

Dispersions des polluants de type NO_x lors de la combustion du Pentane : Effet de la géométrie

Lazreg NOURINE,
Faculté de Génie Mécanique, UST ORAN,
B.P. 1505 Oran El-M'naouar, 31000 Oran, Algérie
lazer48@gmail.com

Mustapha BELKADI,
Faculté de Génie Mécanique, UST ORAN,
B.P. 1505 Oran El-M'naouar, 31000 Oran, Algérie
belkadigma@yahoo.fr

Sidi Mohamed TERRAH,
Faculté de Génie Mécanique, UST ORAN,
B.P. 1505 Oran El-M'naouar, 31000 Oran, Algérie
t_mohamed31@yahoo.fr

Résumé : Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une étude visant l'optimisation des émissions polluantes émises par des brûleurs industriels à flamme de diffusion. L'exemple développé ici s'intéresse particulièrement à l'étude de l'effet des ventelles sur la formation des NO_x et leur dispersion dans un foyer lors de la combustion de combustible de type n-pentane. Il s'intéresse également à l'influence de la richesse du carburant. L'étude concerne un brûleur industriel à gaz de 15 mégawatt. Les simulations numériques sont effectuées à l'aide du code de calcul FLUENT, en utilisant le modèle de turbulence k-ε standard et la méthode de pdf (fonction de densité de probabilité) pour la modélisation de la combustion turbulente en tenant compte de 11 espèces chimiques : C₅H₁₂, CH₄, CO, CO₂, H₂, H₂O, H₂OI, O₂, OH, C_s et N₂. Les résultats obtenus montrent que la concentration du NO_x dans le foyer dépend du nombre et de la position des ventelles. Ils montrent aussi que la formation de NO-thermique est maximale dans les régions à température élevée et que la formation de NO-prompt s'intensifie considérablement en aval du brûleur.

Mots clés : simulation numérique, combustion, émissions polluantes, NO_x.

1. Introduction

Depuis la maîtrise du feu jusqu'à celle de l'atome, le développement des sociétés humaines s'est largement fondé sur la conquête de l'énergie. Dans tous les pays, l'énergie est ainsi progressivement devenue l'un des facteurs essentiels du développement économique et social, au même titre que le capital, le travail ou les ressources naturelles, et nul ne saurait désormais s'en passer.

La plus grande partie de cette énergie est issue de combustibles fossiles dont les ressources sont limitées. Par ailleurs, la combustion de ces hydrocarbures entraîne la production d'espèces polluantes pour l'environnement, à l'échelle locale mais aussi planétaire (destruction de la couche d'ozone par les oxydes d'azote et réchauffement global par le dioxyde de carbone). Dans ce cadre général les industriels du secteur de l'énergie, et des transports cherchent à perfectionner les procédés de combustion dans le but d'une part de réduire leur consommation en combustible et d'autre part de limiter leur production d'espèces polluantes. Ces objectifs, qui représentent des enjeux majeurs pour l'énergétique, nécessitent des recherches sur les aspects fondamentaux et technologiques.

Le contrôle des émissions d'oxydes d'azote (NO_x) est appelé à devenir un enjeu majeur dans les années à venir, dans des domaines aussi variés que l'automobile ou les brûleurs industriels.

A cet effet Frédéric et Puiggali [1] ont fait un Simulation numérique d'un brûleur industriel (d'une dizaine de mégawatts et consommant un déchet liquide) afin d'évaluer l'émission de polluant en sortie de chambre primaire d'un four tournant en écoulement réactif, leur étude a permis de connaître l'influence du paramètre géométrique (l'ouverture des ventelles du brûleur) sur la production de polluants azotés et sur la conversion du carbone. L'angle d'ouverture de ces ventelles, par rapport à la tangente du cercle circonscrit, varie de 0° (registre fermé) à 90° (pas de mise en rotation). La simulation est effectuée à l'aide du code de calcul Fluent, et utilise le modèle de combustion turbulente à fonction densité de probabilité à 11 espèces, couplé au module d'estimation de production de NO thermique par le mécanisme de Zeldovich, avec le schéma classique k-ε pour modéliser la

turbulence. Les tests effectués ont permis de déduire que les débits des rejets azotés varient de 0,005 et 0,015 kg/s selon les configurations des ventelles utilisées.

Dans le même contexte S.R. Gollahalli et al [2] ont mené une étude sur les flammes de diffusion turbulentes de deux brûleurs circulaire et elliptique et cela pour différents coefficients d'excès d'air λ . Les résultats obtenus pour les deux brûleurs ont montré que la concentration globale d'oxyde d'azote NO diminue avec l'augmentation de λ et que cette diminution est plus consistante dans le cas du brûleur elliptique.

