



## L'effet de remplacement du N<sub>2</sub> par le H<sub>2</sub>O dans l'air sur la structure interne et la formation des espèces polluantes d'une flamme de diffusion à contrecourant d'un biogaz hydrogéné dans un régime sans flamme

Amar Hade<sup>1</sup>, Abdelbaki Mameri<sup>1</sup>, Fouzi Tabet<sup>2</sup> et Zeroual Aouachria<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Département de Génie Mécanique, Faculté des sciences et sciences appliquées, Université Larbi Ben Mhidi, Oum El Bouaghi, BP 358, 04000, Algeria.

<sup>2</sup>DBFZ (Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH), Torgauer Straße 116 D-04347 Leipzig, Germany.

<sup>3</sup>Laboratoire de Physique Energétique Appliquée, Université de Batna1 05000 Algeria

*Email des auteurs:*

*hadef\_am@yahoo.fr, mameriabdelbaki@yahoo.fr, fouzi.tabet@dbfz.de, aouachria2001@gmail.com*

**Résumé :** Actuellement la combustion intervient dans plus de 80% de la consommation d'énergie primaire, donc la maîtrise de processus de combustion est essentielle, pour diminuer la consommation de combustible et les émissions polluantes, et augmenter la rentabilité et le rendement énergétique des systèmes est un défi pour les chercheurs. Pour l'atteindre, plusieurs études ont été lancées, parmi le préchauffage du comburant par le soutirage de la chaleur des produits de combustion qui sont une solution majeure à la diminution des dépenses d'énergie, et qui s'adapte bien à la combustion de gaz à faible pouvoir calorifique inférieur (PCI) ceci fait orienter les recherches vers de nouvelles technologies comme la combustion sans flamme, dite aussi MILD (Moderate or Intense Low-Oxygène Dilution).

Le présent papier consiste à une analyse numérique de l'impact du remplacement d'une quantité d'azote de l'air par la vapeur d'eau sur la structure interne et la production des espèces polluantes telle que le CO, NO, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> et CH<sub>2</sub>O d'une flamme de diffusion laminaire à jet opposé d'un mélange biogaz/hydrogène-air dans un régime de combustion sans flammes avec un taux d'étirement constant  $a=120s^{-1}$ , la cinétique de combustion est décrite par le mécanisme GriMech 3.0. La variation des paramètres influence directement sur la structure et la quantification des espèces polluantes, la réduction de l'oxygène a un effet très significatif sur la température et les émissions, un faible volume d'oxygène (4% - 6%) dans le flux d'oxydant chaud, caractérise la combustion sans flamme, l'ajout d'hydrogène au carburant a un impact moins important sur la température et les émissions que l'oxygène, l'augmentation de la dilution par H<sub>2</sub>O dans le flux d'oxydant réduit la température et les émissions par les effets thermiques et chimiques pour toutes les espèces à l'exception du OH.

**Mots clés :** biogaz hydrogéné, dilution par H<sub>2</sub>O combustion sans flamme et effets thermiques et chimiques de H<sub>2</sub>O

### 1. Introduction

La combustion classique conduit à des émissions importantes de différents polluants nocifs pour l'homme et la biosphère, tels que le monoxyde de carbone, les oxydes d'azote et le dioxyde de carbone, qui est un gaz à effet de serre. Relativement à l'augmentation de la population mondiale ces effets sont amplifiés, et engendrent une augmentation de consommation de combustibles, pour limiter ses émissions plusieurs réglementations ont été élaborées, afin d'améliorer le rendement et la qualité des processus de combustion, nombreux travaux scientifiques en ont découlé, la plupart de ses travaux entraînent des coûts d'utilisation de mise en place non négligeables. Un nouveau régime de combustion est apparu en Allemagne et breveté en 1989 sous l'acronyme FLOX (Flameless oxydation) [1]. Il est défini comme un régime de combustion pour lequel aucune flamme n'est visible à l'œil nu, stable, à gradient de température très faible et émettant très peu de polluants (CO et NO).

La condition fondamentale pour l'obtention du régime FLOX est de diluer les jets de combustible et de comburant avec une forte recirculation de gaz brûlés avant la réaction d'un du taux d'oxygène très faible [2]. A fin d'identifier

le domaine de combustion sans flamme, M. de Joannon et al. [3-5] ont étudié numériquement les caractéristiques de la combustion MILD dans une configuration à Jet opposé d'une flamme de diffusion  $\text{CH}_4+\text{N}_2/\text{air}$ , où ils ont étudié l'évaluation de la température et la quantité de chaleur dégagée en fonction de la fraction de mélange sous différents paramètres d'entrés, température de l'air préchauffé, la dilution du carburant, la pression et le taux d'étirement. Ils ont montré qu'un élargissement significatif de l'évolution de dégagement de chaleur est associé à des températures d'oxydant supérieures à la température d'auto-inflammation qui est homogène pour un temps caractéristique comparable au temps d'une combustion conventionnelle et la zone de réaction est épaissie et devenue très mince.

Maruta et al. [6] ont étudié la limite de combustion et la structure de la zone de réaction des flammes à contre-courant non pré mélangé de méthane dilué avec de l'azote et un oxydant hautement préchauffé. Leurs résultats montrent que les limites d'extinction deviennent plus larges avec l'augmentation de la température de l'air, et lorsque la température de l'air était supérieure à 1300 K, les limites d'extinction ont disparu. Dans cette plage de températures, la combustion se poursuit même dans des conditions extrêmement pauvres en carburant telles que 1% de méthane dans l'azote. Ryugo Fuse et al. [7] ont étudié la compétitivité du préchauffage de l'air et la diminution de la quantité d'oxygène sur la formation de l'espèce NO d'une flamme de diffusion dans une configuration à jet opposé, puisque l'éjection de l'air à haute température augmente la formation du NO et la réduction de la teneur d'oxygène le réduit. Leurs résultats montrent l'adaptation du mécanisme GRI 3.0 à la simulation de la formation de NOx en combustion MILD avec une validation par des résultats expérimentaux.

Hamdi Mohamed et al.[8] ont examiné les effets de la dilution du carburant et du taux d'étirement sur la structure de la zone de réaction et la formation de NOx dans une combustion sans flamme. Ils ont montré que les fractions massiques de NOx diminuent avec une vitesse de déformation croissante ainsi que la dilution de méthane avec l'azote.

Jianpeng.Z. et al.[9]ont étudiée l'effet de la dilution de  $\text{N}_2$  et  $\text{CO}_2$  sur l'auto allumage et le taux global des réactions dans deux régimes de combustion différents, combustion sans flamme et oxycombustion sans flamme, leurs résultat montrent que la réduction de la température provienne de l'effet physique de dilution de  $\text{CO}_2$ , tandis que le retard d'allumage provient principalement de l'effet chimique. En outre, l'étude des chemins de réaction suggère que la dilution de  $\text{CO}_2$  augmente la production locale de CO principalement par le biais des réactions élémentaires:  $\text{H} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{OH} + \text{CO}$  et  $\text{CO}_2 + \text{CH}_2(\text{s}) \rightarrow \text{CO} + \text{CH}_2\text{O}$ .

La combustion sans flammes est maintenant reconnue comme l'une des techniques de combustion parmi les plus avancées pour la réduction de la formation des polluants, tels que le monoxyde de carbone, les oxydes d'azote NOx ,le dioxyde de carbone, les particules non brûlés et la suie qui sont des polluants primaires [10], au cours du processus de combustion le carbone du combustible est transformé par une succession de réactions chimiques en  $\text{CO}_2$  et en CO, par contre les NOx sont produits lorsque la température de combustion dépasse 1400°C.

Sous cette contrainte la recherche d'un remplaceant s'avère nécessaire, plusieurs solutions ont été envisagées; parmi lesquelles l'utilisation des énergies renouvelables notamment, l'énergie solaire et éolienne, bien qu'elles sont intermittentes et peu rentables dans un moyen terme.

