

Quantification des émissions polluantes dans un four de cimenterie

A. Benarous^{1,2*}, A. Liazid², A. Mokhtardidouche¹ et L. Loukarfi¹

¹ Département de Mécanique, UHB Chlef, BP 151, Chlef, Algérie

* a.benarous@univ-chlef.dz

² Laboratoire de Recherche en Technologie de l'Environnement (LTE), ENSET, BP1523, Oran, Algérie

Résumé :

Le présent papier consiste en une analyse CFD de la production des émissions polluantes de type NOx dans le cas d'une combustion turbulente en flamme de diffusion de type méthane-air, au sein du brûleur d'un four de cimenterie. Une attention particulière est prêtée à la relation entre le taux d'émission et l'efficacité de la combustion. Il est aussi montré, que le niveau de pollution peut être réduit d'environ 30 % en utilisant une injection viciée (swirlée) plutôt que cisailée de l'air primaire qui alimente le four. La longueur de flamme visible ainsi que le taux de pollution prédits par la simulation s'avèrent en parfait accord avec les mesures effectuées sur site.

Mots-clefs :

émissions polluantes; combustion turbulente ; flamme de diffusion, four de cimenterie.

1 Introduction

L'accumulation dans l'atmosphère de certains gaz par les activités industrielles est susceptible d'entraîner d'importantes modifications du climat et compromettre la pérennité de la biosphère [Elichegary(2004)]. En effet, la qualité de l'air n'a rien d'immuable dans le temps et dans l'espace car sa composition chimique résulte d'équilibres complexes entre les apports permanents de polluants émis par les sources fixes et mobiles d'une part et les mécanismes d'élimination naturelle et de recyclage d'autre part. En conséquences, il est important de mener des actions axées sur la surveillance des sources de pollution.

Une grande partie de l'énergie domestique et industrielle responsable de la pollution est produite via des processus de combustion [Tomlin (2007)], qui émettent des espèces extrêmement toxiques, telle que le monoxyde de carbone (CO) et les oxydes d'azote (NO_x). Dans le domaine de l'industrie du ciment, la réduction des émissions polluantes est devenu une priorité afin de satisfaire les normes mondiales mais aussi, comme un sérieux argument de vente.

Plusieurs techniques permettant la réduction des taux d'émissions polluantes dans les zones de cuisson du four existent, en effet, on peut citer la technique de la combustion étagée [Faivre (2003)], la technique de la réduction sélective non catalytique (SNCR) et la technique de dilution du mélange par les gaz brûlés [Pesenti (2006)]. Cette dernière technique faisant partie de la configuration réelle de l'installation du four, nous proposons en sus, une variante approche consistant à « swirler » l'air primaire au niveau de l'injection.

Le présent travail constitue une contribution à l'estimation des émissions polluantes (de type NOx) en sortie du four de la cimenterie de Chlef, avec une approche numérique (CFD) par le biais du code commercial Fluent [Fluent (2006)].

2 Conditions de fonctionnement

Le four de la cimenterie de Chlef est de forme cylindre, ayant un diamètre interne de cinq(5) mètres et s'étale sur une distance de cents (100) mètre (figure1).



FIG.1 Vue d'ensemble du four de l'ECDE, Chlef

Le jet turbulent du combustible (CH₄) est entouré d'un courant d'air primaire, ce dernier est englobé d'une importante proportion de gaz brûlés (appelée air secondaire ou co-flow) qui sont réinjectés parallèlement en entrée du four. La sortie du four débouche sur une zone à pression ambiante. La symétrie de la géométrie et de l'écoulement fait qu'il

est intéressant d'adopter un modèle axisymétrique pour le four (figure 2).

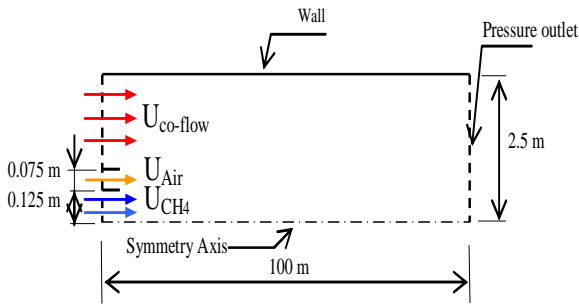


FIG.2 Modèle géométrique et conditions aux limites

Les conditions aérodynamiques de fonctionnement sont décrites dans le tableau 1.