La présente étude s'intéresse à l'étude de l'effet des ventelles sur la formation des NOx et leur dispersion dans un foyer lors de la combustion de combustible de type n-pentane.

2. Description du problème

La présente étude consiste à simuler numériquement le transport des écoulements réactifs dans un four par le code "Fluent" en analysant principalement la formation des oxydes d'azote et leur dispersion dans une chambre de combustion lors de la combustion du n-pentane.

La configuration géométrique considérée est une chambre de combustion et un brûleur à flamme de diffusion d'une puissance d'environ 15 MW, figure (1). Le combustible est injecté à travers une canne d'injection de diamètre 30 cm et le comburant est amené à travers trois ventelles identiques A et B et C de largeurs égales à 12 cm. Le brûleur, dont la longueur est de 1m, est placé à l'extrémité de la chambre de combustion primaire de longueur 5 m et de diamètre 3 m.

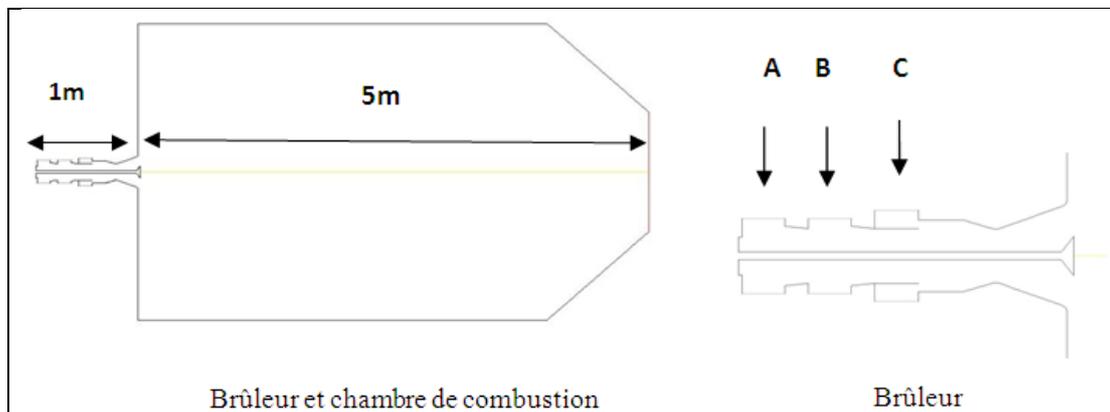


Figure 1 : Configuration géométrique du brûleur et de la chambre de combustion.

3. Modèle numérique

Toutes les simulations numériques sont effectuées par le code « FLUENT ». La résolution des équations discrétisées est basée sur la méthode des volumes finis couplée à un schéma de résolution multi-grille. Le problème considéré est stationnaire, bidimensionnel et axisymétrique. Le calcul de la trajectoire de la phase dispersée est effectué dans un référentiel Lagrangien par intégration du bilan de forces sur une particule. Les bilans de matière et de chaleur effectués sur ces particules, associés aux grandeurs de la phase continue, permettent de prédire l'évolution de leur diamètre le long de leur trajectoire. L'influence de la présence de la phase dispersée sur la phase continue est prise en compte au moyen de termes sources présents dans les équations de conservation de la quantité de mouvement, de l'enthalpie et des espèces chimiques.

Le couplage entre la turbulence de l'écoulement et la réactivité du système, imposée par les réactions de combustion, est traité par une méthode à fonction densité de probabilité (PDF). La résolution des équations régissant l'écoulement est effectuée à l'aide de l'algorithme SIMPLE et la turbulence est modélisée par le schéma classique k- ϵ standard, faisant intervenir les équations de transport de l'énergie cinétique et de sa dissipation. Les différentes espèces chimiques prises en compte pour les calculs d'équilibre sont : C₅H₁₂, CH₄, CO, CO₂, H₂, H₂O, H₂O₁, O₂, OH, Cs et N₂ et le pentane est substitué par un déchet liquide de propriétés physiques voisines. La prédiction de la formation d'oxyde d'azote est effectuée, en post traitement, à l'aide du mécanisme étendu de Zeldovich (NO thermique), complété par l'approche d'équilibre partiel pour le calcul de la concentration en radicaux oxygène [1].