Cependant, l'utilisation d'un biogaz qui est une source d'énergie renouvelable et biodégradable, et dilué naturellement avec du  $\text{CO}_2$ , offre des avantages significatifs par rapport aux autres combustibles dans les domaines économique et environnemental, c'est-à-dire que le méthane du biogaz a niveaux d'émission de  $\text{CO}_2$  inférieurs à d'autres hydrocarbures en raison de son faible rapport carbone / hydrogène et que l'application à un système de combustion plus pauvre peut encore réduire les niveaux d'émission de NOx, mais engendre une flamme instable, pour remédier à ce problème en doit l'enrichir par l'hydrogène. C'est la raison principale pour laquelle une vaste recherche fondamentale a été menée sur les caractéristiques de combustion des mélanges biogaz-air avec une quantité d'addition d'hydrogène, ainsi que les conditions d'opérations [11].

Dans les conditions à basse température d'un biogaz BG75(75%  $\text{CH}_4$ +25%  $\text{CO}_2$ ) enrichi par l'hydrogène de 10% à 30%, sous une température de 300K, mélangé avec de l'air préchauffé de 1200K et dilué par la vapeur d'eau de 0% à 50% qui est substitué de la quantité d'azote de l'air qui se réduit de 79% à 29% (en volume) suivant un régime de combustion à faible teneur en oxygène 04-10% (en volume), dans une configuration géométrique à jet opposé d'une flamme de diffusion laminaire et un taux d'étirement constant  $a=120 \text{ s}^{-1}$ , est inscrit ce travail pour étudier l'impacts de tous ces paramètres sur la structure de la flamme et les espèces polluantes ainsi que l'effet chimique du  $\text{H}_2\text{O}$ , tout en introduisant une espèce inerte  $\text{F}_2$  dans le mécanisme réactionnel, qui a les mêmes propriétés thermodynamiques du  $\text{H}_2\text{O}$  mais qui ne participe pas aux réactions chimiques.

## 2. Configuration géométrique et formulation mathématique du problème

La configuration à deux jets opposés qui est développée par Kee et al., [12] et Lutz et al., [13] est adoptée dans cette étude, le premier jet est constitué de combustible, le deuxième de comburant Figure.1. Cette géométrie facilite l'étude de la structure de flamme laminaire, puisqu'elle permet une simplification importante des équations de l'écoulement. Dans une telle configuration, les deux jets sont en impact l'un vers l'autre où la zone de réaction se développe dans une couche de diffusion unidimensionnelle stable, ce qui rend l'écoulement stationnaire, ainsi que l'effet de la direction perpendiculaire au jet (direction x) est négligeable par rapport à celle parallèle (direction y).

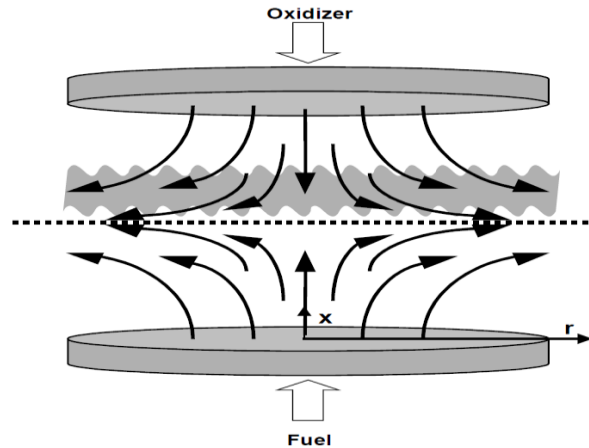


Figure 1 : Géométrie d'une configuration à deux jets opposés

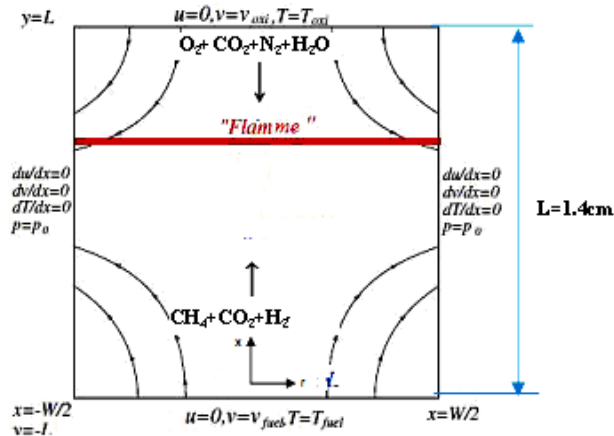


Figure 2 : Conditions aux limites d'une configuration à deux jets opposés

Cette configuration a été utilisée pour analyser la structure de la zone de réaction dans une couche de diffusion unidimensionnelle stable. La géométrie de l'écoulement schématisé par la Figure. 2, le carburant est un biogaz dopée à l'hydrogène BG 75 (75% CH<sub>4</sub>+ 25% CO<sub>2</sub>), tandis que l'oxydant, se réfère à l'air préchauffé et dilué par la vapeur d'eau, sous la pression atmosphérique ( P = 1 atm) avec une distance entre les deux jets L = 1.4 cm et un taux d'étirement constant a = 120 s<sup>-1</sup>, pour conserver ce dernier il faut calculer la vitesse du combustible et du comburant (Eq. 9) [14] :

$$a = \frac{2(-v_O)}{L} \left[ 1 + \frac{v_F}{(-v_O)} \sqrt{\frac{\rho_F}{\rho_O}} \right] \quad (1)$$

Avec  $v_O = v_F$ ,  $\rho_O$ ,  $\rho_F$  et  $\rho$  sont respectivement la vitesse de l'oxydant, du fuel, la masse volumique de l'oxydant et du fuel. La température d'injection pour le combustible est  $T_F=300$  K et pour l'oxydant  $T_O=1200$  K. Le carburant utilisé est du Biogaz BG75 ( $0.75CH_4+0.25CO_2$ ) injecté suivant le dopage et la dilution suivant la formule:

$$0.75(1-\alpha)CH_4 + 0.25(1-\alpha)CO_2 + \alpha H_2 \quad (2)$$

La composition de l'oxydant injecté est:

$$0.04O_2 + 0.17CO_2 + (0.79-\beta)N_2 + \beta H_2O \quad (3)$$

Où  $\alpha, \beta$  fractions molaires de  $H_2$  et  $H_2O$  ajoutés au biogaz.

Le programme CHEMKIN PRO [15] est utilisé pour la résolution des équations (4) – (6) suivant les conditions aux limites (8)

$$H - 2 \frac{d}{dx} \left( \frac{FG}{\rho} \right) + \frac{3G^2}{\rho} + \frac{d}{dx} \left[ \mu \frac{d}{dx} \left( \frac{G}{\rho} \right) \right] = 0 \quad (4)$$

$$\rho u \frac{dY_k}{dx} + \frac{d}{dx} (\rho Y_k V_k) - \dot{\omega}_k W_k = 0 ; k=1, \dots, K \quad (5)$$

$$\rho u \frac{dT}{dx} - \frac{1}{c_p} \frac{d}{dx} \left( \lambda \frac{dT}{dx} \right) + \frac{\rho}{c_p} \sum_k c_p V_k Y_k \frac{dT}{dx} + \frac{1}{c_p} \sum_k h_k \dot{\omega}_k - \frac{\dot{q}_r}{c_p} = 0 \quad (6)$$

Avec 
$$G(x) = \frac{dF(x)}{dx} \quad (7)$$

Les conditions aux limites pour le fuel (F) et l'oxydant (O) sont:

$$\begin{aligned} x=0: F &= \frac{\rho_F u_F}{2}, G=0, T=T_F, \rho u Y_k + \rho Y_k V_k = (\rho u Y_k)_F \\ x=+L: F &= \frac{\rho_O u_O}{2}, G=0, T=T_O, \rho u Y_k + \rho Y_k V_k = (\rho u Y_k)_O \end{aligned} \quad (8)$$

### 3. Détail de calcul

Les équations différentielles qui gouvernent l'écoulement sont résolues en supposant que chaque espèce aura sa propre vitesse de diffusion ce qui implique que le nombre de Lewis est variable et différent de l'unité, les pertes par rayonnement thermique des espèces  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO$ , et  $CH_4$ , modélisées par un corps optique mince :

$$\dot{q} = -4 \sigma K_P (T^4 - T_\infty^4) \quad (9) \quad \text{avec} \quad K_P = \sum_{i=1}^4 P_i K_i \quad i = CO_2, H_2O, CO, CH_4 \quad (10)$$

où  $\sigma$  est la constante de Stefan-Boltzmann,  $T$  et  $T_\infty$  sont respectivement la température de la substance rayonnante et celle du milieu ambiant,  $P_i$  pression partielle,  $K_i$  coefficient moyen d'absorption de l'espèce  $i$ .