Conditions	Air primaire	Air secondaire	Méthane
Température (K)	298.15	1000-1300	273.15
Vitesse d'injection (m/s)	330.00	0.265	72.44
Niveau de turbulence (%)	10	2	10

TAB.1 – Conditions aux limites utilisées dans la simulation

Les conditions de vitesse ont été évaluées à partir des débits volumiques moyennés sur une période de un (01) mois [Nial, 2007], alors que la turbulence a été ajustée de façon que la longueur de la flamme calculée soit le plus proche possible de sa valeur mesurée.

3 Modélisation de l'aérothermochimie

La production des espèces polluantes de type NOx est très dépendante de l'ambiance thermique à l'intérieur du four; cette dernière étant la conséquence d'une compétition entre la chimie et la turbulence. Il a été montré via une analyse paramétrique [Mokhtar didouche *et al* (2007)], que la structure de la flamme et l'étendue de la zone de recirculation étaient bien prédites si l'on utilisait un modèle de turbulence de type $k-\epsilon$ avec une correction de Pope ou bien un modèle $k-\omega$. Le modèle de rayonnement à ordonnées discrètes (DO) a été utilisé en raison de la faible valeur de l'épaisseur optique moyenne [Mokhtardidouche (2008)] de l'écoulement. Ce modèle utilise une

discrétisation en angles solides pour résoudre l'équation de transferts radiatifs (RTE) en termes d'intensité de rayonnement [Taine *et al.*(1999)].

Une chimie complète (réaction à une étape) est adoptée pour décrire l'évolution spatiale des fractions massiques des espèces chimiques majoritaires ($CH_4, O_2, N_2, CO_2, H_2O$) en plus du monoxyde d'azote (NO). L'interaction chimie-turbulence est gérée par une expression algébrique de type Eddy-Break up [Magnussen *et al.*(1976)] du taux moyen de réaction, dont l'intensité est supposée inversement proportionnelle au temps caractéristique du mélange turbulent (k/ϵ). Les mécanismes de formation des NOx peuvent être classés en trois grandes parties, le NO thermique, le NO précoce et le NO combustible.

Le NO thermique se forme lorsque l'azote et l'oxygène atmosphériques coexistent en un endroit à forte température, son taux de production dépend exponentiellement de la température [Pesenti (2006)] ce qui le rend énormément sensible au mélange turbulent et aux fluctuations acoustiques; le NO précoce est produit au voisinage du front de la flamme par le biais des radicaux libres et dépend exponentiellement de la température et de la richesse locales, le NO combustible résultant de l'oxydation de l'azote atomique inclus dans le combustible, ne sera pas considéré dans le présent travail.

Le NO thermique est considéré comme une espèce polluante dominante (par rapport au NO précoce) lorsque la température dépasse 1700 K sous un dosage quasi stœchiométrique [Mokhtardidouche *et al.*(2008)], il résulte à partir du mécanisme étendu de Zeldovitch [Williams (1985)] gouverné par les deux réactions :



Le calcul du taux de réaction net du NO thermique s'exprime comme une fonction densité de probabilité (Pdf) de la température et suppose un équilibre partiel du radical O [Lipatnikov(1988)] issu de la réaction du troisième corps (où M est un partenaire collisionnel) :



Il est aussi prêté attention à la distribution radiale de la température statique au niveau du plan de sortie du four. En l'occurrence, on définit un facteur OTDF, mesurant l'uniformité de la température radiale, lié étroitement à l'efficacité de la combustion [Bastier *et al.*(2004)] et définit par :

$$OTDF = \frac{T_{Exit}^{Max} - \langle T \rangle_{Inlet}}{\langle T \rangle_{Exit} - \langle T \rangle_{Inlet}} \quad (3)$$

4 Résultats et discussions

La première démarche dans un calcul CFD consiste à construire un maillage et à s'assurer que la solution est indépendante du nombre de cellules.

