

OFFRE DE THÈSE

HYCOP (HYdrogen COmbustion for industrial Plants)

Intitulé du sujet : Etude de la combustion partiellement prémélangée turbulente hydrogène-air avec forte mise en rotation de l'air de combustion (écoulement "swirlé") et recirculation derrière un accroche-flamme ("bluff-body").

Mots clés : Combustion, Hydrogène, Fours industriels, Diagnostics optiques

Directeur de thèse : Bruno RENO (Prof. INSA Rouen Normandie, CORIA)

Co-directeur de thèse : Gilles CABOT (Prof. Université Rouen Normandie, CORIA)

Co-encadrant : Lucio TADDEO (Research Engineer, CETIAT)

Co-encadrant : François DURIER (Senior Research Engineer, CETIAT)

Expérience et formation souhaitées du candidat:

- Ingénieur et/ou master en énergie, avec formation en combustion, propulsion
- Expérience en combustion expérimentale, diagnostics optiques, et calcul scientifique.

Type de contrat : CDD CETIAT (3 ans)

Salaire : 23,7 k€ brut annuel

Date envisagée de début de la thèse : septembre - octobre 2022

Lieu de travail : CORIA (Rouen) avec des séjours au CETIAT (Lyon)

Pour être candidat :

<https://www.talentdetection.com/cetiat/offre-13064-3f8Te5>

Résumé : Ce projet concerne l'étude expérimentale et numérique d'une flamme H₂/air partiellement prémélangée, stabilisée par un écoulement swirlé et recirculation derrière un accroche-flamme (bluff-body). La qualité du mélange H₂/air est étudiée de manière détaillée par des techniques de fluorescence sur traceur, et son impact sur la structure et la stabilité de la flamme, les statistiques des champs aérodynamiques et la formation de NO est évaluée par l'utilisation de diagnostics optiques 2D couplés : PIV, OH-PLIF et NO-PLIF. Cette étude paramétrique sur ce système d'injection d'hydrogène servira de base au dimensionnement d'un démonstrateur de brûleur H₂/air pour des applications industrielles développé par le CETIAT dans le cadre de ce programme de recherche.

Description détaillée du sujet :

Contexte et enjeux

Dans le contexte de la transition énergétique, la France s'est fixée des objectifs très contraignants en matière de développement des énergies renouvelables, de réduction des émissions de gaz à effet de serre et de polluants, et de réduction des consommations

d'énergies fossiles. Dans ce cadre, l'hydrogène utilisé comme vecteur énergétique représente un enjeu scientifique, environnemental et économique majeur. Même si l'absence d'un réseau de transport et distribution comparable à celui de gaz naturel ne permet pas l'utilisation d'hydrogène pur dans le bâtiment à court terme, son déploiement dans l'industrie, fabriqué directement sur place ou distribué par un réseau dédié, devrait être bien plus rapide.

Alors que de nombreuses études et démonstrations ont été réalisées pour vérifier l'impact de l'injection d'hydrogène dans les réseaux gaziers sur les infrastructures de transport et le fonctionnement et la sécurité des appareils (avec une teneur de H₂ jusqu'à 20-30%), l'utilisation dans les appareils à combustion n'a fait l'objet que de quelques projets, soit pour analyser le potentiel de développement d'une filière hydrogène-énergie, soit pour traiter des défis techniques à surmonter pour le développement d'appareils à combustion dans lesquels le gaz naturel serait remplacé par de l'hydrogène dans les secteurs résidentiel et tertiaire (chauffage, production d'eau chaude sanitaire) et dans l'industrie (en particulier pour les procédés dans lesquels l'utilisation d'électricité n'est pas envisageable).

Les appareils à combustion fonctionnant à l'hydrogène (chaudières, brûleurs) et les équipements associés (dispositifs d'allumage et détection de la flamme, joints, etc.) devront respecter les mêmes exigences de sécurité ainsi que les mêmes seuils de performances énergétiques et d'émissions de polluants que ceux fixés par les règlements applicables aux appareils alimentés avec du gaz naturel. La maîtrise de la combustion de l'hydrogène présentant pour des raisons physico-chimiques (vitesse élevée et stabilité réduite de la flamme, haute température de combustion, faible énergie minimale d'inflammation, etc.) des difficultés supplémentaires par rapport à celle du gaz naturel, des études s'avèrent nécessaires pour mieux comprendre les défis à relever et les solutions à envisager pour la conception d'une nouvelle classe d'appareils qui utilisent ce gaz.