La cinétique chimique est décrite par l'utilisant du mécanisme de GRI 3.0 [16], qui est formé de 325 réactions impliquant 53 espèces.

Le biogaz utilisé est le BG75 ( 75%  $CH_4$ + 25%  $CO_2$ ) avec plusieurs valeurs de dopage des fractions molaires  $H_2$ . Les calculs sont effectués à pression atmosphérique sur un rapport molaire de  $H_2$  (de 0.1 à 0,3), la fraction molaire de  $O_2$  dans l'air varie de 0,02 à 0,10, la quantité d'azote dans l'air est 75% une partie de cette valeur sera remplacée par la vapeur d'eau de 10% à 50%, qui joue le rôle d'une dilution, suivant un taux d'étirement  $a=120s^{-1}$ . Il est bien connu que les espèces dominantes dans la composition du biogaz est le  $CO_2$  et  $CH_4$ , la chimie de combustion de

ces espèces est décrite par le mécanisme 3.0 GRI même avec la présence d'hydrogène. Ce dernier a prouvé sa robustesse, C. Galletti et al. [17] ont utilisées les mécanismes suivant : le KEE-58 [18], le DRM-19 [19] et GRI-3.0 [16]. Le mécanisme de KEE-58 se compose de 18 espèces et 58 réactions. Le mécanisme de DRM-19 est dérivé de GRI-1.2 [20]. Les résultats obtenus avec les mécanismes détaillés (KEE-58, DRM-19 et GRI-3.0) sont en bon accord avec l'expérimental. Nathan Hinton and Richard Stone [21] ont utilisé le mécanisme GRI-3.0 dans une flamme laminaire méthane/air sous différents conditions (taux de déformation, température et pression). Dans une autre étude les auteurs ont utilisé GRI-3.0 et vérifié dans diverses conditions que mécanisme cinétique est capable de prédire le comportement général des systèmes fonctionnant dans un régime sans flamme [3].

## 4. Résultats et discussion

Dans cette section, la validation de la procédure de calcul et les effets des différents paramètres de fonctionnement sur la structure de la flamme sont exposés et discutés.

### 4.1 Validation de la procédure de calcul

La configuration de jet opposée a été utilisée dans plusieurs études avec différents combustibles et oxydants [16,19,22, 23,], où il a été mentionné que cette configuration simplifie les équations qui caractérisent la structure de la flamme. Étant donné que les mesures n'existent pas actuellement pour le biogaz dans la combustion sans flammes dans cette configuration, sur la base de la configuration investie par Sung. C.J. et al. [24] qui utilise le méthane comme combustible avec une combustion conventionnelle.

Le dispositif expérimental est constitué de deux buses convergentes de diamètres de 1.4 cm, avec une distance entre les deux jets  $L = 1.4$  cm. Les brûleurs sont alimentés avec de l'oxydant qui contient 23% d'oxygène et 77% d'azote et de carburant, qui est composé d'un volume de méthane de 23% et 77% d'azote. La pression ambiante est de 1 atmosphère et la vitesse moyenne des buses est constante et égale à  $v = 25,5$  cm / s, ce qui correspond à un taux d'étirement  $a = 42$  s<sup>-1</sup>.

La Figure 4 représente une comparaison des résultats calculés par le programme Chemkin et des valeurs issues de l'expérience qui sont la température et les espèces importantes comme CH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> et CO. Le bon accord est montré dans la structure de cette flamme, en outre, la température de flamme maximale calculée avec précision qui montre que les pertes de chaleur par rayonnement sont prises en compte et sont bien modélisées.

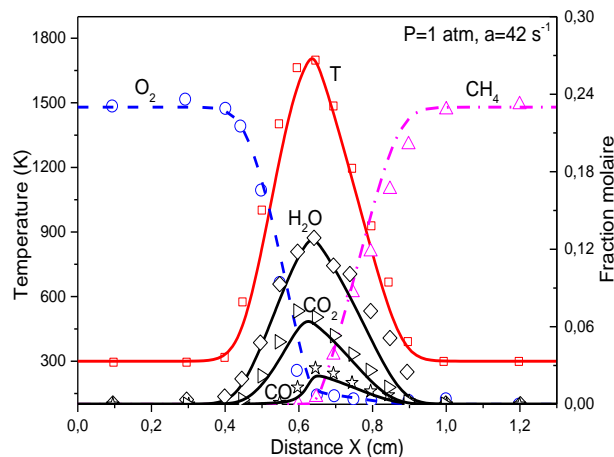


Figure 4: Comparaison entre les valeurs calculées et mesurées : la température et les profils importants d'espèces (les symboles représentent des résultats expérimentaux)

## 4.2 Effet de rayonnement

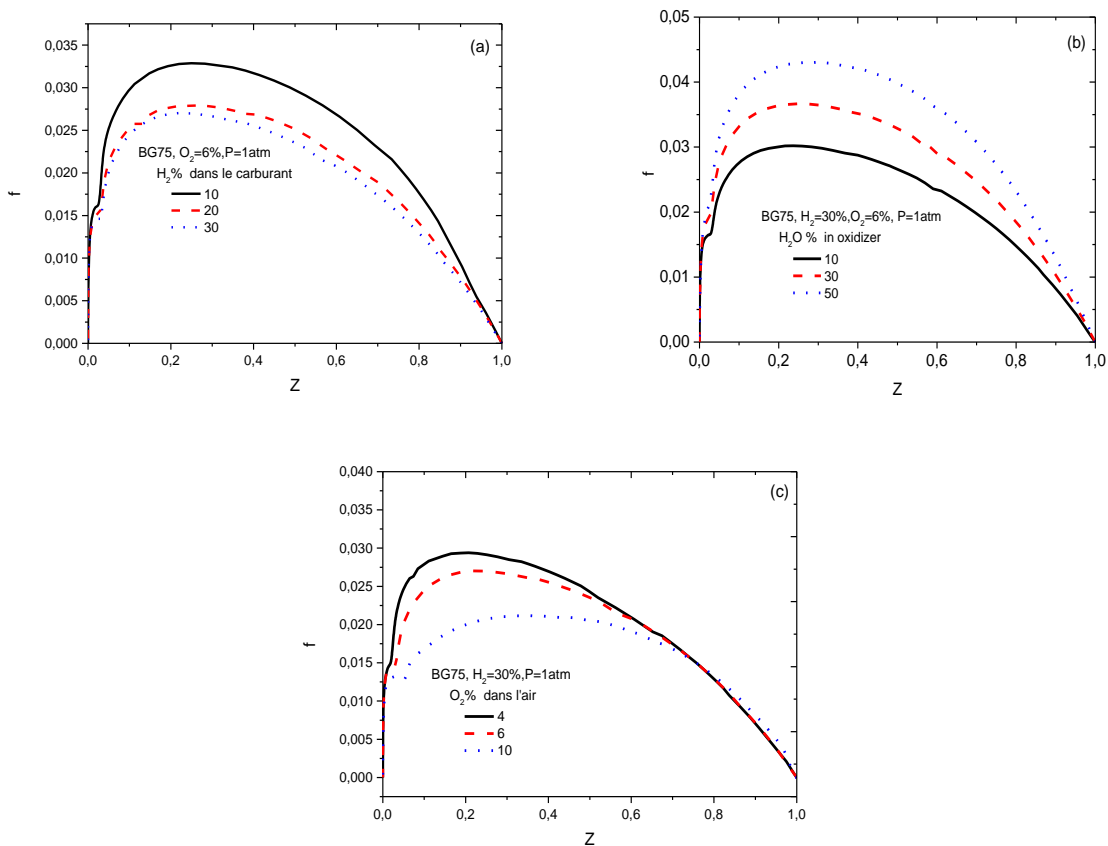


Figure 5: Température relative sous l'effet de l'addition de l'hydrogène, la vapeur d'eau et l'oxygène

