

Etude du système de refroidissement de la chambre de combustion d'une micro-turbine à gaz par simulation numérique

B. KHELIDJ, A. KELLACI, R. MAZOUZI, A. KARAS, M. HARIZI

Université de Khemis Miliana, Laboratoire FIMA, Algérie

E-mail: b.khelidj@orange.fr ; a.kellaci@yahoo.fr

r_mazouzi@yahoo.fr; akaras@yahoo.fr; harizi@yahoo.fr

Résumé : Susceptibles d'atteindre leur puissance maximale en quelques secondes, les turbines à gaz sont des équipements très pratiques et très économiques, que ce soit en matière de production d'électricité et de chaleur ou en matière de transport du pétrole et du gaz. La conception d'une turbine à gaz, qui remplit des exigences posées en termes de rendement, de fiabilité et de respect de l'environnement, passe nécessairement par celle de la chambre de combustion. Dans ce travail on se propose d'étudier un écoulement réactif au sein d'une chambre de combustion d'une micro-turbine à gaz. Le tube de flamme est muni de plusieurs trous. Certains ont pour rôle d'alimenter la chambre par de l'air primaire nécessaire à la combustion et de l'air secondaire pour une combustion complète. Les autres ont pour rôle de refroidir les parois de la chambre afin de les protéger des gaz chauds. Les différentes simulations ont permis de conclure sur l'effet de la présence ou non du système de refroidissement sur les différents paramètres dans le cas d'une paroi de tube de flamme non adiabatique.

Mots clés : Combustion, micro-turbine à gaz, simulation numérique, système de refroidissement, paroi non adiabatique.

1. Introduction

La simulation numérique des écoulements, dans les chambres de combustion et en particulier dans celles des turbines à gaz, est devenue une voie incontournable pour une meilleure conception de ce type de moteurs afin d'optimiser leurs performances: diminution de la consommation de carburant, réduction des polluants atmosphériques et du bruit, empêchement des instabilités de combustion. La simulation facilite également la compréhension, par la visualisation, des phénomènes physiques souvent inaccessibles par la mesure et qui se développent dans une chambre de combustion [1] [2] [3]. Dans ce travail on se propose d'étudier numériquement un écoulement réactif au sein d'une chambre de combustion d'une micro-turbine à gaz. Le cas étudié est celui d'une flamme de diffusion non pré-mélangée, d'un jet coaxial de « CH₄/ air » dans une chambre de combustion cylindrique. Les différentes simulations ont été réalisées à l'aide du code de calcul commercial, «Fluent».

2. Les systèmes de refroidissement par air

Les techniques de refroidissement par air ont évolué au cours de ces dernières années, mais le principe est resté inchangé : il s'agit d'utiliser l'air présent autour du tube de flamme, en l'injectant à l'intérieur. La température de cet air de refroidissement est de l'ordre de 300 à 500 K suivant les moteurs et les régimes de fonctionnement. L'air injecté forme autour de la paroi un film de protection aérodynamique qui isole la partie solide des gaz chauds. A l'origine, l'air de refroidissement était injecté par de simples fentes. Les évolutions technologiques ont consisté à rechercher des systèmes plus efficaces pour injecter cet air et maximiser les échanges entre l'air frais et la paroi [4]. Différents systèmes de refroidissement ont été mis au point par les constructeurs. La figure (1) présente les schémas de quelques-uns de ces systèmes.