Pour fournir aux fabricants d'appareils à combustion des éléments les aidant à vaincre les principaux obstacles techniques pour le développement de brûleurs utilisant de l'hydrogène pur, le CETIAT a mis en place un programme de recherche collaboratif avec les laboratoires CETHIL (Lyon) et CORIA (Rouen), avec la contribution de l'IFPEN, qui se traduira par 2 thèses. La première concerne le développement de connaissance pour le design de brûleur de chaudière H₂/air pour des applications dans le bâtiment. Elle sera encadrée par le CETHIL, avec la contribution de l'IFPEN pour la modélisation. La seconde – objet de la présente offre – concerne le développement de connaissance pour le design de brûleurs H₂/air pour des applications dans l'industrie. Elle sera encadrée par le CORIA, avec la contribution de l'IFPEN pour la modélisation, et fait l'objet d'une description détaillée ci-dessous.

Objectifs et résultats attendus.

L'étude a pour objectif d'évaluer l'impact de la qualité du mélange hydrogène-air dans un brûleur swirlé avec bluff-body avec géométrie d'injection modifiable, sur l'accrochage, la structure et la stabilité de la flamme, ainsi que sur la formation des polluants. Elle devra permettre également de montrer la faisabilité et l'efficacité de certaines solutions innovantes difficilement applicables aux brûleurs domestiques, mais adaptées aux process industriels, comme l'injection de vapeur d'eau dans l'air de combustion. Il s'agit d'un travail

principalement expérimental qui sera mené au laboratoire CORIA, avec une contribution numérique menée en parallèle par le candidat avec le soutien de l'IFPEN.

Cette étude s'inscrit dans la continuité de travaux antérieurs dédiés à la combustion prémélangée H_2/CH_4 /air dans des écoulements swirlés et/ou avec bluff-body [1-3], où la principale difficulté mentionnée concerne le retour de flamme, ce qui souvent limite la quantité massique d'hydrogène substitué au méthane. Quelques études montrent la possibilité et l'intérêt de modifier les systèmes d'injection usuels pour augmenter significativement la résistance au retour de flamme [4, 5]. Pour contrôler ce retour de flamme et améliorer significativement la stabilité de la flamme, il est usuel de fonctionner en régime partiellement prémélangé ou non-prémélangé, ce qui peut avoir comme inconvénient de générer des zones de combustion localement plus chaudes et donc potentiellement d'augmenter de manière significative les émissions d'oxyde d'azote. Les mesures quantitatives de concentration NO *in situ* sont très rares dans la littérature, alors que cette information liée aux mécanismes de formation des NO_x est cruciale pour le développement de ces nouveaux brûleurs.

La configuration retenue pour cette étude est basée sur la géométrie de chambre d'injection présentée Figure 1 ci-dessous.

