

## Simulation numérique du transfert de chaleur dans un moteur-fusée à propergol liquide

B. KHELIDJ <sup>a \*</sup>, S. HEMIS <sup>a</sup>, A. KELLACI <sup>a</sup>, R. MAZOUZI <sup>a</sup>, A.  
KARAS <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Laboratoire FIMA, Université de Khemis Miliana, Algérie

### ARTICLE INFO

#### Article history :

Received September 2014

Accepted January 2015

#### Keywords :

Simulation numérique ;

Transfert de chaleur ;

Combustion ;

Chambre propulsive ;

Système de refroidissement.

### ABSTRACT

Ce travail est une contribution à l'étude du refroidissement d'un moteur-fusée à propergol liquide. En effet pour protéger la paroi de la chambre propulsive, un système de refroidissement est nécessaire, car la température des gaz de combustion du propergol liquide dans la chambre de combustion, est très élevée. C'est pour montrer l'intérêt du refroidissement de la paroi de la chambre propulsive qu'une étude de simulation numérique, des phénomènes de combustion et de refroidissement dans la chambre propulsive, a été réalisée en régime permanent à l'aide du code de calcul Fluent. Les résultats de simulation, notamment ceux relatifs aux températures des parois le long de la chambre propulsive ont été confrontés à ceux trouvés dans la littérature.

©2015 LESI. All right reserved.

## 1. Introduction

La mise au point des différentes configurations de chambres propulsives ainsi que le développement de moteurs très puissants datent des années soixante à soixante-dix [1]. La durée du fonctionnement normal des moteurs-fusées à propergol liquide étant assez élevée - de quelques secondes à plus d'une minute - un éjecteur à paroi métallique ne peut pas, avec les matériaux classiques dont nous disposons actuellement, résister à la chaleur intense que dégagent les gaz brûlés, si la paroi n'est pas protégée. Cette protection nécessaire est assurée par l'un des trois procédés suivants : Revêtement réfractaire ; Refroidissement par circulation extérieure d'un liquide ; et enfin le troisième procédé est la création d'une couche gazeuse limite contre la paroi interne de l'éjecteur.

De nombreux chercheurs se sont intéressés à ce sujet. Marina C. et al, ont étudié la combustion couplée au refroidissement d'une micro fusée à propergol liquide, par simulation numérique, dans le but d'optimiser la conception de la chambre de combustion [2]. J. Stoll et al. ont fait une étude expérimentale et théorique sur le transfert de chaleur et

\*Email : b.khelidj@orange.fr

la stabilité du film de refroidissement au niveau de la partie convergente-divergente des tuyères, où les résultats expérimentaux ont été comparés à la théorie [3]. H.W. Zhang et al. ont fait par le biais d'une étude numérique la combinaison de deux modes de refroidissement (refroidissement régénératif et refroidissement par film), sur les chambres propulsives à pression élevée [4].

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés au refroidissement par circulation de liquide. Ce procédé, largement utilisé, consiste à disposer autour de l'éjecteur une seconde enveloppe, et à envoyer dans la jupe ainsi créée, au voisinage de la section de sortie de la tuyère, l'un des constituants du propergol, qui doit remonter dans la jupe pour arriver aux gicleurs.

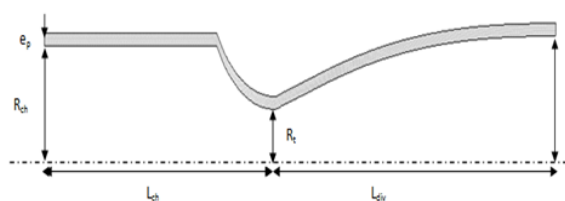
La chaleur perdue par les parois est donc entièrement récupérée par le liquide de refroidissement qui est réchauffé avant son admission dans le foyer. C'est en général le comburant qui est utilisé comme liquide réfrigérant en raison de sa plus grande masse donc de sa capacité calorifique totale toujours supérieure à celle du combustible.

Au contraire dans le cas d'un propergol à oxygène liquide, c'est le combustible qui est utilisé : l'oxygène liquide étant un mauvais réfrigérant du fait du peu d'intervalle qui sépare son état initial de son point critique.