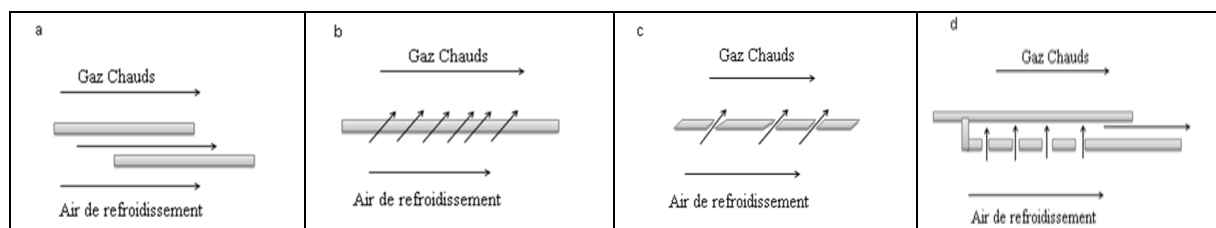


Figure 1: Exemples de systèmes de refroidissement

3. Description de la chambre de la micro turbine

La chambre de combustion de la micro turbine utilisée est schématisée sur la figure (2). Elle est du type circulation inversée et montée tangentielle [5]. Elle comporte un seul injecteur, une bougie d'allumage et un tube de flamme. A l'entrée de la chambre de combustion l'air arrive à une température de $T_2 = 379$ K. Une partie de cet air et qui est l'air primaire, passe par les orifices "2" vers la zone de la flamme "3", où le combustible est pulvérisé par l'injecteur. L'allumage sera ensuite effectué par une bougie "6" à haute énergie. Dans la zone de la flamme le coefficient d'excès d'air λ atteint des valeurs comprises entre 1.1 et 1.2 et la température des gaz, des valeurs allant de 2273 K à 3273 K. Les gaz de la zone de flamme se mélangent ensuite avec l'air secondaire qui pénètre dans la chambre de combustion par les orifices "4". L'air secondaire diminue la température très élevée des gaz de la zone de flamme. Nous obtenons à la sortie de la chambre et juste à l'entrée du premier étage de la turbine, des fumées "5" à la température $T_3 = 1123$ K.

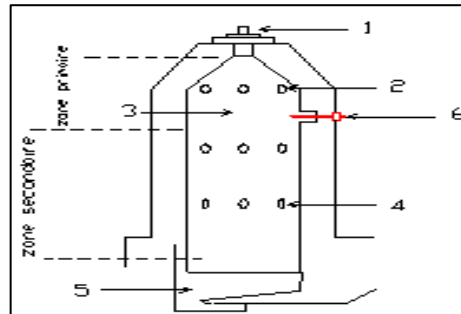


Figure 2 : Schéma de la chambre de combustion de la micro turbine

3.1. Le système d'injection

L'injecteur pulvérise le combustible directement dans la chambre; c'est le moyen le plus couramment employé. Le combustible à haute pression passe dans l'injecteur par une chambre de tourbillonnement et sort animé d'un mouvement de rotation, par un orifice de petit diamètre, où le jet soumis à des forces centrifuges, prend une forme conique et éclate en une pulvérisation plus au moins fine. On augmente ainsi la surface de contact entre le combustible et l'air, ce qui facilite et améliore les réactions de combustion.

3.2. Le tube de flamme

Le tube de flamme de la chambre de combustion est représenté sur la figure (3). Il est formé d'un cylindre de diamètre égal à 120 mm et de longueur 350 mm. Ce tube est percé de trous de différentes tailles selon la zone. L'air circule du bas vers le haut à l'extérieur du tube de flamme. Il pénètre dans la zone de réaction de la chambre de combustion, percée dans sa partie supérieure, côté injecteur ou côté « chapeau », de 48 trous de diamètre 3 mm et sur le tube lui-même de 12 trous de diamètre 8 mm. Les gaz chauds se propagent ensuite vers une zone de tranquillisation et une zone de dilution où s'effectue un apport d'air secondaire pour l'obtention d'une combustion complète d'une part et la diminution de la température des gaz de combustion d'autre part.