4. Condition aux limites (CL)

Les conditions d'injection caractérisant les entrées comburantes (Air) sont obtenues en fixant le taux d'excès d'air à 10%, quant aux conditions relatives au pentane, substitué par un déchet liquide de propriétés physiques voisines, elles nécessitent la parfaite connaissance de l'injection : débit massique liquide, diamètre des gouttelettes pulvérisées, angle de pulvérisation, débits air de combustion et les températures d'injection. Les principales conditions sont consignées dans le tableau (1) suivant :

Tableau 1 : Conditions aux limites

Débit massique de pentane	$q = 0.36 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$
Diamètre des gouttes injectées	$d = 50 \mu\text{m}$
Angle de pulvérisation	$\alpha = 35^\circ$
Température d'injection	$T = 25^\circ\text{C}$
Débit volumique d'air de combustion	$Q = 4.72 \text{ Nm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Température d'arrivée de l'air de combustion	$T = 200^\circ\text{C}$

Par ailleurs, les conditions caractérisant la turbulence à l'entrée sont données en termes de longueur caractéristique, $l=0,17 \text{ m}$, et d'intensité turbulente, $It = 10 \%$.

Les conditions aux limites de la configuration étudiée sont illustrées sur la figure (2).

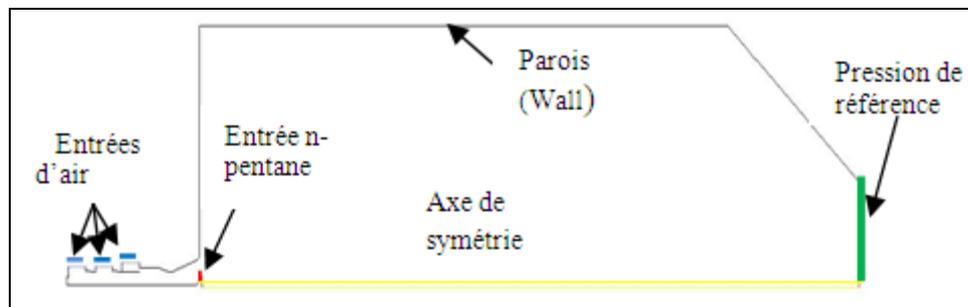


Figure 2 : Conditions aux limites

5. Résultats et discussions

Dans la chambre de combustion, la structure de l'écoulement et la production de polluants azotés (NO_x) dépendent de nombreux paramètres géométriques [1] : le déflecteur, la canne d'injection, le turbulateur (taux de rotation de l'air), le nombre et la position des ventelles. Dans cette étude, on s'intéresse à l'effet du dernier paramètre cité. Ainsi, pour la même géométrie particulière considérée, on distingue sept cas :

Cas A : Fonctionnement avec la ventelle **A**.

Cas B : Fonctionnement avec la ventelle **B**.

Cas C : Fonctionnement avec la ventelle **C**.

Cas AB : Fonctionnement avec la ventelle **AB**.

Cas AC : Fonctionnement avec la ventelle **AC**.

Cas BC : Fonctionnement avec la ventelle **BC**.

Cas ABC : Fonctionnement avec la ventelle **ABC**.

Il est à signaler que pour tous les cas traités le débit d'air injecté est constant et égal à 3.52 Kg/s.

Afin de valider le modèle numérique élaboré, les résultats obtenus ont été confrontés avec ceux fournis par Marias et al [1] relatifs au fonctionnement d'un four à trois ventelles (cas ABC).

5.1. Etude du Champ de température

La figure (4) présente le champ de température. A l'affront du nez du brûleur, la température augmente de façon régulière jusqu'aux parois latérales du foyer, les zones les plus chaudes sont situées aux angles avals correspondant aux parties tronconiques de la chambre de combustion. D'après Marias et al, pour un écoulement axial, la flamme est étirée vers la sortie du four sous l'effet de la quantité de mouvement axiale et les points chauds apparaissent ici sur la partie tronconique du four, c'est-à-dire à la jonction chambre primaire- chambre de post combustion [1].

5.2. Etude des Emissions NO

D'après M.A. Habib et al [3], la formation de NO_x au cours du processus de combustion se fait principalement par l'oxydation de l'azote dans l'air de combustion (NO-thermiques) et par oxydation de l'azote avec le carburant (NO- prompt). Le taux de formation des polluants de NO_x dépend fortement de la température, il est calculé d'après l'expression suivante :

$$NO_{ppm} = \frac{\text{fraction molaire de NO} \times 10^6}{1 - \text{fraction molaire de H}_2\text{O}}$$

La figure (5) montre les contours des NO- thermique en ppm des sept configurations. Les résultats montrent que la formation de NO-thermique commence en aval du front de pyrolyse dans la zone d'oxydation des gaz combustibles issus de la pyrolyse. La formation de NO-thermique la plus importante est néanmoins observée dans la zone chaude c'est-à-dire dans la sortie de la chambre et la partie tronconique du four où les régions les plus chaudes sont concentrées. Le taux de NO atteint environ 450 ppm.