La température relative de la flamme [25] est introduite pour illustrer l'effet de rayonnement de la zone de combustion:

$$f = \frac{T_{ad} - T_{non\ ad}}{T_{ad}} \quad (11)$$

Où  $T_{non\ ad}$  et  $T_{ad}$  sont les températures de flamme sans et avec la présence de flux de chaleur radiatif, respectivement.

Les profils de la température relative de combustion pour le biogaz BG75 à la pression atmosphérique sont représentés par la figure 5.

La Figure 5(a) représente les profils de température relative d'un biogaz BG75 dopé de 10% à 30% d'hydrogène où l'oxygène est égale à 6% dans l'oxydant, à partir de cette figure, l'enrichissement en hydrogène réduit la température relative de combustion puisque l'hydrogène est un gaz à faible rayonnement. La Figure 5(b) déduit l'évaluation de la température relative en fonction l'ajout de la dilution par la vapeur d'eau à côté du comburant qui contient une espèce rayonnante H<sub>2</sub>O, qui va engendre une augmentation de la température rayonnante. L'addition d'oxygène à l'oxydant réduit la température relative puisqu'elle substitue le CO<sub>2</sub>, qui est une bonne espèce rayonnante Figure 5(c).

## 4.3 Structure de la région de combustion

La Figure 6 montre les profils des effets combinés de la variation des fractions molaires de l'oxygène et l'hydrogène respectivement dans le comburant et le combustible.

La structure de la flamme est présentée par les distributions de température de combustion, les fractions massiques des principales espèces et les espèces mineures.

Le BG75 biogaz est considéré avec l'oxygène qui augmente dans l'oxydant de 4 % à 10 % en volume, tandis que le volume d'hydrogène augmente de 10 % à 30 % dans le carburant, la pression ambiante est maintenue constante et égale à 1 atm. Selon ces valeurs, les pics de température, les espèces mineures et majeures se produisent près de l'emplacement du front de flamme, tous les taux maximaux sont centrés dans le voisinage de  $x = 1,1$  cm. Dans la Figure 6 (a), représente l'effet de la réduction de l'oxygène dans l'oxydant qui engendre une réduction de température très importante, et un déplacement des profils de température sur le côté de l'oxydant. La zone de combustion sans flamme est spécifiée par faibles concentrations d'oxygène dans l'oxydant et résulte une température basse, cela appartient aux cas de la fraction molaire de  $O_2 = 4\%$  et  $6\%$ . Le moment où l'hydrogène est ajouté au carburant, cela induit une augmentation de la température de combustion et un déplacement des profils sur le côté de combustible puisque l'hydrogène étant un gaz très diffusif. La température augmente avec l'ajout d'hydrogène puisque le pouvoir calorifique de l'hydrogène ( $120\text{ MJ/Kg}$ ) est plus élevé que celui du biogaz utilisé dans ce travail ( $< 50\text{ MJ/Kg}$ ). En outre, l'hydrogène n'est pas une espèce rayonnante qui réduit les pertes de chaleur par rayonnement et augmente la température de la flamme. La fraction molaire de l'espèce mineure OH est représentée dans la Figure 6(b), cette espèce est réduite par la réduction de la quantité d'oxygène dans l'air, et augmente par les effets d'enrichissement d'hydrogène dans le carburant. En outre, nous pouvons remarquer que le pic maximal de OH est légèrement décalés du côté de l'oxydant relativement à la température. Dans la Figure 6 (c), la fraction molaire de CO est diminuée par la réduction de  $O_2$  dans le côté oxydant qui induit une réduction et légère décalages des profils sur le côté de l'oxydant. Lorsque l'hydrogène est ajouté, le mélange devenir plus réactif et la fraction molaire de CO augmente et les profils sont décalés vers le côté de carburant.

La fraction molaire de NO Figure 6(d), est considérablement réduite par la diminution d'oxygène dans le flux de l'oxydant et légèrement augmentée par l'addition d'hydrogène pour le carburant dans les conditions d'une combustion sans flamme (pour  $O_2 = 4\%$  et  $6\%$ ). Ici on voit que les niveaux de température et les fractions molaires des espèces pour les conditions de combustion sans flamme sont très faibles par rapport à la combustion conventionnelle.

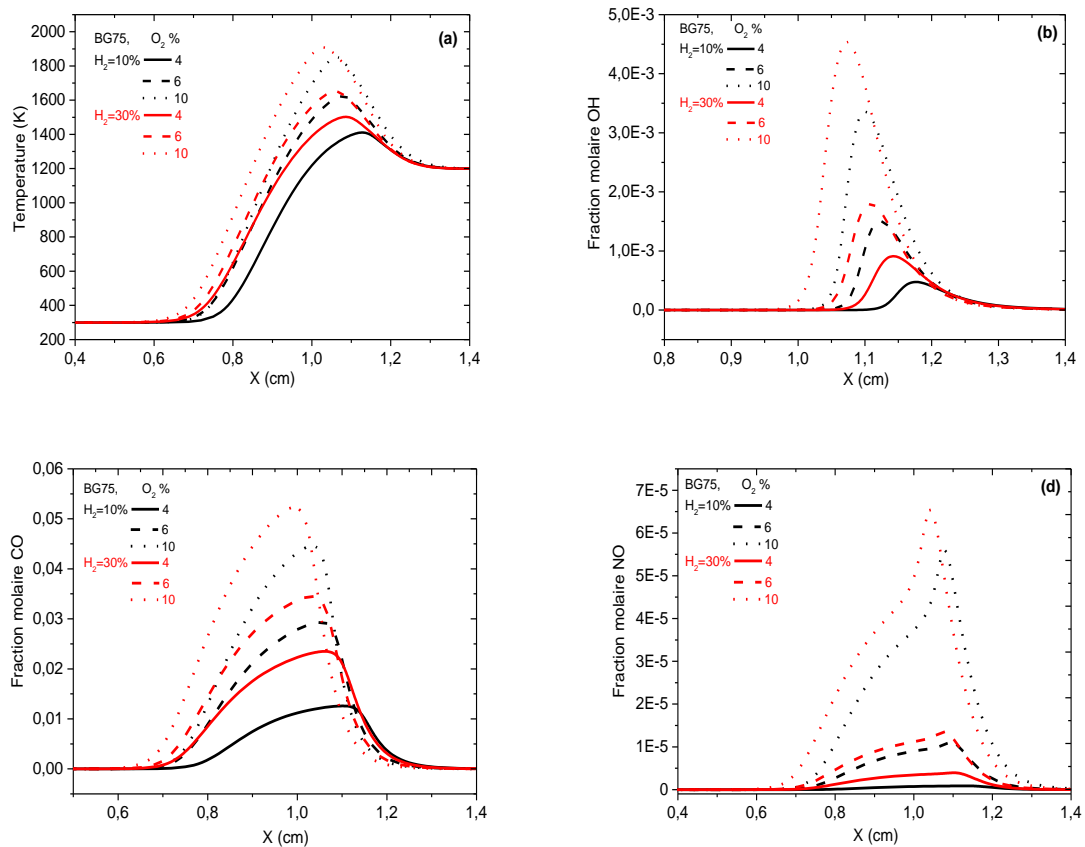


Figure 6 : Evolutions de la température et les espèces mineures et majeures.