Ainsi, le domaine axisymétrique est couvert initialement par un ensemble structuré de cellules (38750) sur lequel un raffinement local est opéré sur la base du gradient de la température radiale, permettant d'atteindre un nombre important (environ 70000) de cellules (figure 3). Des tests sur des maillages plus fins n'a relevé qu'un écart relatif non supérieur à 7% quant à la valeur de la température.

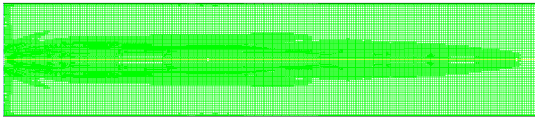


FIG.3 Raffinement local du maillage (2D)

L'analyse thermochimique de la combustion du méthane dans l'air (21% O₂, 79% N₂) révèle que le point stœchiométrique (correspondant à une température maximale) se trouve déplacée vers les rapports de mélange élevés (figure 4) lorsque le comburant a une teneur faible en oxygène (cas des gaz brûlés injectés).

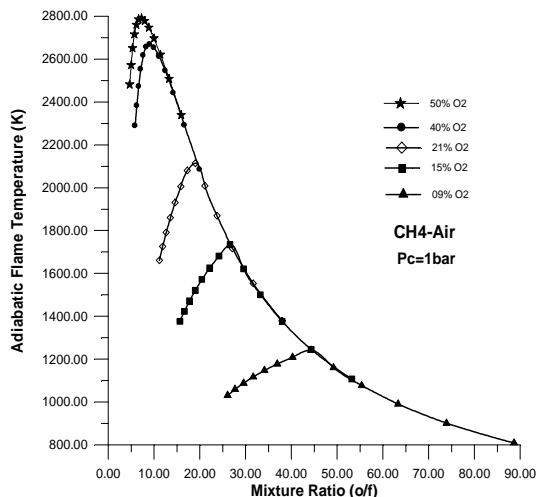


FIG.4 Influence de la composition de l'air sur la stœchiométrie de combustion

Ce comportement justifie l'utilisation d'un co-flow chaud (réinjection des gaz brûlés) dans le but de réduire la température de flamme adiabatique.

Dynamiquement, on note l'existence d'une zone de recirculation pariétale, qui est en fait une

conséquence du cisaillement entre le jet central froid tendant à s'épanouir et le co-courant chaud injecté parallèlement à l'axe du four (figure 5).

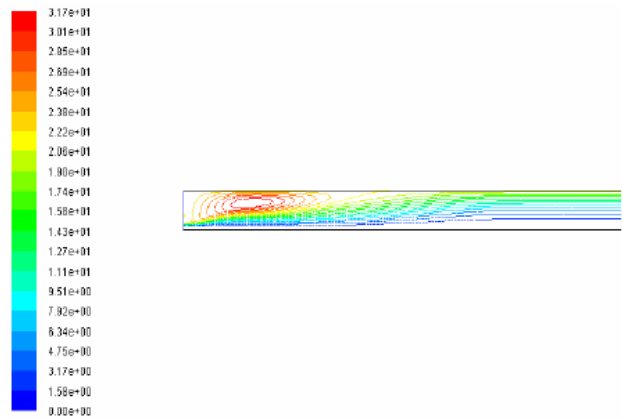


FIG.5 Contour spatial des lignes de courant

Cette zone a pour effet d'entraîner le combustible vers le courant comburant ce qui donnera naissance à une flamme proche de la paroi, du moment que la combustion est sensée être contrôlée par la turbulence (Eddy Break-up).

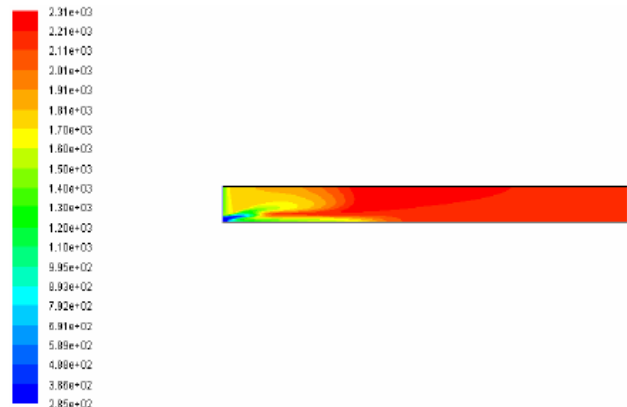


FIG.6 Champ de la température statique

La température statique atteint un maximum en cette zone (figure 6) située à une distance axiale de l'injecteur avoisinant 30 mètres, celle-ci étant proche de l'estimation (25 mètres) de l'étendue de la zone d'instabilités aérodynamiques où la chute du revêtement a été notée [Nial (2007)].