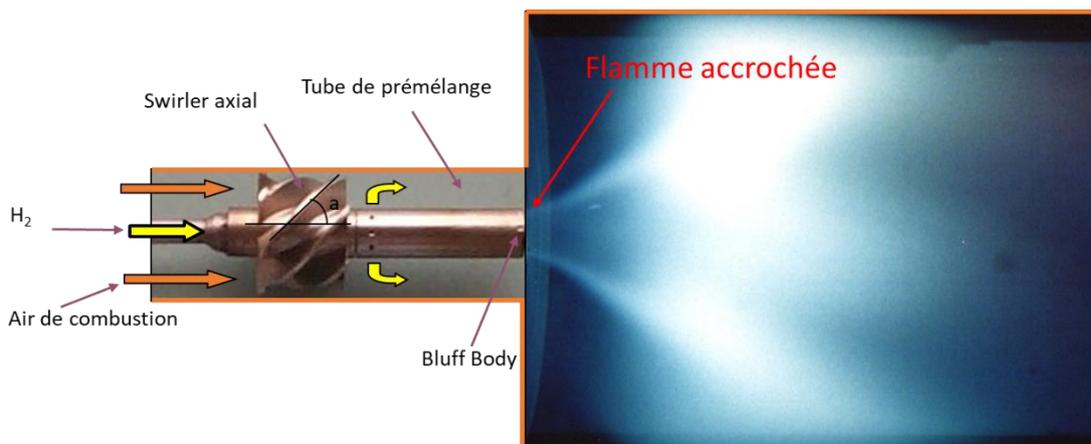


Figure 1 : Système d'injection d'hydrogène et chambre de combustion associée

Des études préliminaires ont montré le potentiel de ce brûleur, qui permet de contrôler assez finement la qualité du mélange H_2 /air injecté dans la chambre de combustion par l'intensité du swirler axial, le nombre et le diamètre des trous d'injection d' H_2 , et leur position par rapport au fond de chambre. Dans ce travail de recherche, la structure et la stabilité de la flamme, ainsi que les mécanismes de formation du NO seront étudiés expérimentalement et numériquement, en fonction de la qualité de ce mélange. Cette étude paramétrique sur ce système d'injection d'hydrogène servira de base au dimensionnement d'un démonstrateur de brûleur H_2 /air pour des applications industrielles développé par le CETIAT dans le cadre de ce programme de recherche.

Cette thèse s'articule en différents workpackages (WP).

WP 1 : Mise au point du brûleur et de ses performances

La première étape concerne le développement, la réception, les tests et la définition de la matrice des points de fonctionnement pour l'étude paramétrique, par la réalisation des diagrammes de stabilité. Le but est d'identifier le rôle des différents éléments du système d'injection et leurs impacts sur la stabilité de la flamme. Les prélèvements et l'analyse des gaz en sortie de chambre permettront d'avoir une indication sur les émissions globales.

WP 2 : Impact de la qualité du mélange de H₂ la stabilité de la flamme.

L'hydrogène est injecté dans le tube de prémélange par différents orifices suivant une configuration « jet in cross-flow » [6]. En fonction de l'intensité de cette quantité de mouvement par rapport à celle de l'écoulement d'air et de sa composante de vitesse azimutale, les phénomènes de transport (convectif et diffusif) et donc de mélange seront modifiés. Les champs de fraction de mélange (écoulement non-réactif) dans la chambre de combustion conditionneront la structure de la flamme. La technique de mesure proposée est basée sur la PLIF sur traceur. S'il est difficile de représenter précisément le comportement diffusif de l'H₂ par un traceur fluorescent ainsi que les effets de force centrifuge dans le tube de prémélange en fonction de la très faible masse volumique de H₂, il est néanmoins possible d'avoir une idée approchée du champ de mélange résultant avec un ensemencement à base de NO. En condition non-réactive, et en remplaçant l'hydrogène par un mélange N₂/NO à 300 ppm injecté dans un co-flow de N₂, les effets de quenching sont négligeables et le signal de fluorescence présente un rapport signal sur bruit particulièrement intéressant [7].

WP 3 : Caractérisation des champs aérodynamiques, des structures de flammes et des instabilités de combustion

A partir des points de fonctionnement présélectionnés, les champs aérodynamiques et les structures de flammes seront caractérisés par les métrologies couplées stéréo-PIV et OH-PLIF, en fonctionnement basse ou haute-cadence en fonction de la disponibilité des diagnostics. Les instabilités de combustion seront identifiées par chimiluminescence sur le radical OH* enregistré sur un photomultiplicateur à haute cadence. L'analyse conjointe des spectres d'énergie de OH*, de la topologie du front de flamme et des champs de vitesse permettra d'identifier l'origine et l'occurrence des phénomènes extrêmes tel que le retour de flamme et/ou les extinctions locales.

WP 4 : Mécanisme de formation de NO.

Comme mentionné précédemment, l'optimisation du fonctionnement du brûleur nécessite de quantifier les émissions polluantes. Pour cela, la méthode de NO-PLIF sera mise en place, en se basant sur les travaux récents menés par l'équipe de recherche [8, 9]. Le signal de PLIF NO est fortement dépendant de la composition (quenching collisionnel) et de la température du milieu. Pour minimiser ces effets, l'optimisation de la stratégie d'excitation et de détection est nécessaire, en se basant sur un modèle de fluorescence de NO à 5 niveaux développé au laboratoire [10] et sur des résultats de simulations numériques qui seront réalisées dans le WP5. En fonction de l'avancement des simulations et de la maturité

de cette technique appliquée à la combustion H_2 /air, on pourra coupler cette technique avec celles du WP3 afin d'avoir simultanément 2 scalaires et le champ aérodynamique. Ces bases de données, en plus de permettre une analyse fine sur les mécanismes de formation du NO, alimenteront une base de données unique qui permettra de valider les outils LES développés dans le WP5.