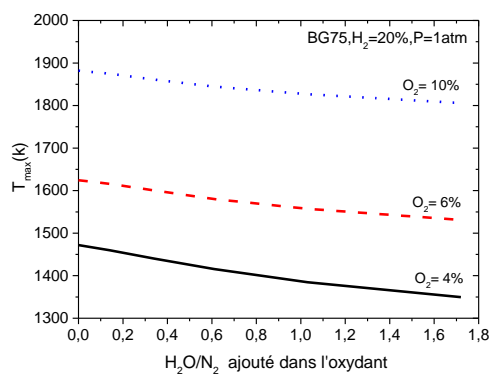
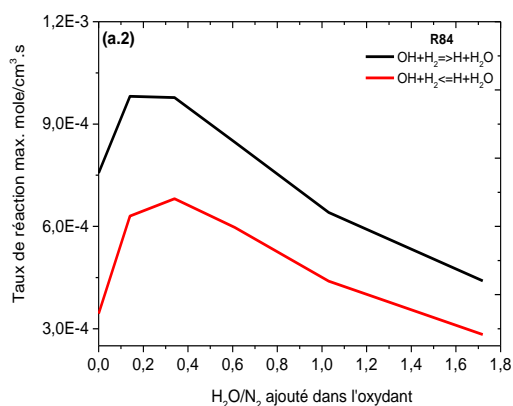
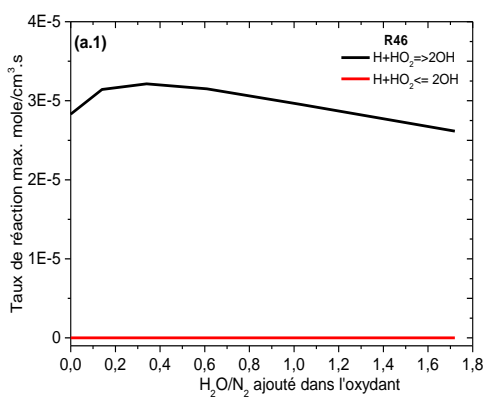
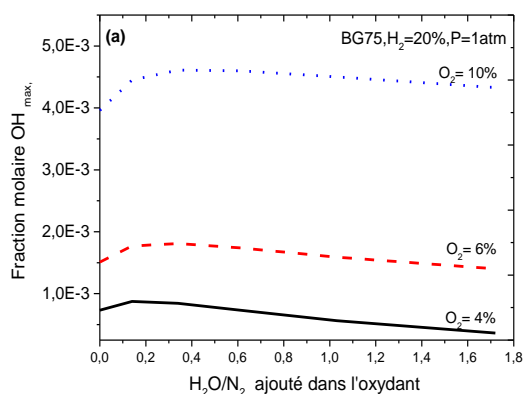
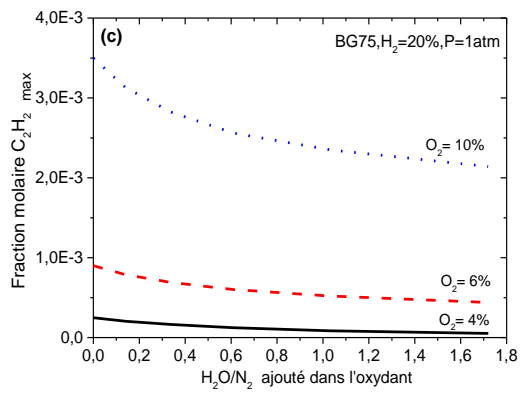
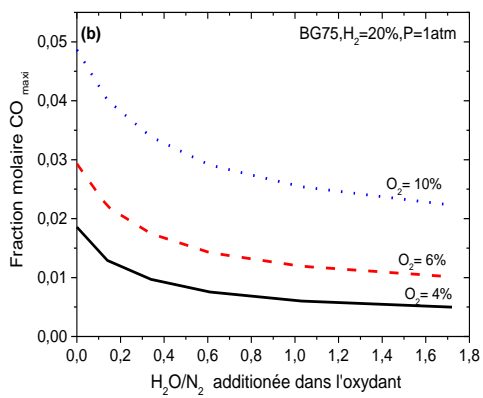
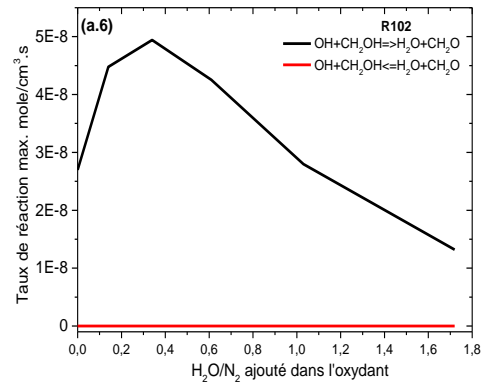
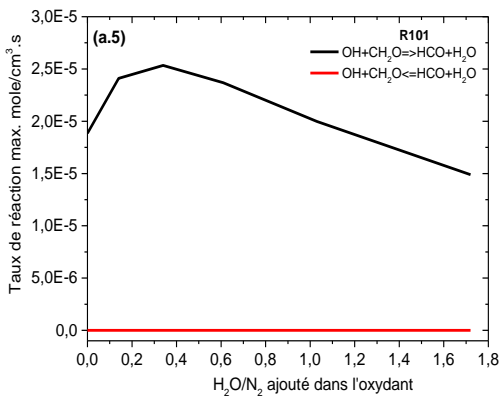
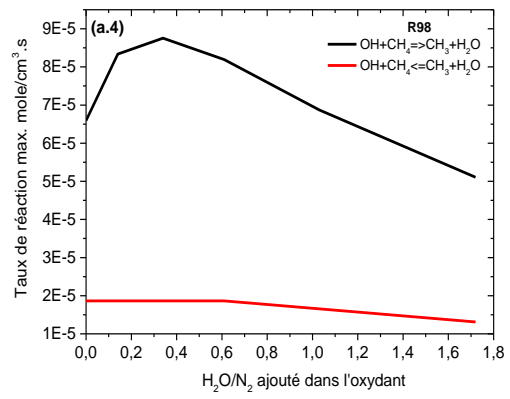
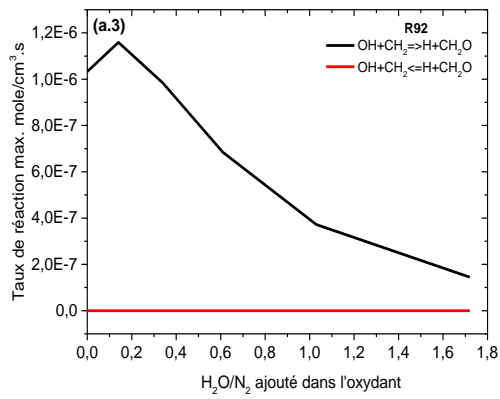


Figure 7: Variation de la température maximale en fonction de l'addition  $H_2O/N_2$  dans l'oxydant

La Figure 7 illustre la variation de maximum de température en fonction du rapport  $H_2O/N_2$  qui représente la valeur de  $H_2O$  ajouté dans l'oxydant qui est substitué de la quantité de  $N_2$  contenue dans l'air, la quantité d'oxygène dans l'air varie de 4% à 10% pour un enrichissement constant d'hydrogène égale à 20%, la réduction de l'oxygène induit une réduction de température importante, elle passe de 1882 K pour 10%  $O_2$  à 1471 K pour un taux de 4%  $O_2$  sous le même rapport de  $H_2O/N_2$ , mais la dilution par la vapeur d'eau réduit le maximum de température d'un taux de 8.3% pour une quantité d'oxygène dans l'air de 4%, et d'un taux de 4.04% pour une valeur de  $O_2=10\%$ .