La production la plus significative du NO est notée en une zone « liftée » et localisée à 25 mètres de l'entrée du four. C'est la zone où la température est élevée (figure 7) et les fractions massiques de l'azote moléculaire (N₂) et de l'oxygène sont importantes.

La distribution radiale du taux de NO à la sortie (quantifiée en ppm) observe (figure 8) une tendance quasi-uniforme avoisinant les 1750 ppm, celle-ci étant légèrement supérieure (de 5%) à la valeur mesurée (1670 ppm) par le capteur installé en sortie du four [Mokhtardidouche *et al.* (2008)]

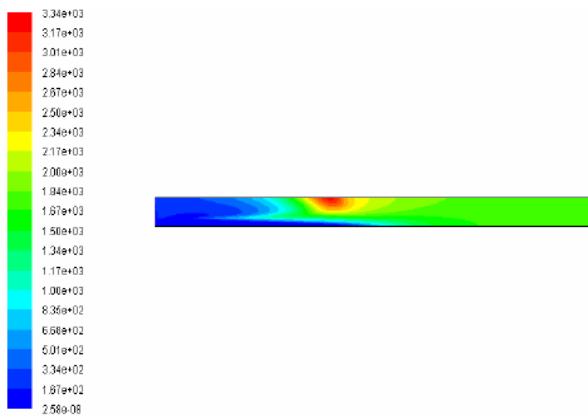


FIG.7 Contour spatial de la fraction massique (ppm) du NO

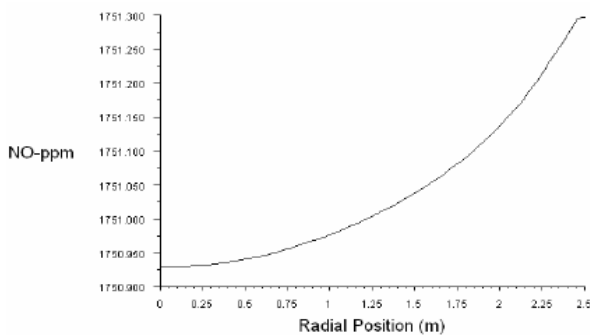


FIG.8 Profil radial du NO dans le plan de sortie du four

Il est évident que la température de l'air récupéré du refroidisseur (air secondaire) varie en fonction du débit et la qualité de la matière cuite (clinker), cette dernière causant des transferts de chaleur (endothermiques puis exothermiques) avec le fluide environnant. En l'occurrence, il est intéressant d'analyser l'effet de l'ambiance thermique des gaz brûlés sur le niveau des émissions polluantes en sortie du four.