Une analyse plus fine de la figure montre que le mécanisme de formation de NO- "thermique" dépend fortement de la température [4]. La concentration du NO_x est maximale dans les régions à température élevée. Comme attendu, l'émission de NO_x augmente exponentiellement avec la température [5].

Il y a lieu de signaler que la même constatation est relevée en amont de l'écoulement à la sortie du déflecteur et plus précisément dans la zone morte de recirculation où la température est aussi élevée (de l'ordre de 2050 K) et par conséquent le taux des NO thermique est maximum dans cette région.

Les résultats concernant la formation de NO_x par le mécanisme prompt dans les mêmes conditions de calculs sont présentés sur la figure (6). Ce mécanisme est réputé significatif dans les zones riches en combustibles et ceci est bien observé sur cette figure. La formation de NO-prompt ne commence qu'en aval du front de pyrolyse où le combustible (C_5H_{12}) est disponible abondamment. Le maximum de NO-prompt est formé sur ce front (cf. couleurs rouge et orange).

Conclusion

Les résultats obtenus ont montré que le changement du nombre et/ou de la position des ventelles influence et modifie la structure de l'écoulement dans la chambre de combustion et que la température augmente de façon régulière en parcourant le brûleur à partir du nez jusqu'aux parois latérales du foyer. Les points chauds sont situés aux angles avants de la chambre, les NO_x sont concentrés dans les zones de recirculation. La concentration du NO-thermique est maximale dans les régions chaudes et la formation de NO-prompt ne commence qu'en aval du front de pyrolyse à forte concentration de combustible.

Références

- [1] Marias.F, Puiggali.J.R, 2000« Simulation numérique d'un brûleur industriel. Analyse qualitative des effets de swirl sur l'écoulement et sur la production des polluants», Int. J. Therm. Sci, Vol 39, 249-264.
- [2] Praveen Hariharan, Chendhil Periasamy, S.R. Gollahalli 2006 «Effect of elliptic burner geometry and air equivalence ratio on the nitric oxide emissions from turbulent hydrogen flames»,International Journal of Hydrogen Energy 32 (2007) 1095 – 1102.
- [3] M.A. Habib , M. Elshafei , M. Dajani «Influence of combustion parameters on NO_x production in an industrial boiler» Computers & Fluids 37 (2008) 12–23.
- [4] Abhishek ASTHANA« Modélisation mathématique de la formation des NO_x et de la volatilisation des métaux lourds lors de l'incinération sur grille d'ordures ménagères», thèse de doctorat d'état, l'Institut National Polytechnique de Lorraine 2008).
- [5] David Vauchelles « Etude de la stabilité et des émissions polluantes des flammes turbulentes de pré-mélange pauvre a haute pression appliquées aux turbines à gaz », thèse de doctorat, A l'institut national des sciences appliquées de Rouen 2004.

