

Etude numérique de l'écoulement réactif dans une chambre de combustion d'une turbine à gaz : Effet de la présence du système de refroidissement sur les champs thermique et dynamique à l'intérieur de la chambre.

Ahlem BEN SIK ALI¹, Wassim KRIAA¹, Hatem MHIRI¹

Georges LE PALEC², Philippe BOURNOT²

¹Unité de Thermique et Thermodynamique des Procédés Industriels, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, Route de Ouardanine 5000 MONASTIR (TUNISIE)

²IRPHE, UNIMECA 60 rue Juliot Curie Technopôle de Château-Gombert 13453 MARSEILLE Cedex 13 (FRANCE)

Résumé – Dans ce travail on se propose d'étudier numériquement un écoulement réactif au sein d'une chambre de combustion d'une turbine à gaz d'une centrale thermique. Cette chambre est constituée de deux principaux composants : l'injecteur de combustible et le tube de flamme. Le tube de flamme est formé d'un tube cylindrique muni de plusieurs trous de différentes dimensions. Certains trous ont pour rôle d'alimenter la chambre par l'air nécessaire à la combustion puis à la dilution de la flamme, les autres ont pour rôle de refroidir les parois de la chambre et de les protéger des gaz chauds de combustion. Les différentes simulations numériques ont permis de conclure sur l'effet de la présence du système de refroidissement sur les champs thermique et dynamique à l'intérieur de la chambre (comparaison entre deux cas : tube de flamme avec et sans trous de refroidissement)

1. Introduction

La simulation numérique des écoulements dans les turbines à gaz est devenue une voie incontournable pour accélérer la conception de ce type de moteurs modernes et optimiser leurs performances : diminution de la consommation de carburant, réduction de la pollution atmosphérique et sonore, éviter les instabilités de combustion... Les calculs facilitent également la compréhension et la visualisation des phénomènes physiques souvent inaccessibles par les mesures.

La distribution de la température sur les parois du tube de flamme d'une chambre de combustion d'une turbine à gaz est fortement affectée par la combustion, le rayonnement et l'écoulement. L'interaction entre ces facteurs influents forme un système d'accouplement.

L'objectif principal de ce travail est de simuler numériquement un écoulement réactif turbulent. La chambre de combustion étudiée est celle de la turbine à gaz de la centrale thermique de Sousse. Ce travail a été développé pour calculer la distribution de la température au niveau des parois du tube de flamme ainsi que le champ d'écoulement à l'intérieur et en dehors de ce dernier. Dans le calcul, la combustion, le rayonnement thermique, le film d'air de refroidissement et les jets d'air primaire et secondaire se mélangeant à l'intérieur du tube de flamme aussi bien que l'air périphérique coulant en dehors du tube de flamme ont été simulés. Les différentes simulations ont été réalisées à l'aide du code de calcul « Fluent ». La construction du modèle géométrique, du maillage et des conditions aux limites ont été effectuées par le préprocesseur « Gambit ».

2. Description du problème

La chambre de combustion étudiée dans ce projet est l'une des quatorze chambres de combustion constituant le système de combustion de la turbine à gaz de la centrale thermique de Sousse. Ces principaux composants sont l'injecteur et le tube de flamme (Figure 1).

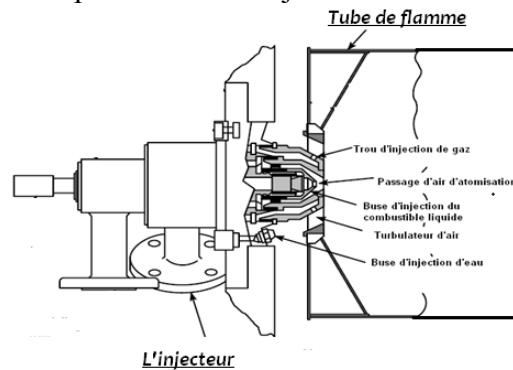


Figure 1. Chambre de combustion étudiée

2.1. L'injecteur

La chambre de combustion est pourvue d'un injecteur du type dual qui pulvérise une quantité calibrée de combustible dans le tube de flamme (figures 2 et 3). Cet injecteur est composé principalement d'un turbulateur d'air d'atomisation du combustible liquide et d'un turbulateur de d'air de combustion. Les deux combustibles, gaz et liquide peuvent être brûlés simultanément dans le cas d'un injecteur dual, le pourcentage de chaque combustible étant déterminé par l'opérateur. Dans notre étude, on s'intéresse au cas de fonctionnement avec le combustible gazeux uniquement puisque c'est le mode de fonctionnement utilisé pour la turbine de la centrale thermique de Sousse.



