p,N_2}$ si $T > 400K$). En conséquence, un accroissement de X^* réduit la température de flamme et induit une diminution de l'épaisseur δ_0 . L'effet chimique du CO_2 doit également être pris en compte. L'analyse de Cavaliere [14] et [2] pour une combustion sans flamme, indique que la présence du CO_2 comme diluant participe à la réaction chimique, il ne peut plus être considéré comme un gaz inerte. Il agit directement sur la réaction chimique primaire au travers de $CO + OH \rightleftharpoons CO_2 + H$. Ainsi, une compétition du CO_2 pour le radical H dans la précédente réaction inverse avec la réaction de branchement de chaîne $H + O_2 \rightleftharpoons O + OH$ réduit significativement les concentrations des radicaux principaux O, H, et OH conduisant à une diminution notable de la vitesse de combustion du combustible. Les résultats expérimentaux confirment cette interprétation. Cet effet peut être contrebalancé par une augmentation soit de T_{pr} ou X_{O_2} et révèle que, dans un procédé de combustion diluée, où coexiste dilution et préchauffage, le taux de réaction est contrôlé par ces deux paramètres à la fois. Ceci est en accord avec les résultats de la littérature [15], [16] et [17], dans lesquels les réactifs sont fortement préchauffés ce qui augmente la diffusion des espèces. Les phénomènes de transport devraient être également considérés, mais ils semblent marginaux sur le comportement global.

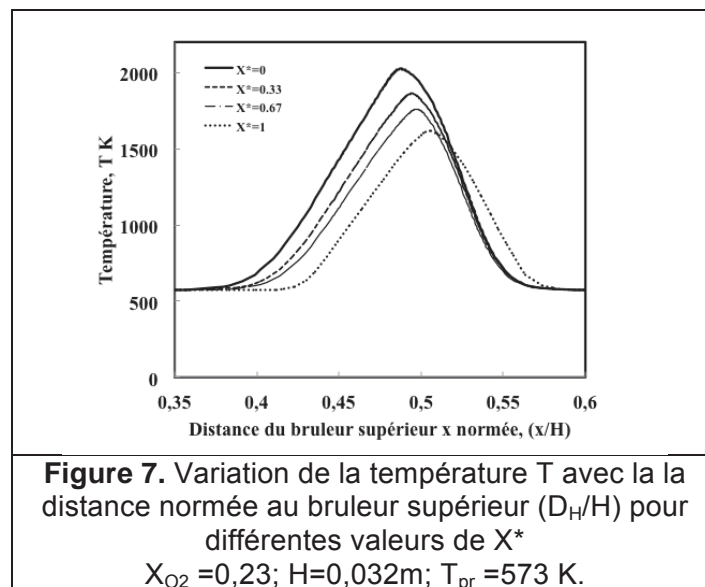
Les figures 5 et 6 reportent à la fois l'épaisseur de la zone réactive δ_0 obtenue expérimentalement (PLIF-OH) et numériquement par CHEMKIN II utilisant le schéma cinétique GRI 3.0. Un bon accord est observé entre les mesures et le calcul. En conséquence, on peut conclure que le comportement

de la combustion du CH_4 dans l'air pur, en air enrichi en O_2 , ou encore avec de l'air synthétique en remplaçant le N_2 par du CO_2 sont bien reproduits et simulés au moyen d'un schéma cinétique standard dans une configuration de brûleurs à contre-courants. Des résultats similaires à ceux des figures 5 et 6 ont été obtenus pour d'autres valeurs des paramètres de fonctionnement (richesse, écartement des brûleurs).

Le comportement de la combustion du CH_4 en air enrichi en oxygène avec recirculation des fumées montre que la réactivité chimique est réduite lorsque l'on dilue les réactifs par du CO_2 . Cet effet est attribué à la fois à des effets physiques, thermiques (augmentation de la capacité calorifique $C_{p_{\text{mix}}}$ du mélange) et chimiques (modification de l'écoulement, compétition entre les réactions qui agissent sur la température de flamme). Cette tendance peut être contrebalancée par un accroissement de la température de préchauffage T_{pr} ou/et de la concentration en oxygène X_{O_2} . On peut ainsi, en agissant sur la fraction volumique de O_2 re-stabiliser une combustion dégradée par une dilution des réactifs par des gaz de recirculation (principalement du CO_2).