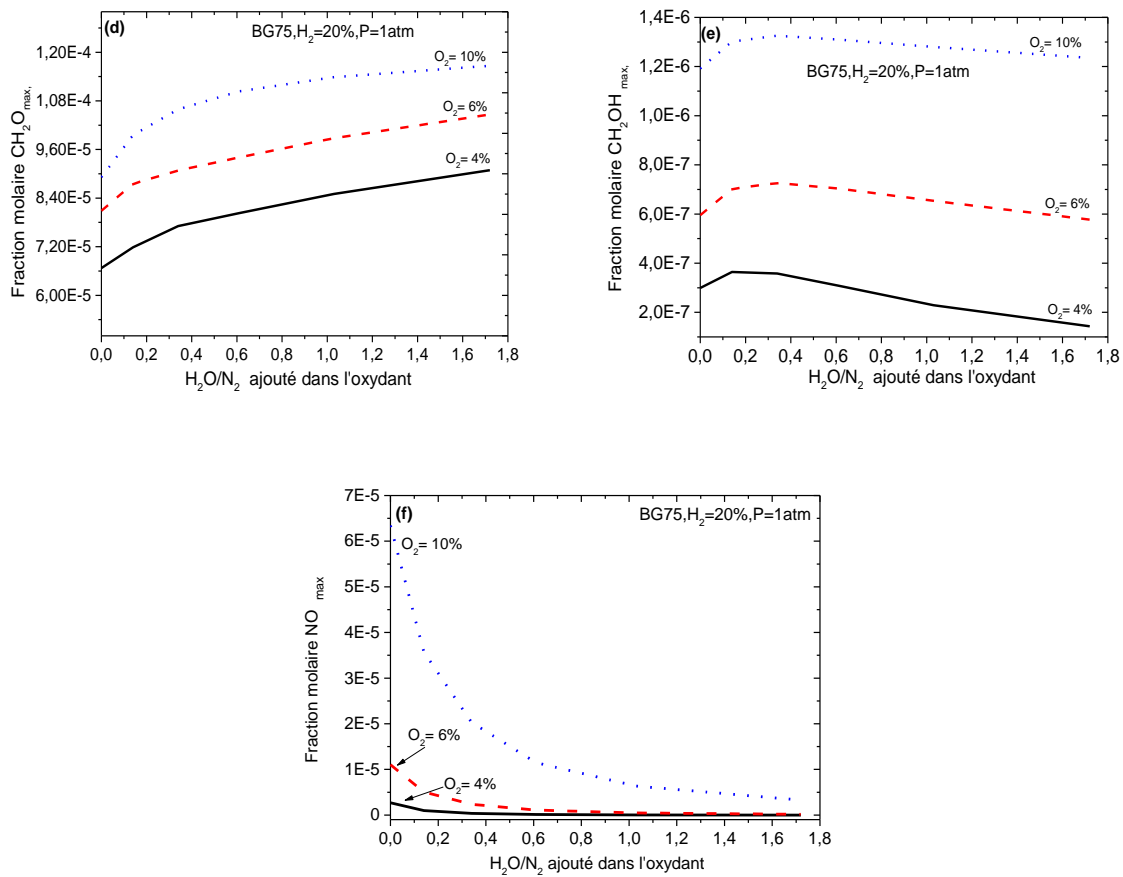
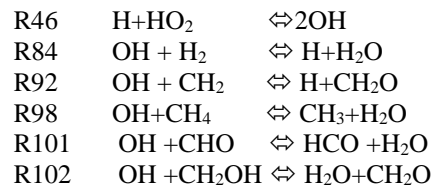


Figure 8: Variation de la fraction molaire maximale des espèces mineures et majeures en fonction de l'addition  $H_2O/N_2$  dans l'oxydant

Figure 8(a) illustre l'augmentation de la fraction molaire de OH, qui est très affecté par l'augmentation de l'oxygène et l'enrichissement par l'hydrogène qui favorisent la production et la consommation de l'espèce suivant les réactions élémentaires suivantes [26] :



La production est dominante par la réaction (R46) Figure 8(a.1), elle diminue après avoir pris un maximum lorsque la production de OH est maximal suivant la réaction R1 avec un rapport de dilution par  $H_2O/N_2=0.14$ , puis elle décroît suivant la consommation de l'espèce OH suivant les réactions R84,R92,R98,R101 et R102, représentées par les Figures 8(a.2.3.4.5.6).

Figure 8(b) représente la variation de la fraction molaire maximal de l'espèce CO, qui diminue relativement à la réduction de la teneur en oxygène (10% - 3%) d'un taux de 61%, puis elles se réduisent de plus en plus à mesure que le rapport de dilution  $H_2O/N_2$  augmente.

Les espèces  $C_2H_2$  et  $CH_2O$  sont des précurseurs de production des suies alors que les radicaux OH et O peuvent favoriser l'oxydation des suies et de réduire leur formation [27,28,29,30] suivant les réactions élémentaires suivantes :  $C_2H_2 + O \Leftrightarrow H + HCCO$  et  $O + C_2H_2 \Leftrightarrow CO + CH_2$ , l'augmentation du taux de  $C_2H_2$  est très significative par l'augmentation de l'oxygène, mais sa réduction est très affecté par la dilution par l' $H_2O$  Figure 8(c).

La Figure 8(d) illustre l'évolution du maximum du taux de production de  $CH_2O$  suivant une dilution d'un rapport de  $H_2O/N_2$  qui varie de 0 à 1.72 avec un dopage de 20%  $H_2$ . Les réactions dominantes pour la production de  $CH_2O$  sont R3 et R6, Cependant, l'espèce est très affectée par l'augmentation de la teneur en oxygène et l'addition de la dilution par  $H_2O$ , comme c'est mentionné par Glarborg et al. [31], cette espèce provient principalement du

radical  $\text{CH}_2\text{OH}$  dans une étape légèrement exothermique. Elle augmente relativement à l'élévation de la teneur d'oxygène et se réduit par l'ajout de la dilution par  $\text{H}_2\text{O}$  Figure 8(e).

La Figure 8(f) présente le maximum de la fraction molaire de  $\text{NO}$ , lorsque la quantité d'oxygène démunie dans l'oxydant le monoxyde d'azote chute d'une manière remarquable, sa fraction molaire est près de  $2.7 \cdot 10^{-6}$  dans un régime sans flamme avec un taux d'enrichissement de 20% d'hydrogène. En outre, l'augmentation de la dilution par la vapeur d'eau est très significative, elle induit une réduction importante du maximum de fraction molaire de  $\text{NO}$  d'un taux de 98%.

#### 4.4 Effet chimique et thermique de l'addition de $\text{H}_2\text{O}$ dans l'air.

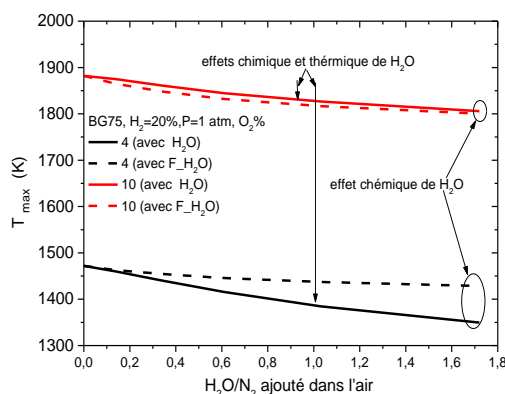
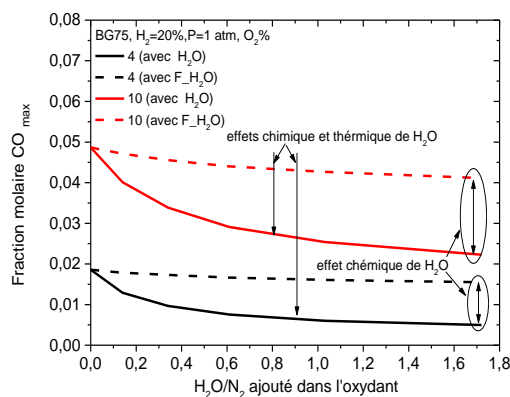
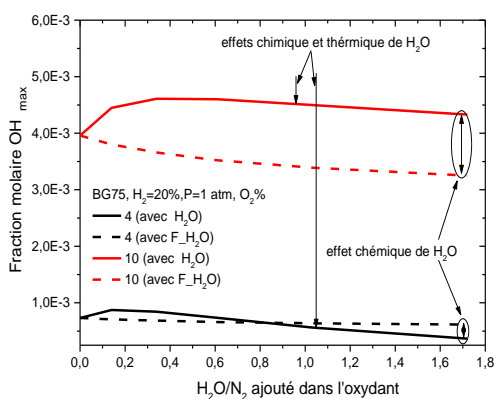