WP 5 : Simulations numériques

Les calculs CFD seront réalisés avec le soutien de l'IFPEN avec l'outil CONVERGE. Dans un premier temps, des calculs RANS seront réalisés avant d'être affinés par des calculs LES basés sur des modèles de flamme épaissie. Dans ce travail, il s'agit d'étudier l'impact de certains paramètres pertinents (rapport air/gaz, température de l'air de combustion, composition/débit/taux de recirculation des produits de combustion, ...) sur la stabilité de la flamme, l'aérodynamique et la prédiction des retours de flamme, les transferts thermiques et les flux thermiques aux parois, la formation de polluants (NO, NO₂, N₂O, ...). Les calculs seront réalisés d'une part par le doctorant accompagné par IFPEN et d'autre part par les équipes du CETIAT.

Moyens utilisés:

- Banc d'essai combustion H_2 /air. Le brûleur est développé sur une base de brûleur existant et ne nécessite que très peu de modifications. Un travail d'anticipation via un stage de Master (fév-juil 2022) va permettre de réceptionner, de tester et d'évaluer les performances du brûleur.
- Métrologies optiques. Les diagnostics prévus sont maîtrisés dans l'équipe de recherche et disponibles dans le laboratoire. Leur planification et leur installation seront réalisés avec le pôle métrologie du laboratoire.

Références bibliographiques :

1. Barlow, R.S., M.J. Dunn, and G. Magnotti, *Preferential transport effects in premixed bluff-body stabilized CH₄/H₂ flames*. Combustion and Flame, 2015. **162**(3): p. 727-735.
2. Guiberti, T.F., D. Durox, P. Scouflaire, and T. Schuller, *Impact of heat loss and hydrogen enrichment on the shape of confined swirling flames*. Proceedings of the Combustion Institute, 2015. **35**(2): p. 1385-1392.
3. Guo, S., J. Wang, W. Zhang, M. Zhang, and Z. Huang, *Effect of hydrogen enrichment on swirl/bluff-body lean premixed flame stabilization*. International Journal of Hydrogen Energy, 2020. **45**(18): p. 10906-10919.
4. Reichel, T.G., S. Terhaar, and C.O. Paschereit, *Flashback Resistance and Fuel–Air Mixing in Lean Premixed Hydrogen Combustion*. Journal of Propulsion and Power, 2017. **34**(3): p. 690-701.
5. Reichel, T.G., K. Goeckeler, and O. Paschereit, *Investigation of Lean Premixed Swirl-Stabilized Hydrogen Burner With Axial Air Injection Using OH-PLIF Imaging*. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2015. **137**(111513).
6. Smith, S.H. and M.G. Mungal, *Mixing, structure and scaling of the jet in crossflow*. Journal of Fluid Mechanics, 1998. **357**: p. 83-122.

7. Osland, T., W. Urban, and M. Mungal, *Quantitative scalar measurements in compressible mixing layers*, in *34th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit* 1996, American Institute of Aeronautics and Astronautics.
8. Mulla, I.A., G. Godard, G. Cabot, F. Grisch, and B. Renou, *Quantitative imaging of nitric oxide concentration in a turbulent n-heptane spray flame*. *Combustion and Flame*, 2019. **203**: p. 217-229.
9. Mulla, I.A., G. Godard, and B. Renou, *Instantaneous planar measurements of nitric oxide concentration in a turbulent n-heptane spray flame*. *Combustion and Flame*, 2019. **208**: p. 451-471.
10. Gautier, P., B. Barviau, G. Godard, and F. Grisch, *Détection des Emissions des Polluants NO et CO dans les Flammes par Fluorescence Induite par Laser (LIF)*, in *14ème Congrès Francophone de Techniques Laser*, 2016: Marseille, France.