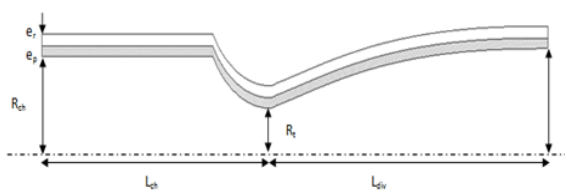
Pour mettre en évidence l'efficacité du système de refroidissement, nous avons utilisé le code Fluent pour réaliser nos simulations numériques.

## 2. Géométrie de la chambre propulsive

La simulation du processus de combustion turbulente en phase gazeuse nécessite un schéma qui modélise simultanément le mélange et les réactions de toutes les espèces chimiques présentes. De même que pour l'approche utilisée avec les équations de conservations de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie, une équation différentielle partielle de conservation des espèces doit être écrite pour chacune des espèces chimiques [5].



**Fig. 1.** Profil de la chambre propulsive non refroidie.



**Fig. 2.** Profil de la chambre propulsive refroidie.

**Tableau 1.** Caractéristiques de la chambre propulsive.

Longueur de la chambre de combustion	Lch. (m)	0.249
Longueur de la tuyère (divergente)	Ldiv.(m)	0.305
Rayon de la chambre de combustion	Rch. (m)	0.083
Rayon du col	Rt. (m)	0.049
Rayon de sortie (tuyère )	Re. (m)	0.089
Longueur de la tuyère (divergente)	Ldiv.(m)	0.305

### 3. Formulation mathématique

La simulation du processus de combustion turbulente en phase gazeuse nécessite un schéma qui modélise simultanément le mélange et les réactions de toutes les espèces chimiques présentes. De même que pour l'approche utilisée avec les équations de conservations de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie, une équation différentielle partielle de conservation des espèces doit être écrite pour chacune des espèces chimiques [5].

#### 3.1. Equation de conservation de la masse

La conservation de la masse est décrite par l'Equation de continuité (1) :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

#### 3.2. Equations de bilan de la quantité de mouvement

Le bilan de la quantité de mouvement est décrit par l'Equation (2) :

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = F_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\overline{\rho u'_i u'_j}) \quad (2)$$

#### 3.3. Equations de conservation de l'énergie

La conservation de l'énergie est donnée par l'Equation (3) :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i E) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum h_j \vec{J}_j + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right) \quad (3)$$

#### 3.4. Equation des espèces chimiques

Cette équation est donnée sous la forme suivante :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \frac{\partial(\rho u_i Y_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t}) \frac{\partial Y_i}{\partial x_i} \right] + R_i \quad (4)$$

### 3.5. Modélisation de la turbulence

Le transport de l'énergie cinétique turbulente ( $k$ ) et le taux de dissipation de l'énergie cinétique ( $\varepsilon$ ), sont calculés avec les deux équations données par [5] :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

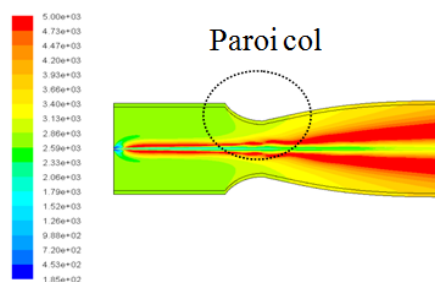
$C_\mu, \sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$  : Sont des constantes données.

## 4. Résultats numériques et discussion

La résolution du problème est faite avec des hypothèses simplificatrices. Nous nous sommes intéressés tout particulièrement au régime permanent. Le couple du propergol introduit dans la chambre de combustion est du kérosène – oxygène liquide. Les surfaces des parois extérieures sont supposées adiabatiques. L'ensemble de l'étude est réalisé avec une représentation 2D de la chambre propulsive, du moteur-fusée, en utilisant deux modèles. Le premier modèle est celui d'Eddy Dissipation pour la modélisation de la combustion et le deuxième modèle de turbulence  $k - \varepsilon$  pour la modélisation du régime d'écoulement des gaz [6].

### 4.1. Simulation sans refroidissement

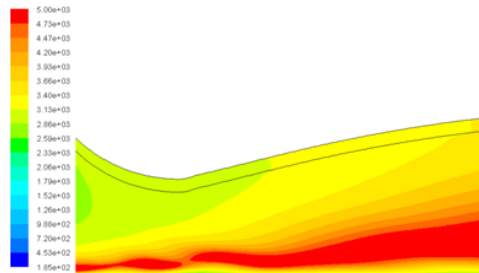
Les résultats de la simulation numérique présentés dans ce cas nous montrent la répartition des champs de température le long de la chambre propulsive et la transmission de la chaleur par les différents modes de transfert de chaleur à travers la paroi de la chambre propulsive. La Figure 3 nous montre, que la température, au niveau de la tuyère et du col, est très importante que celle de la chambre de combustion. Ce qui veut dire que la paroi de la chambre propulsive est soumise à des contraintes thermiques très sévères qu'elle ne peut supporter. Par conséquent le refroidissement de la paroi de notre moteur s'impose.