Figure 9: Effets thermiques et chimiques de  $\text{H}_2\text{O}$  ajouté sur le côté de l'oxydant sur la température maximale

La Figure 9 présente les effets du  $\text{H}_2\text{O}$  (effets thermiques et chimiques) dans un régime de combustion sans flamme d'un biogaz hydrogéné. Ici le  $\text{H}_2\text{O}$  remplace l'azote dans le flux de l'oxydant avec un rapport de fraction molaire  $\text{H}_2\text{O}/\text{N}_2$  allant de 0 à 1,8 et pour répondre aux conditions de régime sans flamme la quantité d'oxygène est fixe et égal à 4% (en volume). Afin de caractériser les effets chimiques de  $\text{H}_2\text{O}$  ajouté au flux de l'oxydant, une espèce artificielle fictive  $\text{F\_H}_2\text{O}$  est insérée dans le mécanisme. Cette dernière possède les mêmes propriétés thermodynamiques et de transport que le  $\text{H}_2\text{O}$ , mais il ne participe pas aux réactions. Ensuite, la différence entre les résultats obtenus avec les espèces  $\text{H}_2\text{O}$  et  $\text{F\_H}_2\text{O}$  représentent les effets chimiques de  $\text{H}_2\text{O}$ .

Les effets chimiques de  $\text{H}_2\text{O}$  induisent une réduction importante de température dans un régime de combustion sans flamme avec une teneur d'oxygène égale à 4%, relativement à une teneur égale à 10% la température n'est pas affectée par les effets chimiques de  $\text{H}_2\text{O}$ .



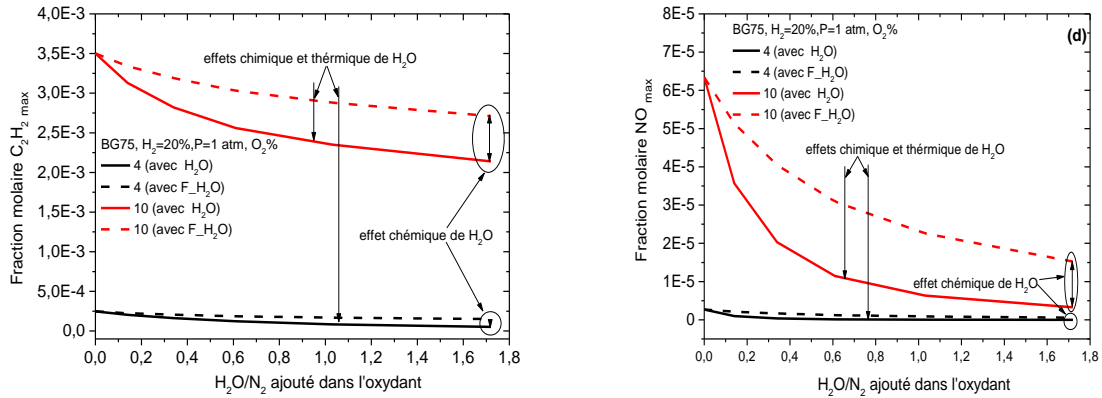


Figure 10 : Effets thermiques et chimiques de  $H_2O$  ajouté dans l'oxydant sur les espèces intermédiaire et majoritaires

La Figure 10(a) illustre les effets thermiques et chimiques de la vapeur d'eau sur la fraction molaire maximale de  $OH$ , cette valeur est réduite par les effets thermiques et chimiques de la vapeur d'eau, qui sont importants pour une teneur d'oxygène égale à 10% le long de la dilution, sont négligeables pour une quantité égale à 4% d'oxygène qui caractérise le régime de combustion sans flamme, où la production de  $OH_{max}$  est constante pour les différents pourcentages de dilution, par contre la production de  $OH_{max}$  par les effets combinés (thermiques et chimiques) se réduit par l'addition du  $H_2O$ .

Les effets thermiques et chimiques de l'ajout de  $H_2O$  sur la fraction molaire maximale de  $CO$  sont présentés par le Figure 10(b). La fraction molaire de  $CO_{max}$  est majorée par les effets chimiques et réduite par les effets thermiques, les effets chimiques sont maximaux pour l'ensemble de dilution par la vapeur d'eau, avec une teneur de 10% d'oxygène sont plus significatifs que pour la teneur de 4% en oxygène.

Le taux de production de la fraction molaire maximale de  $C_2H_2$  est très affecté par l'augmentation de la quantité d'oxygène dans l'oxydant, donc le régime de combustion sans flamme réduit la production de  $C_2H_2$  d'une manière très importante, où les effets chimiques et thermiques n'influe pas sur la formation de l'espèce, au contraire dans le cas d'une quantité d'oxygène dans l'oxydant égale à 10% où le maximum de la fraction molaire de  $NO$  est important, c'est la présence du régime conventionnelle, les effets chimiques et thermiques jouent un rôle important à la réduction de l'espèce  $C_2H_2$ .

Les effets thermiques et chimiques du  $H_2O$  sur le maximum de la fraction molaire de  $NO$  sont représentés par la Figure 10(d) pour les deux teneurs en oxygène, 4% et 10%. Les effets chimiques et thermiques de  $H_2O$  ne réduisent pas le maximum de la fraction molaire de  $NO$  avec une teneur d'oxygène égale à 4%, puisque la valeur est très négligeable, c'est l'avantage du régime de combustion sans flamme, mais avec la teneur de 10% en oxygène les effets combinés de l'addition de  $H_2O$  réduisent le maximum de fraction molaire de  $NO$  progressivement et relativement au pourcentage de dilution.

## 5. Conclusion

Le présent travail présente les effets de la dilution par la vapeur d'eau qui est substitué de la quantité d'azote d'un comburant préchauffé à une température de 1200K et un biogaz hydrogéné maintenu à 300K dans un régime de combustion sans flamme. Le volume d'oxygène dans l'oxydant est augmenté de 4 % à 10 % et de l'hydrogène dans le biogaz est augmenté de 0 % à 30 %.

Les conclusions qui peuvent être tirées :

- Dans un régime de combustion sans flamme la chaleur dégagée par la combustion est inférieure à celle libérée par la combustion classique, ce qui réduit les émissions de combustion dans le régime sans flamme.
- la réduction de l'oxygène dans l'oxydant induit une diminution importante de la température et toutes les émissions.
- Avec une faible teneur en oxygène (4 %) dans l'oxydant, le mélange ne brûle pas jusqu'à ce que l'ajout d'hydrogène, ce qui implique que dans un biogaz à faible teneur en oxygène dans l'oxydant, la combustion sans flamme est soutenue par l'enrichissement du combustible par l'hydrogène.
- L'augmentation de l'oxygène induit des augmentations importantes de température et des espèces, relativement à l'addition de l'hydrogène que ses derniers sont moins sensibles.
- La Température est très affectée par la dilution pour les différents teneurs d'oxygène, ainsi que les espèces majoritaires, l'effet chimique de la vapeur  $H_2O$  joue un rôle important sur la température et les espèces, il est proportionnelle à la quantité de la teneur en oxygène dans l'oxydant.