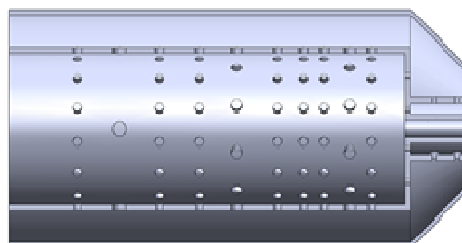


Figure 3 : Le tube de flamme de la micro turbine à gaz

Le tableau (1), ci-dessous, donne le nombre de trous et leur diamètre pour chaque zone du tube de flamme de la micro turbine à gaz.

Tableau 1 : La répartition des trous et leur diamètre

Zone		Chapeau			Zone primaire		Zone secondaire	
Nombre des trous		48			24		4	
Diamètre (mm)		3			8		12	
Rang	1	2	3	4	5	6	7	
Nombre des trous	14	14	14	14	14	14	14	
Diamètre (mm)	3	3	3	3	3	3	3	

Les trous de dilution au nombre de quatre de diamètre 12 mm, permettent le passage du volume d'air correct destiné au refroidissement afin de limiter la température des gaz chauds à l'entrée du premier étage de turbine. Le tube de flamme est percé de 98 trous de diamètre 3 mm répartis sur 7 rangés. Ces trous sont destinés au refroidissement des parois du tube de flamme.

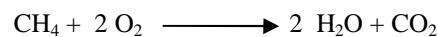
4. Modélisation numérique du problème

4.1. Modélisation de la géométrie de la chambre

La création de la géométrie du tube de flamme ainsi que son maillage sont fait sous le progiciel "Gambit". C'est une géométrie complexe, pour cela il existe plusieurs méthodes pour la créer, soit on utilise les géométries prédéfinies ou bien on crée le volume à partir des points, des lignes, des surfaces, et puis le volume comme représenté sur la figure (4). La complexité géométrique de la configuration nous a incités à utiliser un maillage tétraédrique, non-structuré dans tout le domaine simulé.

4.2. Modélisation physique du problème

Le couplage entre la réactivité et la turbulence de l'écoulement, imposée par les réactions de combustion, est traité par le Modèle Eddy Dissipation (EDM) [6]. La turbulence est modélisée par le modèle, k-ε faisant intervenir les équations de transport de l'énergie cinétique et de sa dissipation [7]. Nous avons adopté la méthode "Discrete Transfer Radiation Model (DTRM)" pour la résolution de l'équation des transferts radiatifs [8]. Les différentes espèces chimiques prises en compte sont : CH₄, CO₂, H₂O et O₂. La réaction chimique stœchiométrique utilisée est la suivante :



4.3. Conditions aux limites

Le système étudié présente deux entrées de fluides où nous avons imposé pour chacune d'elles une condition de type "Velocity Inlet".

- Entrée du gaz combustible : Entrée avec une vitesse de 246 m/s et une température de 300 K.
- Entrée de l'air : Entrée avec une vitesse de 142.21 m/s et une température de 379 K. La chambre de combustion ne possède qu'une seule sortie où on a imposé une condition aux limites de type "Pressure Outlet" de 3.52 bar et une température de 1123 K. Les parois du domaine sont supposées adiabatiques.

5. 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 de combustion, on a simulé l'écoulement réactif dans cette dernière pour les deux cas suivants: Tube de flamme sans trous de refroidissement et Tube de flamme avec trous de refroidissement. L'étude a été faite en supposant que le régime est permanent, en choisissant le modèle 3D et en utilisant les modèles d'Eddy Dissipation, de turbulence k-ε et de rayonnement DTRM.

5.1. Evolution spatiale de la température de paroi du tube

La figure (4) montre l'évolution spatiale de la température du tube de flamme suivant la direction axiale, pour deux cas (avec et sans présence du système de refroidissement). Nous pouvons remarquer qu'en l'absence de ce dernier, la température de la paroi du tube de flamme peut atteindre des valeurs très élevées de l'ordre de 2100 K. Une telle température ne peut pas être supportée par la paroi de la chambre de combustion. En revanche, la présence du système de refroidissement fait baisser la température des produits de combustion à une valeur maximale ne dépassant pas les 1600 K. Ces résultats ont été confrontés à ceux trouvés dans la littérature. La comparaison a montré une grande similitude entre nos résultats et ceux trouvés par Ben Sik Ali et al [9].