Figure 2. Le turbulateur d'air de combustion



Figure 3. Vue interne du turbulateur d'air de combustion

2.2. Le tube de flamme

Le tube de flamme est donné sur la figure 4, il est formé par un tube cylindrique de diamètre égal à 360mm et de longueur 1m. Ce tube est percé de trous de différentes tailles selon la zone. L'air circule d'avant en arrière à l'extérieur du tube de flamme. Il pénètre dans la zone de réaction de la chambre de combustion à travers le turbulateur et à travers des séries de trous calibrés, percés dans le chapeau (90 trous de diamètre 4mm) et dans le tube lui-même (24 trous de diamètres variant entre 40 et 30 mm). Les gaz chauds se propagent ensuite vers une zone de tranquillisation et une zone de dilution où s'effectue un apport d'air supplémentaire. Des trous de dilution (4 trous de diamètre 60mm) permettent le passage du volume d'air correct destiné au refroidissement afin de limiter la température des gaz chauds à

l'entrée de la première directrice. Le tube de flamme est percé de 3292 trous de diamètre variant entre 3 et 4 mm répartis sur 21 rangés. Ces trous sont destinés au refroidissement des parois du tube, ils assurent la formation d'un film d'air relativement plus froid le long des parois et du chapeau du tube de flamme.

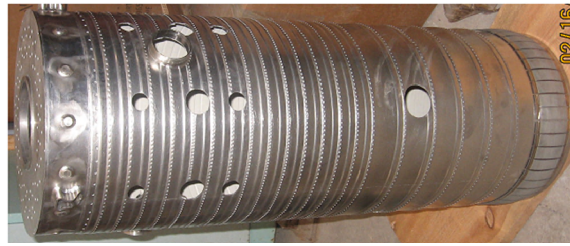


Figure 4. Le tube de flamme

3. Modélisation numérique du problème

3.1. Modélisation géométrique de la chambre de combustion

Le logiciel « Gambit » a été utilisé pour la construction (figures 5 et 6) et le maillage des différentes parties de ce domaine. Un maillage tétraédrique non-structuré a été utilisé dans les zones proches des parois trouées et au niveau de l'injecteur. Chaque surface de trou des 3292 trous de refroidissement est subdivisée en 5 sous domaines. En effet, vue la complexité de la géométrie dans ces zones, l'utilisation des cellules hexaédriques devient impossible. Dans le reste du domaine des cellules hexaédriques ont été préférées aux tétraèdres pour assurer la création d'un maillage aussi régulier que possible. Le maillage généré comprend 829 000 volumes de contrôle.

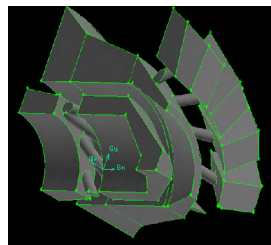


Figure 5. Construction du domaine d'injection sur Gambit (Le 1/4 du domaine)

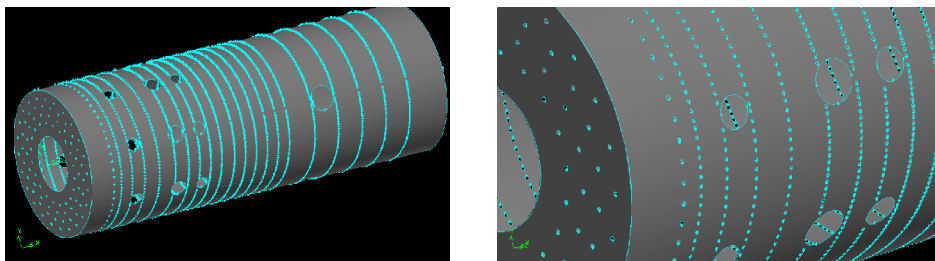


Figure 6. Construction du tube de flamme sur Gambit

3.2. Modélisation physique du problème

Le couplage entre la turbulence de l'écoulement et la réactivité du système, imposée par les réactions de combustion, est traité par le *Modèle Eddy Dissipation* (EDM) [1]. La turbulence est modélisée par le schéma classique $k-\varepsilon$, faisant intervenir les équations de transport de l'énergie cinétique et de sa dissipation [2].

Pour la résolution de l'équation des transferts radiatifs on a adopté la *méthode des ordonnées discrètes* appartenant à la famille des méthodes à flux [3] et considérée comme plus appropriée pour le traitement des problèmes des chambres de combustion.

Les différentes espèces chimiques prises en compte pour les calculs d'équilibre sont : CH_4 , CO_2 , H_2O , et O_2 . La réaction chimique stœchiométrique utilisée est la suivante :

$$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$$

3.3. Conditions aux limites

Le système étudié présente trois entrées de fluides où on a imposé pour chacune une condition de type Mass flow Inlet.