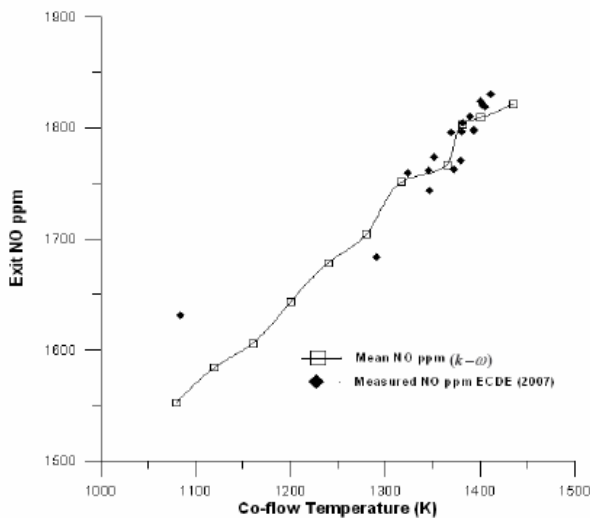


FIG.9 Effet de la température de l'air secondaire sur le taux d'émissions

La confrontation entre les résultats de la simulation numérique et les mesures relevées sur le site de la cimenterie (figure 9) est assez satisfaisante vers les températures de l'air secondaires supérieures à 1300K [Mokhtardidouche *et al.*(2008)]. Une dispersion est visible (figure 9) en dessous de la valeur 1300K, chose qu'on peut justifier par une surestimation (dans le modèle numérique) de la température à cause du caractère complet de la combustion et de l'adiabacité imposée aux parois du four. La quantité de chaleur négligée dans cette considération est compensée par l'élévation de la température du co-flow (air secondaire).

Un comportement antagoniste est observé quant au taux de pollution au niveau de la sortie et l'efficacité de la combustion, représentée par le facteur OTDF (figure 10)

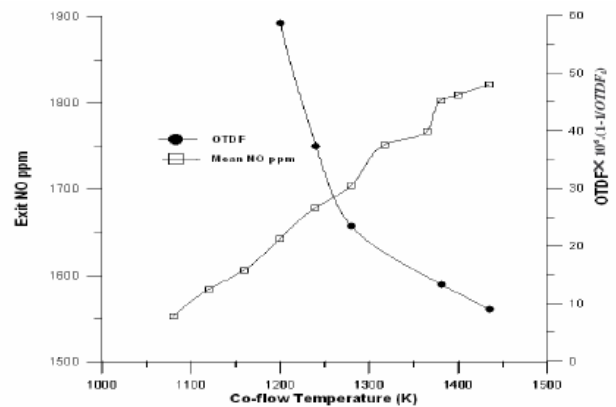


FIG.10 Taux d'émissions et facteur OTDF en fonction de la température du co-flow

En effet, il est important de noter que toute diminution de la température du co-flow, entrainera un affaiblissement du niveau de pollution en sortie du four (figure 10), cependant, le facteur de distribution de température se trouvera nettement augmenté, ce qui affecte considérablement l'efficacité de la combustion. En plus, la température des gaz brûlés lors de leur réintroduction dans le four n'est pas prévisible a-priori. De ce fait, il est judicieux de maintenir (pour l'air secondaire) un seuil thermique capable d'assurer une bonne efficacité de combustion tout en agissant sur d'autres paramètres (aérodynamiques, par exemple) afin de faire abaisser le niveau du NO en sortie du four.

Les jets « viciés » résultent de l'application d'un mouvement se développant en spirales, une composante de vitesse swirlée étant imposée par l'utilisation d'une entrée axiale et d'une entrée tangentielle. Un tel écoulement peut être caractérisé par le rapport du débit de quantité de mouvement de rotation G_{ϕ} au débit de quantité de mouvement axiale G_x .

Il en résulte un nombre sans dimension nommé S_0 qui s'écrit comme:

$$S_0 = \frac{\int_{R_0}^{R_1} W.r.(\rho U).rdr}{(R_1 - R_0) \int_{R_0}^{R_1} U.(\rho U).rdr} \quad (4)$$

Par ailleurs, les études expérimentales [Giannadakis *et al.*(2007)] montrent que l'utilisation du swirl dans un brûleur à flamme de diffusion peut conduire à une réduction des émissions de polluants et notamment celle des oxydes d'azote par le bais de l'amélioration de la qualité du mélange. De plus, le fait d'augmenter le nombre de swirl revient à diminuer le temps de séjour dans les zones chaudes du fait des fortes vitesses dans la zone de recirculation, ceci a également pour effet de limiter la production de NOx. Ces résultats conduisent naturellement à penser que l'on a intérêt à faire tourbillonner le plus possible l'écoulement.

Dans ce contexte, on se propose d'imposer un tourbillonnement à l'écoulement de l'air primaire en analysant la répercussion résultante sur la dynamique du jet et sur le niveau des émissions en sortie du four.