**Fig. 3.** Champ de températures le long de la chambre propulsive non refroidie.

La chaleur générée par la combustion est transmise à la paroi de façon relative à chaque zone (chambre de combustion, col, tuyère) le long de la chambre Propulsive comme le montre la Figure 3. Sur cette dernière, nous constatons que la température de la paroi côté gaz, augmente d'abord légèrement le long de la chambre de combustion, puis juste

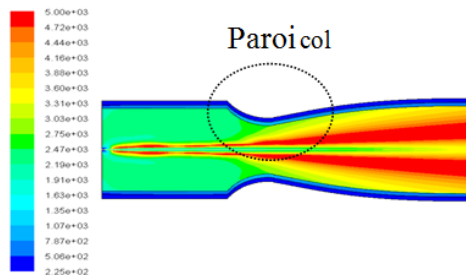
avant le col, l'augmentation de cette température devient importante Figure 4. Ceci est dû aux frottements des gaz de combustion avec la paroi du convergent au fur et à mesure que la section de ce dernier diminue et que la contrainte thermique augmente.



**Fig. 4.** Champ de températures au niveau du col de la chambre propulsive.

#### 4.2. Simulation avec refroidissement

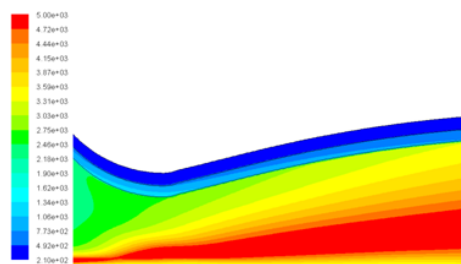
Les résultats de la simulation numérique présentés dans ce cas montrent la distribution de la température le long de la paroi de la chambre propulsive.



**Fig. 5.** Champ de températures le long de la chambre propulsive refroidie.

Ces résultats nous ont permis d'évaluer l'efficacité du système de refroidissement qui est également utilisé pour le préchauffage du combustible.

Le carburant (Kérosène) qui circule à travers le passage annulaire entre les deux enveloppes joue le rôle d'un fluide refroidisseur, absorbant ainsi le flux de chaleur dégagé par les gaz de combustion.



**Fig. 6.** Champ de températures au niveau du col.

Afin de mettre en évidence l'efficacité de notre système de refroidissement, nous comparons à présent les résultats obtenus avec une chambre refroidie et une chambre non refroidie. Dans un premier temps l'observation des champs de températures le long de la chambre propulsive, nous donne déjà une nette différence de la répartition de la température à tous les niveaux (chambre de combustion, col, tuyère), comme le montrent les Figures 3 et 5.

### 4.3. Profil de température radial

Sur les Figures 7, 8 et 9 nous avons représenté la température suivant la direction radiale de la chambre propulsive au niveau de la chambre de combustion, le col et la tuyère. Nous pouvons constater que le gradient de température radiale change avec la position choisie dans la chambre de combustion.

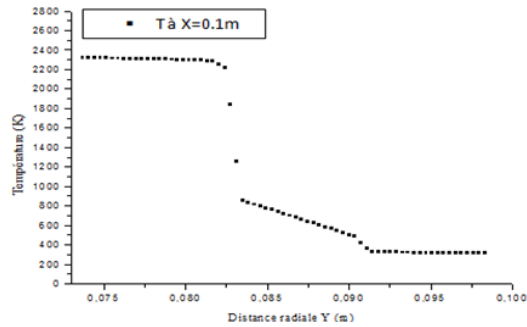


Fig. 7. Profil de température radial dans la chambre de combustion à  $x=0.1m$ .