- Entrée de gaz : Le gaz entre avec un débit de 0.5 kg/s et sous une pression de 23 bars et une température de 40°C avec une direction normale à la section d'entrée.
- Entrée de l'air d'atomisation : L'air entre avec un débit de 0.1 kg/s et sous une pression de 14.5 bars de direction normale à la section d'entrée.
- Entrée de l'air combustion : L'air de combustion entre dans le domaine avec un débit de 26 kg/s et sous une pression de 10.2 bars.

La chambre de combustion ne possède qu'une seule sortie où on a imposé une condition aux limites de type Outflow. La symétrie périodique de rotation des différents composants de la chambre de combustion par rapport à son axe a permis de limiter le calcul à un secteur de 90° de la totalité du domaine. Les plans de symétrie limitant le domaine de calcul sont traités comme une symétrie périodique de 90°. Les parois extérieures du domaine sont supposées adiabatiques.

4. Résultats et interprétations

Pour étudier l'effet de la présence du système de refroidissement sur les champs thermique et dynamique à l'intérieur de la chambre, on a simulé l'écoulement réactif dans cette dernière (*en adoptant les mêmes conditions aux limites*) pour les deux cas suivants :

- Cas 1 : Tube de flamme sans trous de refroidissement
- Cas 2 : Tube de flamme avec trous de refroidissement

4.1. Effet de la présence du système de refroidissement sur le champ thermique sur les parois du tube de flamme

Les courbes de variation de la température sur les parois du tube en fonction de la position x pour les deux cas considérés sont données sur la figure 7. En absence du système de refroidissement la température sur les parois du tube de flamme peut atteindre des valeurs très élevées de l'ordre de 2000K. Une telle température ne peut pas être supportée par aucun type de matériau. On peut donc conclure que le tube de flamme ne peut pas résister à cette température et par conséquent il ne peut pas exister sous cette forme. Il doit donc être indispensablement équipé par une technique qui assure son refroidissement.

Dans le deuxième, cas on a pris en considération le système de refroidissement du tube basé sur une distribution d'un grand nombre de trous de très faibles diamètres. Pour ce cas, la température maximale atteinte sur le tube n'a pas dépassé 1650K. Cette température est inférieure à celle atteinte dans le premier cas et l'écart est de l'ordre de 350K. Cette valeur met en évidence l'efficacité de la technique de trous de refroidissement adoptée pour la protection du tube.

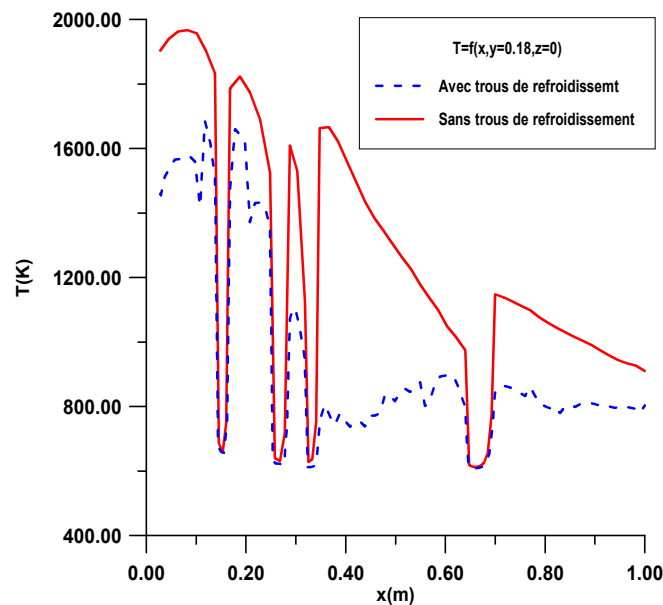


Figure 7. Evolution de la température sur la paroi du tube de flamme en fonction de x pour $y=0,18$ et $z=0$. Cas sans et avec système de refroidissement.

4.2. Effet de la présence du système de refroidissement sur le champ thermique et dynamique à l'intérieur du tube de flamme

La figure 8 présente les contours de température dans un plan de symétrie périodique de la chambre de combustion. On remarque que les champs de température sont très différents pour les deux cas (sans et avec refroidissement). Cette différence peut être expliquée par le fait que le débit d'air qui passe par les trous de refroidissement a une influence sur les champs dynamique et de concentrations des espèces et par la suite il aura nécessairement une influence sur le champ thermique. En effet, comme la chambre de combustion étudiée est du type flux inversé, (L'air circule de l'arrière vers l'avant à l'extérieur du tube de flamme vers le chapeau du tube de flamme. Il pénètre dans la zone de réaction de la chambre de combustion à travers un turbulateur et des séries de trous calibrés, percés dans le chapeau et dans le tube lui-même), la quantité d'air qui parviendra au turbulateur sera donc plus petite dans le cas où le tube est muni de trous de refroidissement, vu qu'un débit d'air va pénétrer dans la chambre à travers ces trous. On aura donc des champs de vitesse et de concentrations différents et par conséquent il y aura obligatoirement une modification dans le champ thermique comme le montre la figure 8.