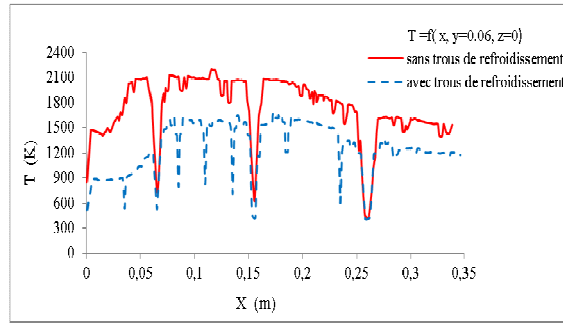


Figure 4 : Évolution axiale de la température de la paroi du tube de flamme

La figure (5), montre la comparaison des distributions des températures tout au long de deux axes de coordonnées respectivement égales à $(x, y = 0 \text{ m}, z = 0.06 \text{ m})$ et $(x, y = 0 \text{ m}, z = 0.0595 \text{ m})$.

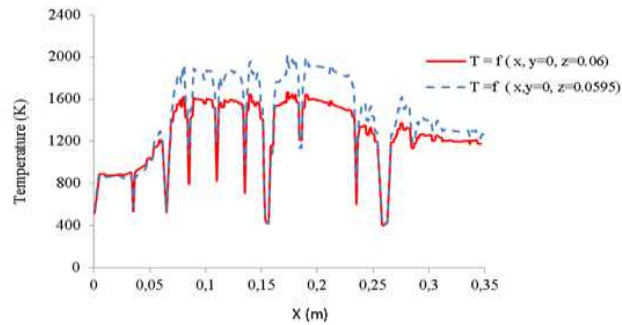


Figure 5 : Évolution spatiale de la température de la paroi du tube

Le premier axe est situé sur la paroi du tube de flamme et le second est parallèle au premier mais distant de 5 mm à l'intérieur du tube de combustion. Nous remarquons que la température sur le deuxième axe peut atteindre 2100 K. Au même endroit sur la paroi du tube de flamme elle ne dépasse pas 1600 K. Cette grande atténuation de la température est due à l'air frais injecté dans le tube de flamme à travers les trous de refroidissement percés sur la paroi.

5.2. Profils de températures

La variation de la température suivant la direction axiale sur les parois du tube de flamme pour les deux cas considérés est montrée sur la figure (6). Quand la paroi du tube de flamme est considéré comme adiabatique, la température sur ce dernier peut atteindre des valeurs très élevées de l'ordre de 2150 K. Dans le deuxième cas, on a pris en considération le transfert de chaleur à travers le tube de flamme, la température maximale atteinte par le tube n'a pas dépassé 1600K. Cette température est inférieure à celle atteinte dans le premier cas et l'écart est de 550 K

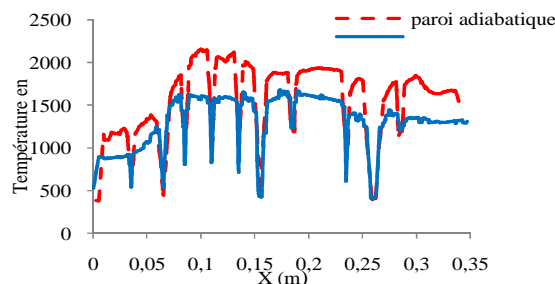


Figure 6 : Évolution de la température axiale de la paroi intérieure du tube de flamme

La figure (7), montre la comparaison des distributions des températures suivant trois axes. Le premier axe est situé sur la paroi intérieure du tube de flamme, le deuxième situé sur la paroi extérieure de ce dernier (tube de flamme), et enfin le troisième, au milieu du tube.