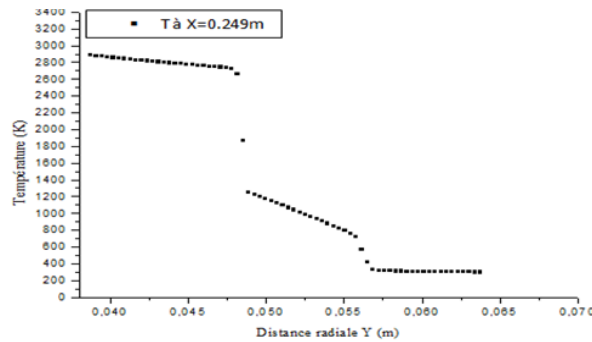


Fig. 8. Profil de température radial dans le col à  $X=0.249m$ .

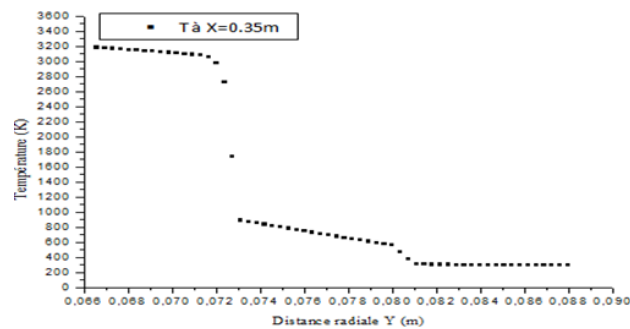


Fig. 9. Profil de température radial dans la tuyère à  $X=0.35m$ .

## 5. Conclusion

Cette étude réalisée au laboratoire « FIMA » est une contribution à la compréhension de l'évolution des phénomènes, très complexes, de combustion et de transferts thermiques dans un moteur-fusée à propergol liquide. Il faut noter que pour protéger la paroi de la chambre propulsive du moteur, un système de refroidissement est nécessaire, car la température des gaz de combustion du propergol liquide dans la chambre, est très élevée. Pour montrer l'intérêt du refroidissement de la paroi de la chambre, nous nous sommes

intéressés à la simulation numérique des phénomènes de combustion et de refroidissement en régime permanent à l'aide du code de calcul Fluent. Pour apprécier l'influence du système de refroidissement sur les grandeurs calculées, nous avons simulé dans un premier temps la combustion dans la chambre sans système de refroidissement. Puis, dans un deuxième temps, la combustion dans la chambre avec un système de refroidissement. Les résultats de simulations obtenus, nous ont permis de mieux voir l'évolution, dans la chambre propulsive du moteur-fusée, des températures calculées. On constate que, le propergol liquide joue bien son rôle de refroidisseur de la paroi de l'enveloppe interne de la chambre propulsive, ce qui donne la possibilité, à cette dernière, de travailler avec des contraintes thermiques moins sévères et que ses caractéristiques physiques restent inchangées. Ce travail nous a permis de mieux comprendre les phénomènes mis en jeu dans la chambre propulsive d'un moteur-fusée. Il constitue une contribution aux recherches consacrées à l'optimisation des performances de chambres propulsives. Toutefois, il nous paraît intéressant de compléter cette étude par une simulation avec d'autres configurations de systèmes de refroidissements tels que des systèmes à chicanes. Enfin, il nous semble nécessaire de compléter certaines hypothèses et notamment de prendre en considération certains paramètres tels que la paroi non adiabatique.

### Remerciements

Nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de cet article.

### REFERENCES

- [1] F. Bellange, L. Bitoo, R. Buttay, V. Casseau, A. Delsalle, T. Livebardon, L. Mochel, M. Niang, I. Paqueriaud, J. Vaudolon, A. Freycon, A. Kling, J. Bisson, *Etude de la propulsion principale du VSH*, Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aéro-technique, 2011.
- [2] C. Marina, A. Michele, S. Alfredo, *Computing flow, combustion, heat transfer and thrust in a micro-rocket via hierarchical problem decomposition*, Microfluid Nanofluid, 7 : 57-73,2009.
- [3] J. Stoll, J. Straub, *Film cooling and heat transfer in nozzles*, vol.110, Journal of Turbomachinery, p. 57-65, 1988.
- [4] H. W. Zhang, Y. L. He, W. Q. Tao, *Numerical study of film and regenerative cooling in a thrust chamber at high pressure*, Numerical Heat Transfer, p. 991-1007, 2007.
- [5] Fluent INC, *Fluent 6.3 User's guide*, 2006.
- [6] D. C. Wilcox, *Turbulence modeling for CFD*, DCW Industries Inc, 1993.