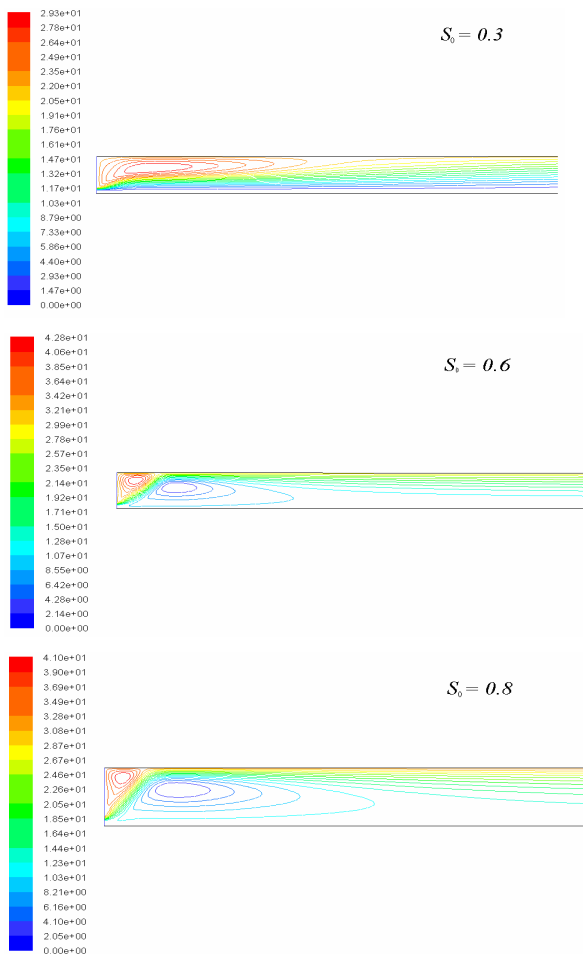


FIG.11 Effet du swirl sur le développement des zones de recirculation

En ce qui concerne la dynamique du jet, il est remarqué qu'aux faibles ou modérées intensités du swirl ($S_0 \leq 0.4$) la zone de recirculation centrale s'élargie dans le sens axial. L'accroissement du nombre de swirl au delà de valeur $S_0 = 0.7$ induit une seconde zone de recirculation toroïdale centrale (CTRZ) qui commence à se développer avec apparition de son premier noyau aux valeurs $S_0 = 0.6$ (figure 11). Cette recirculation a pour effet de réduire la longueur de la flamme caractérisée comme la position axiale du maximum de la température statique (figure 12).

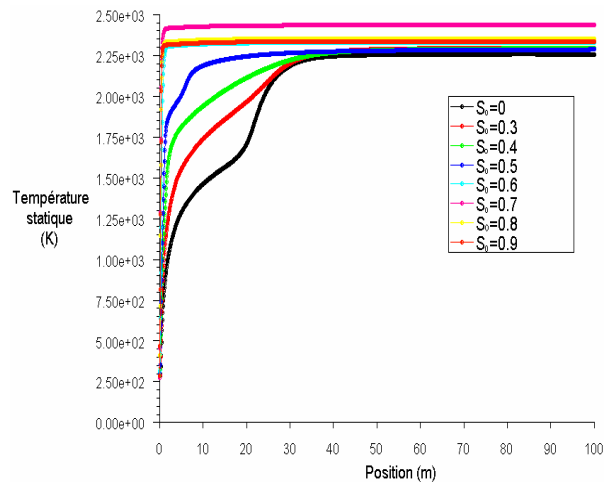


FIG.12 Profil de la température axiale pour différents taux de swirl

En sortie du four, le taux (en ppm) du NO se trouvera aussi diminué lorsque le degré du swirl est élevé, en effet, on note une diminution proche de 60% (figure 13), lorsqu'on passe de l'écoulement cisailé ($S_0 = 0$) à un écoulement à fort taux de swirl ($S_0 = 0.7$).