## Références

- [1] J. Wunning, Flammenlose Oxidation von Brennstoff mit hochvorgewärmter Luft, *Chemie Ingenieur Technik*, Volume 63, Pages 1243–1245, 1991.
- [2] LI. PengFei , MI.JianChun ,B.B,DALLY ,FF,WANG ,L.WANG , ZH.LIU ,S.CHEN est CG.ZHENG ,Progress and recent trend in mild combustion. *Science china Technological Sciences*, Volume 54, Pages 255–269,2011.
- [3] M. de Joannon , P. Sabia b , G. Sorrentino b et A. Cavaliere, Numerical study of mild combustion in hot diluted diffusion ignition (HDDI) regime, *Proceedings of the Combustion Institute*, Volume 32, Pages 3147-3154,2009.
- [4] M. de Joannon, P. Sabia , G. Cozzolino , G. Sorrentino et A. Cavaliere, Pyrolytic and Oxidative Structures in Hot Oxidant Diluted Oxidant (HODO) MILD Combustion,*Combustion Science and Technolog*, Volume 184, Pages 1207–1218, 2012.
- [5] M. de Joannon, G. Sorrentino. b, A. Cavaliere, MILD combustion in diffusion-controlled regimes of Hot Diluted Fuel, *Combustion and Flame*,Volume 159,Pages 1832–1839,2012.
- [6] K. Maruta, K.Muso, K.Takeda et T. Nioka, Reaction zone structure in flameless combustion, *Proceedings of the Combustion Institute*, Volume 28,Pages 2117–2123, 2000
- [7] R.Fuse ,H. Kobayashi , Y.Ju , K.Maruta et T. Niioka, NOx emission from high temperature air/methane counterflow diffusion flame. *International Journal of Thermal Sciences*, Volume 41 Pages 693–698,2002.
- [8] M.Hamdi ,B.Hmaeid et M. Sassi, Numerical modeling of the effects of fuel dilution and strain rate on reaction zone structure and NOx formation in flameless combustion, *Combustion Science and Technologie*, Volume 181, Pages 1078–1091, 2009.
- [9] J.Zhang, J.Mi, P.Li, F.Wand et B B. Dally, Moderate or Intense Low-Oxygen Dilution Combustion of Methane Diluted by CO2 and N2, *Energy Fuels*, Volume 29, Pages 4576–4585,2015
- [10] M.Derudi, A.Villani et R.Rota, Sustainability of mild combustion of hydrogen-containing hybrid fuels”, *Proceedings of the Combustion Institute*, Volume 31, Pages 3393-3400, 2007.
- [11] A.Mameri et F.Tabet, Numerical investigation of counter-flow diffusion flame of biogase hydrogen blends: Effects of biogas composition, hydrogen enrichment and scalar dissipation rate on flame structure and emissions, *international journal of hydrogen energy* , Volume 41, Pages 2011–2022,2016.
- [12] R.J Kee , J.A. Miller et G.H. Evans , Computational model of the structure and extinction of strained, opposed flow, premixed methane-air flames, *Twenty-Second Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, , Pages 1479-1494,1988.
- [13] A.E. Lutz, R.J. Kee, J.F. Grcar et F.M Rupley, A Fortran program for computing opposed-flow diffusion flames, *Technical Report OPPDIF*, Sandia Natl .Lab. SAND, SAND 96-8243,1997
- [14] EM.Fisher ,B A Williams et J.W Fleming, Determination of the Strain in Counter flow Diffusion Flames From Flow Conditions, *Proceedings of the Eastern States Section of the Combustion Institute*, Pages 191-194,1997.
- [15] CHEMKIN-PRO 15131, Reaction Design: San Diego, 2013
- [16] ] G.P. Smith , D.M Golden, M.Frenklach ,N W.Moriarty , B.Eiteneer, M Goldenberg,C T Bowman , R K Hanson, S Song, J.W.C Gardiner, V.V Lissianski et Z. Qin , Gri-Mech 3.0,2000, [http://www.me.berkeley.edu/gri\\_meeh/](http://www.me.berkeley.edu/gri_meeh/).
- [17] C. Galletti, A. Parente, M. Derudi, R. Rota et L. Tognotti, Numerical and experimental analysis of NO emissions from a lab-scale burner fed with hydrogen-enriched fuels and operating in MILD combustion, *international journal of hydrogen energy* Volume 34; Pages 8339– 8351,2009.
- [18] Fluent 6.3 user guide.
- [19]A.Kazakov et M.Frenklach, Reduced reaction sets based on GRIMech1.2. Available at: <http://www.me.berkeley.edu/drm/>.
- [20] M.Frenklach,H. Wang,C-L Yu ,M. Goldenberg,CT.Bowman ,RK Hanson, et al. GRI-1.2. Available at: [http://www.me.berkeley.edu/gri\\_mech/](http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/).
- [21] N. Hinton et R. Stone, Laminar burning velocity measurements of methane and carbon dioxide mixtures (biogas) over wide ranging temperatures and pressures, *Fuel* ,Volume 116 ,Pages 743–750,2014.
- [22] L.Seungro, P. Rosa, D-R. Derek,P. Trinh et K. Oh Chae, Extinction limits and structure of counterflow nonpremixed H2O-laden CH4/air flames. *Energy*, Volume 93, Pages 442-450, 2015.
- [23] C.Sheng , Z. Chuguang , Counterflow diffusion flame of hydrogen-enriched biogas under MILD oxy-fuel condition, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 36, Pages 15403-15413,2011 .

- [24] C.J.Sung, J.B.Liu et C.K.Law, Structural Response of Counterflow Diffusion Flames to Strain Rate Variations. *Combustion and Flame*, Volume 102, Pages 481-492, 1995.
- [25] J.Park, D.S. Bae, M.S. Cha, J.H. Yun, S.I. Keel, H.C. Cho, et al., Flame characteristics in H<sub>2</sub>/CO synthetic gas diffusion flames diluted with CO<sub>2</sub>: effects of radiative heat loss and mixture composition. *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 33, Pages 7256-7264, 2008.
- [26] D-J Hwang, J-W Choi, J. Park, S-I. Keel, C-B Ch et D-S Noh, Numerical study on flame structure and NO formation in CH<sub>4</sub>-O<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> counterflow diffusion flame diluted with H<sub>2</sub>O, *Int. J. Energy Res.* Volume 28, Pages 1255-1267, 2004.
- [27] F.S. Liu, Guo H.S, Smallwood G.J et O.L. Gulder, The chemical effects of carbon dioxide as an additive in an ethylene diffusion flame: implications for soot and NO<sub>x</sub> formation, *Combustion and Flame*, Volumes 125, Pages 778-787, 2001.
- [28] M.P. Ruiz, A. Callejas, A. Millera, M.U. Alzueta and R. Bilbao, Soot formation from C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> and C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> pyrolysis at different temperatures, *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, Volume 79, Pages 244-251, 2007.
- [29] V.Chernov, M.J. Thomson, S.B. Dworkin, N.A. Slavinskaya et U.Riedel, Soot formation with C<sub>1</sub> and C<sub>2</sub> fuels using an improved chemical mechanism for PAH growth. *Combustion and Flame*, Volume 161, Pages 592-601, 2014.
- [30] D.Liu, J.Santner, C.Togb, D. Felsmann, J. Koppmann, A.Lackner et al., Flame structure and kinetic studies of carbon dioxide-diluted dimethyl ether flames at reduced and elevated pressures. *Combustion and Flame*, Volume 160, Pages 2654-2668, 2014.
- [31] P. Glarborga, M.U. Alzuetab, K. Kjærsgaarda et K. Dam-Johansena, Oxidation of formaldehyde and its interaction with nitric oxide in a flow reactor, *Combustion and Flame*, Volumes 132, Pages 629-638, 2003.