Etant donné que le nombre de Swirl dépend des vitesses axiales et azimutales, on aura donc deux nombres de Swirl différents pour les deux cas. D'après la figure 9 on remarque que la zone de recirculation interne est plus étendue dans le premier cas. La taille et la position de cette zone de recirculation varient avec l'intensité du Swirl [4] [5]. En effet, si l'intensité du Swirl est suffisamment forte, une zone de recirculation va apparaître. Ainsi comme le montre

la figure 10 (Beér et Chigier [4]) à chaque réponse de l'écoulement au Swirl correspond un type de flamme.

La figure 9 montre que le nombre de Swirl est plus grand dans le premier cas, ce qui a pour conséquence une flamme plus courte comme le montre la figure 8. La flamme dans le premier cas est de type C selon la classification de (Beér et Chigier, figure 10) tandis qu'elle est de type B pour le cas avec trous de refroidissement.

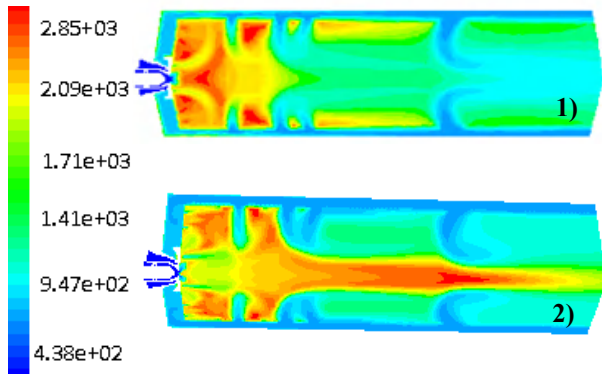


Figure 8 : Contours de température dans un plan de symétrie périodique pour les cas : 1) sans trous de refroidissement et 2) avec trous de refroidissement

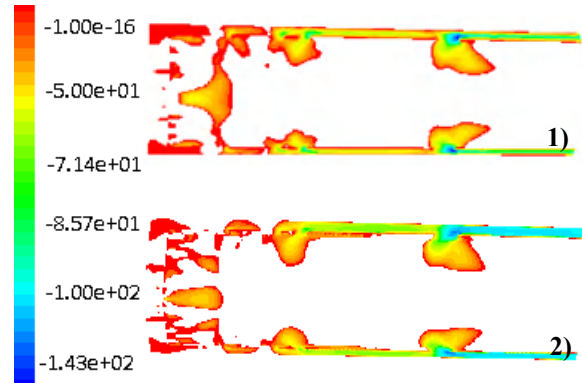


Figure 9 : Contours des zones de recirculation dans un plan de symétrie périodique pour les cas : 1) sans trous de refroidissement et 2) avec trous de refroidissement

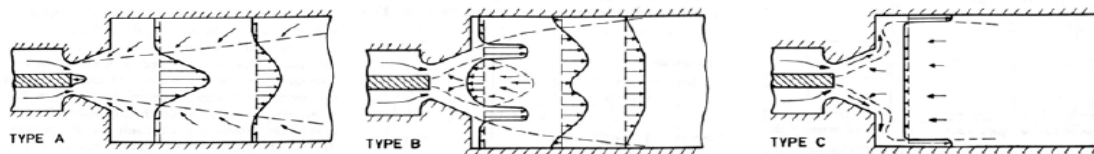


Figure 10. Différents types de jets et flammes swirlés (Beér, 1972)

5. Conclusion

Le but du présent travail était d'étudier l'effet de la présence du système de refroidissement du tube de flamme sur l'écoulement réactif à l'intérieur de la chambre de combustion d'une turbine à gaz industrielle. Pour ce faire, on a simulé l'écoulement réactif en négligeant ce système puis en le prenant en considération en utilisant comme outil le code de calcul industriel Fluent. La comparaison entre les résultats obtenus pour les deux cas a montré que le système de refroidissement est capable de protéger efficacement le tube de flamme contre les produits chauds de combustion et que sa présence modifie considérablement la forme de la flamme.

Références

- [1] J. Warnatz, U. Mass, and R. W. Dibble. Combustion. Springer, Heidelberg, 2d edition, 1999
- [2] Hinze. Turbulence. McGraw-Hill Publishing Co., New York, 1975
- [3] Fluent Inc. Fluent 6. User's guide, 2001. Chapter 11 : Modeling Heat Transfer
- [4] Beér, J. M. & Chigier, N. A., "Swirling Flows" in Combustion Aerodynamics. Edited by (Krieger, Malabar, Florida, 1972), 100-146.],
- [5] Leuckel, W. & Fricker, N. "The characteristics of swirl-stabilized natural gas flames. Part I : Different flame types and their relation to flow and mixing patterns", Journal of the Institute of Fuel, 103-112