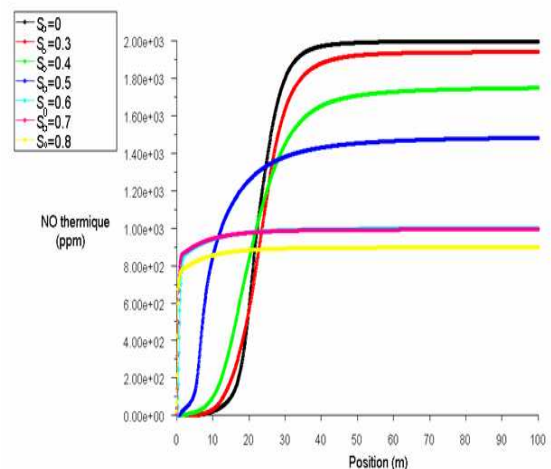


FIG.13 Taux du NO pour diverses valeurs du nombre de swirl

Du point de vue implémentation industrielle, il est important de noter que l'utilisation du swirl requiert de nouveaux dispositifs d'injection (swirler, ailettes à calage variable,...) et par conséquent un investissement supplémentaire. En plus, augmenter le swirl conduit à rapprocher la flamme de la zone de l'injecteur (figure 12) et favorise donc une remontée de la flamme (cas d'un prémélange local), voire son accrochage sur les lèvres de l'injecteur [Williams (1985)]. Les risques d'endommagement des installations sont donc très présents dans ce cas de figure.

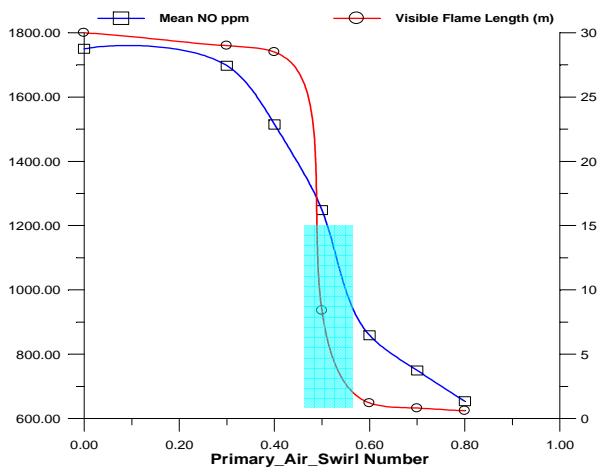


FIG.14 Taux d'émissions et longueur de flamme en fonction du nombre de swirl

En l'occurrence, il est nécessaire de trouver une intensité du swirl qui réalise un compromis entre le niveau de pollution en sortie du four et la distance de la flamme à l'injecteur. La figure 14 montre qu'il est possible d'arriver à une flamme relativement distante (de dix mètres) de l'injecteur sans que le niveau du NO en sortie ne dépasse les 1200 ppm.

C'est ainsi que la configuration avec un nombre de swirl proche de la valeur $S_0 = 0.5$ représente une solution qui réduit de 28% le taux d'émissions par rapport à la configuration sans swirl.

5 Conclusion

Les rejets des polluants de type NOx issus des systèmes de combustion sont strictement réglementés, par de même, les industriels doivent introduire le paramètre environnemental dans leur politique de production. Une bonne et rigoureuse analyse des écoulements réactifs dans les fours peut permettre une meilleure prédiction du niveau des rejets polluants et par conséquent, contribue au développement des techniques de réduction.

Ces mêmes techniques, bien que classiques dans la plupart des cas, ne sont réellement appliquées qu'à des phases d'avant projets ou de premiers montages.

En effet, appliquer une technique de dépollution quelconque peut affecter la qualité du ciment et

nécessite parfois l'interruption du processus de production.

De ce fait, les techniques de réduction doivent avant tout être simulées numériquement ou testées expérimentalement sur des échelles réduites.

Dans ce travail, on s'intéresse à la combustion turbulente dans une flamme non-prémélangée (de diffusion) simulée avec une chimie à une étape, une turbulence standard ($k - \omega$) et un modèle algébrique pour l'interaction chimie-turbulence. Un modèle de type ordonnées discrètes (DO) a été adopté pour prendre en compte les pertes par radiation dans le bilan thermique global.

On s'intéresse aussi à la longueur de flamme visible pour un rapport de mélange donné, au contrôle de la distribution de la température à la sortie du four et au taux de production du NO et sa relation avec l'efficacité de la combustion.

La simulation montre que la longueur de flamme visible et la distribution de la température dépendent fortement des caractéristiques de la turbulence et sont assez bien captées. Cependant, la combustion sous les conditions de fonctionnement actuelles du four, présente un niveau élevé d'émissions qui peut être réduit par un tourbillonnement de l'air primaire, sans que l'efficacité de la combustion soit altérée.