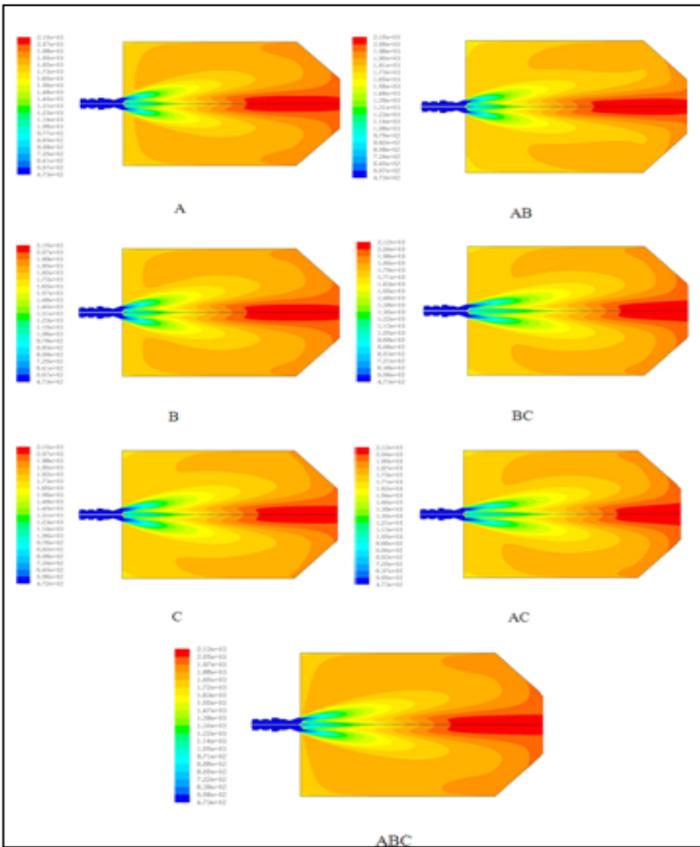


Figure 3 : Contours des températures totales pour les sept cas

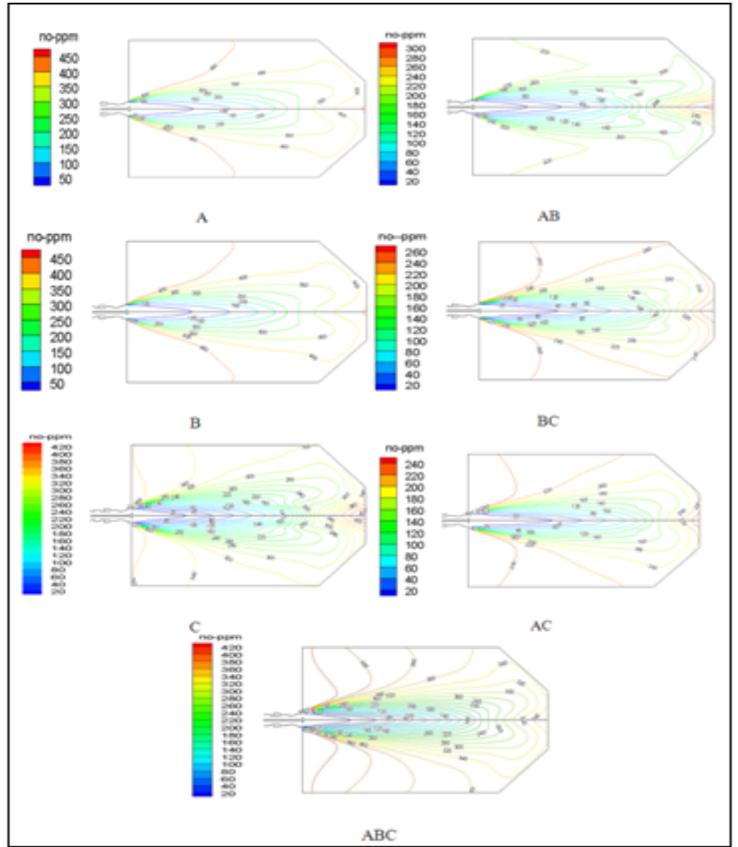


Figure 4 : Contours des NO-ppm total pour les sept cas

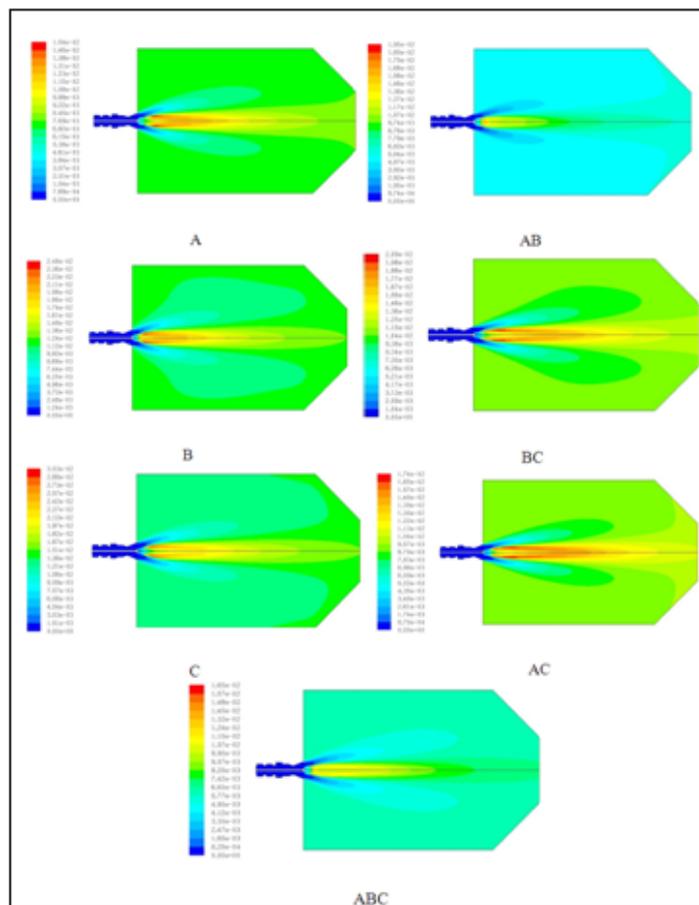


Figure 5 : Contours des NO-ppm prompt pour les sept cas