5.4. Position (P) de la flamme

La position adimensionnelle de la flamme $P^*=P/H$ est définie par la distance de la flamme P au brûleur supérieur (côté combustible) normée par l'écartement H des brûleurs. Ceci traduit le comportement de la flamme vis à vis du point d'arrêt des écoulements à contre-courants avec des conditions expérimentales identiques aux précédentes. La variation de P^* est également reportée sur les figures 5 et 6 qui montrent l'influence sur P^* de X_{O_2} et T_{pr} pour différentes valeurs de X^* . Les résultats reportent un décalage de P^* vers le côté pauvre (oxydant) de l'écoulement à contre-courants avec un accroissement de X^* et une tendance inverse avec T_{pr} et X_{O_2} . On peut conclure que la flamme se décale naturellement vers le côté oxydant pour optimiser son efficacité énergétique et sa cinétique. Ces résultats expérimentaux sont en accord avec les simulations numériques également reportées sur les figures 5 et 6.



La figure 7 montre l'influence du taux de dilution en CO_2 sur la distribution de température entre les brûleurs. Ce résultat numérique confirme la décroissance de la température maximale dans la flamme et son glissement vers le côté oxydant lorsque l'on augmente X^* (proportionnel à X_{CO_2}).

5.5. Extrapolation des résultats au cas pratique d'une configuration industrielle

Ces résultats d'expériences, confirmés par des calculs numériques, contribuent à mieux comprendre l'effet de la recirculation des fumées vers les réactifs afin d'optimiser les brûleurs industriels dans un procédé CCS. L'augmentation du taux de recirculation, quantifiée dans ce travail par X^* , modifie

fortement le comportement de la combustion, il réduit les limites de flammabilité de la flamme, la température de la flamme (donc la formation des NO_x thermiques), le volume de la zone réactive et modifie la position de cette dernière. Il agit donc sur la réactivité chimique de la combustion par des effets thermiques, physiques et chimiques. L'industriel pourra contrebalancer cet effet néfaste de X* par un enrichissement de l'air en O₂ et retrouver des conditions de stabilité maîtrisée lors d'une combustion à l'air.

6. Conclusion

La combustion du méthane en air synthétique enrichi en oxygène a été étudiée à l'aide d'un brûleur à contre-courants. La technique de PLIF-OH a été employée pour analyser le comportement de la flamme et quantifier les effets opposés d'un enrichissement des réactifs en O₂ et CO₂. Un traitement d'images original a été développé à l'aide du logiciel SLIP pour déterminer précisément l'épaisseur et la position d'une flamme entre les brûleurs, grandeurs supposées représentatives de cette combustion diluée. Les effets de la dilution des réactifs (CH₄/O₂) par du CO₂ ont été caractérisés par la grandeur $X^* = [X_{CO_2} / (X_{CO_2} + X_{N_2})]$ sur le comportement de la combustion diluée pour différentes températures de préchauffage T_{pr} , compositions des réactifs (X_{CH_4} , X_{O_2}) ou du taux de dilution dans un brûleur à contre-courants. Les résultats expérimentaux obtenus, en accord avec des simulations numériques, montrent que la recirculation d'une partie du CO₂ ($X^* \uparrow$) contenue dans les fumées :

- accroît la concentration de ce dernier ce qui réduit effectivement le coût de sa capture en post-combustion ;
- réduit la réactivité de la combustion ce qui augmente la concentration en CO des rejets et réduit le domaine de flammabilité de la combustion;
- diminue la température de flamme induisant une réduction des rejets des NO_x thermiques ;
- amincit la zone réactive et déplace la flamme du côté oxydant dans une configuration de brûleurs à contre-courants ;
- L'effet de la dilution par du CO₂ est supérieur à celle par du N₂, cette influence étant liée à des effets chimiques, thermiques et physiques du CO₂.

Ces effets du CO₂ néfastes à la stabilité de la combustion peuvent être dans tous les cas annihilés par un accroissement de la concentration en oxygène dans l'air synthétique composé de O₂/N₂/CO₂. Un résultat similaire peut être obtenu en augmentant la température d'injection des réactifs. Ainsi, tout en augmentant la concentration en CO₂ des fumées pour y adapter à moindre coût une unité existante en procédé CCS, ce procédé permet de stabiliser une combustion dans des conditions proches de celles avec de l'air.

Avant un déploiement industriel, il faudra optimiser le système énergétiquement (bilan des coûts énergétiques pour la production d'air enrichi en oxygène et de capture par membranes) et d'une manière environnemental en restant dans les normes de rejets en CO et NO_x.

Dans cette étude, il a été montré l'aptitude de la technique de PLIF-OH pour caractériser une combustion en air synthétique avec des brûleurs à contre-courants. Le traitement d'images développé a permis de s'affranchir des mouvements de la flamme et de fournir les propriétés de la flamme de diffusion (épaisseur et position). Il a ainsi été possible d'accéder aux modifications du comportement de la flamme lors de l'ajout de CO₂ dans les réactifs et de vérifier la validation du schéma cinétique GRI3.0 dans un nouveau régime de combustion.