Références

- Bastier, R., Bocan, A., Gilbert, B., Regnault, A., 2004, Fours de cimenterie, Techniques de l'Ingénieur, Fascicule BE, 8,844.
- Elichegaray, C., 2004 La pollution atmosphérique, Actes de l'école d'été de combustion, Oléron, France.
- Faivre, V., 2003 Etude expérimentale et numérique du contrôle actif de jets dans les chambres de combustion, Thèse de doctorat de l'institut polytechnique de Toulouse, Toulouse, France.
- Fluent V6.3.26, 2006 The software Package, *Fluent Inc*, New Hampshire, USA.
- Giannadakis, A., Perrakis, K., Romeos, A., Panidis, Th, 2007, Characteristics of recirculating swirl flows, 3^{ème} Congrès Européen de Combustion (ECM), Crete, Grèce.
- Lipatnikov, A.N., Nazarov, I.P., Prostov, V.N., 1988 Nitrogen oxide formation in flame at slight deviations from equilibrium. *Combustion explosion and shock waves*, 24-4, 407-409.
- Magnussen, B.F., Hjertager, B.H., 1976 On mathematical models of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion, The international symposium on combustion, Pittsburg, USA.
- Mokhtardidouche, A., Benarous, A., Loukarfi, L., Nial, M., 2007 Numerical investigation of the NO Production in an Industrial Furnace, Conférence internationale sur l'énergétique et la pollution, Constantine, Algérie.
- Mokhtar didouche, A., 2008 « Prédiction des émissions polluantes issues d'un four industriel : Cas de la

cimenterie de Chlef », Mémoire de Magister, Département de mécanique, UHB, Chlef, Algérie.

Mokhtardidouche, A., Benarous, A., Loukarfi, L., 2008 CFD Modeling of a Furnace Pollutants Emissions International Conference on Modeling and Simulation Port Said, Egypte.

Nial; M., 2007 «Caractérisation des paramètres de stabilisation d'une flamme de brûleur industriel : Application aux fours de cimenteries », Mémoire de Magister, Département de mécanique, UHB, Chlef, Algérie.

Pesenti, B., 2006 «Caractérisation numérique et expérimentale d'un brûleur à gaz à swirl variable : Longueur de flamme, transfert thermique et production de NO_x », Thèse de Doctorat en Sciences appliquées, Faculté polytechnique de MONS, Bruxelles, Belgique.

Taine, J., Soufiani, A. 1999 «Micro scale aspect of thermal radiation transport and laser application», *Advances in heat transfer*, **33**, 295-414.

Tomlin, A.S., 2007 Can combustion technologies reduce our impact on both the global climate and local air quality, 3^{ème} Congrès Européen de Combustion (ECM), Crete, Grèce.

Williams, F.A., 1985 Combustion theory, Addison-Wesley Press, London, UK.

Nomenclature

G_ϕ, G_x	Quantité de mouvement de rotation, axiale
k	Energie cinétique de turbulence
r	Cordonnées radiale
R_0	Rayon externe de l'injecteur du combustible
R_1	Rayon interne du canal de l'air primaire
S_0	Nombre de swirl
T	Température
U	Composante axiale de la vitesse moyenne
W	Composante radiale de la vitesse moyenne
<u>Symboles grecques</u>	
ε	Taux de dissipation de k
ω	Taux de dissipation spécifique de k
ρ	Masse volumique
<u>Indices</u>	
<i>Exit</i>	Quantité évaluée au plan de sortie du four
<i>Inlet</i>	Quantité évaluée au plan d'injection du four
<u>Exposants</u>	
<i>Max</i>	Valeure maximale
<u>Autres</u>	
< >	Valeur moyenne pondérée par le débit massique
<u>Acronymes</u>	
CFD	Computational Fluid Dynamics
CTRZ	Central Toroidal Recirculation Zone
DO	Discrete Ordinate (modèle)
ECDE	Entreprise des Ciments et Dérivées
OTDF	Overall Temperature Distribution Factor
Pdf	Probability Density Function
RTE	Radiative Transfer Equation
SNCR	Selective Non Catalytic Reduction