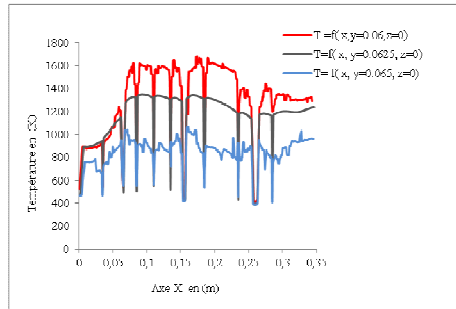


Figure 7 : Évolution de la température axiale du tube de flamme

La température maximale atteinte sur la paroi extérieure du tube de flamme n'a pas dépassé 1150 K. Cette température est inférieure à celle atteinte par la paroi intérieure du tube, l'écart est de l'ordre de 500 K.

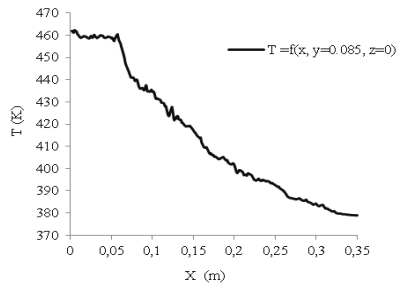


Figure 8: Évolution de la température de l'air en fonction de x

La figure (8) montre l'évolution de la température de l'air de l'entrée de la chambre jusqu'à l'injecteur. Elle passe de 379 K à plus de 460 K ce qui confirme le réchauffement de l'air de combustion.

6. Conclusion

Cette étude sur la simulation numérique des phénomènes de combustion et de refroidissement en régime permanent à l'aide du code de calcul Fluent, montre l'intérêt d'un système de refroidissement adapté à la paroi de la chambre de combustion d'une micro turbine à gaz.

En effet pour apprécier l'influence du système de refroidissement sur les grandeurs calculées, nous avons simulé dans un premier temps un écoulement réactif dans la chambre sans présence du système de refroidissement. Puis, dans un deuxième temps, un écoulement réactif dans la chambre en présence du système de refroidissement.

Les résultats de simulations obtenus sous forme d'évolution spatiale de la température de la paroi du tube, nous ont permis de mieux voir la distribution, dans le tube de flamme de la micro turbine, des températures calculées. On constate que, la présence du système de refroidissement joue bien son rôle de refroidisseur de la paroi du tube de flamme, ce qui donne la possibilité, à ce dernier, de travailler avec des contraintes thermiques moins sévères et que ses caractéristiques physiques restent inchangées.

Références

- [1] G. ALBOUZE, Simulation aux grandes échelles des écoulements réactifs non prémélangés, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, France (2009).
- [2] A. MAMERI. Etude numérique de la combustion turbulente du prémélange pauvre méthane/air enrichi à l'hydrogène. Thèse de doctorat, Université de ORLEANS. France (2009).
- [3] GUPTA, A.K. Gas Turbine Combustion Prospects and Challenges. Energy Conservation Management, Vo1. 38, No. 10 -13, pp. 1311-1318, (1997).
- [4] S. MENDEZ. Simulation numérique et modélisation de l'écoulement autour des parois multi-perforées. Thèse de Docteur de Spécialité Mathématique, Montpellier II (2007).
- [5] B. KHELIDJ. Calcul thermodynamique d'une micro turbine à gaz. USTO, 1982.
- [6] J.WARNATZ, U. Mass, and R. W. Dibble Combustion Springer, Heidelberg, 2d edition, 1999.
- [7] J.O. HINZE, Turbulence, McGraw-Hill Publishing Co., New York, 1975.
- [8] FLUENT Inc. Fluent 6. User's guide, 2001, Chapter 11: Modeling Heat Transfert.
- [9] Ben Sik Ali et al, " Numerical ...", Heat and mass transfer, vol 48, issue 5, pp 779-788, (2012).