Enfin, cette étude a contribué à la prédiction du taux d'enrichissement en oxygène nécessaire pour adapter une chambre de combustion à un système innovant de combustion enrichie en oxygène couplé à du procédé CCS.

7. Remerciements

Ce travail a été financé par le programme Energie (PIE2) du CNRS qui en est remercié.

Références bibliographiques

- [1] Park, J., Kim, S-G., Lee, K-M and Kim, T. K. (2002) Chemical effect of diluents on flame structure and NO emission characteristic in methane–air counterflow diffusion flame. *Int. J. Energy Res.*, **26**, 1141.
- [2] Liu, F., Guo, H., and Smallwood, G. (2003) The chemical effect of CO₂ replacement of N₂ in air on the burning velocity of CH₄ and H₂ premixed flames. *Combust. Flame*, **133**, 495.
- [3] Betbeder-rey, E., Fiorina, B. Gicquel, O., Moréac, G., Darabiha, N. (2007) Chemical effects of diluents on hydrocarbon emissions in counterflow diffusion flames. *Proc. Euro. Combust. Meet.*
- [4] Som, S., Ramí´rez, A.I., Hagerdorn, J. Saveliev, A. Aggarwal, S.K. (2008) A numerical and experimental study of counterflow syngas flames at different pressures. *Fuel*, **87**, 319.
- [5] Liu Y., Most, J.M. (2009) Effects of diluents on the behavior of the diluted combustion regime. *Proc. Euro. Combust. Meet.*
- [6] Min, J., Baillot, F., Wyzgolik, A., Domingues, E., Talbaut, M., Patte-Rouland, B., Galizzi, C. (2009) Experimental study of nonpremixed CH₄/air flames: Effect of CO₂ addition and reactant preheating. *Proc. Euro. Combust. Meet.*
- [7] Mazas, A. N., Lacoste, D. A. and Schuller, T. (2010) experimental and numerical investigation on the laminar flame speed of CH₄/O₂ mixtures dilution with CO₂ and H₂O. *Proc ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea and Air.*
- [8] Kee, R.J., Rupley, F.M., Miller, J.A., Coltrin, M.E., Grcar, J.F., Meeks, E., Moffat, H.K., Lutz, A.E., Dixon-Lewis, G., Smooke, M.D., Warnatz, J., Evans, G.H., Larson, R.S., Mitchell, R.E., Petzold, L.R., Reynolds, W.C.,
- [9] Sung, C. J., Liu, J. B. and Law, C. K. (1995) Structural response of counterflow diffusion flames to strain rate variations. *Combust. Flame*, **102**, 481.
- [10] Cheng, Z., Wehrmeyer, J., and Pitz, R. (2006) experimental and numerical studies of opposed jet oxygen-enhanced methane diffusion flames. *Combust. Sci. and Tech.*, **178**, 2145.
- [11] Smith, G.P., Golden, D.M., Frenklach, M., Moriarty, N.W., Eiteneer, B., Goldenberg, M., Bowman, C.T., Hanson, R.K., Song, S., Gardiner, Jr., W.C., Lissianski, V.V., and Qin, Z. (1999) http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/
- [12] Williams, F.A. (2003) San Diego Mechanism <http://maeweb.ucsd.edu/combustion/cermechi> (2003=08=30).
- [13] Wehrmeyer, J.A., Yeralan, S., and Tecu, K. (1996) Influence of strain rate and fuel dilution on laminar nonpremixed hydrogen-air flame structure: An experimental investigation. *Combust. Flame*, **107**, 125.
- [14] Cavaliere, A., de Joannon, M. (2004) MILD combustion. *Prog. Energy Combust. Sci.* **30**, 329.
- [15] Ishiguro, T., Tsuge, S., Furuhashi, T., Kitigawa, K., Aral, N., Hasegawa, T., Tanaka, R., Gupta, A.K. (1998) Homogenization and stabilization during combustion of hydrocarbons with preheated air. *Proc. Combust. Instit.*, **27**, 3205.
- [16] Gupta, A.K., Bolz, S. Hasegawa, T. (1999) Effect of air preheat temperature and oxygen concentration on flame structure and emissions. *ASME J. Energy Resour. Technol.*, **121**, 20.
- [17] Lille, S., Dobski, T., Blasiak, W. (2000) Visualisation of fuel jet in conditions of highly preheated air combustion, *AIAA J. of Propulsion and Pow.*, **16**, 595.