

ETUDE DES TRANSFERTS THERMIQUES DANS UNE ENCEINTE SPHERIQUE SIMULANT UNE LAMPE HALOGENE

R. HADJADJ, W. KAABAR* et S. BOUTEBBA

Département de chimie, faculté des sciences exactes, université Mentouri Constantine

* Auteur correspondant: w_kaabar@yahoo.co.uk

Résumé : Le but de ce travail est le développement d'un modèle théorique représentatif des transferts de chaleur et d'écoulement dans une enceinte sphérique simulant une lampe halogène contenant 95% d'azote moléculaire et 5% de bromure d'hydrogène. Le transfert thermique est modélisé par les équations différentielles, aux dérivées partielles, de continuité, de Navier-Stokes et d'énergie. Les équations modélisantes sont numériquement résolues par la méthode des volumes finis. Les réactions chimiques à l'équilibre thermodynamique sont modélisées par la minimisation de l'énergie de Gibbs. Le modèle de la lampe à halogène considéré dans cette étude nous fournit des informations sur les températures, les pressions, les écoulements et les distributions des espèces chimiques présentes dans la lampe.

Nomenclature

T	température, <i>K</i>	A	surface de la face, m^2
P	pression, <i>atm</i>	dV	unité de volume, m^3
t	temps, <i>s</i>	Symboles grecs	
i	énergie interne, <i>j/kg</i>	ρ	masse volumique, kg/m^3
k	conductivité thermique, $Wm^{-1}s^{-1}$	μ	viscosité dynamique, <i>kg/m.s</i>
C_p	chaleur spécifique à P constante, <i>j/kgK</i>	Φ	variable générale
S_Φ	terme source de Φ par unité de volume	σ	coefficient d'échange de diffusion de
S_i	terme source de l'énergie interne	Φ	
u, v, w	vitesses moyennes selon x, y et z, <i>m/s</i>	μ_j	potentiel chimique
n_j	nombre de mole		
G	énergie de Gibbs		

1. INTRODUCTION

La lampe à tungstène halogène fut inventée en 1959 par Edward Zubler. Elle produit de la lumière en portant à incandescence un filament de tungstène régénéré par la présence de gaz halogénés. Pour augmenter la durée de vie de ce type de lampe plusieurs études ont été faites. En 1990 Nagy et Biro [1] ont analysé le gaz de remplissage de la lampe à halogène, par chromatographie en phase gazeuse. En 1993, des auteurs de l'université de Sheffield [2] ont modélisé la chimie d'une lampe incandescente à halogène. Ils ont étudié la cinétique de : H, Br, HBr, système en présence d'azote gazeux. Makai et al. [3] ont étudié une lampe à halogène tungstène. La simulation de la convection libre à l'intérieur de la lampe a été faite par l'équation de convection-conduction et l'équation incompressible de Navier-Stokes. Les résultats leur ont permis de calculer la dépendance de la pression des nombres adimensionnels. Bunk et al. [4] ont développé une lampe incandescente comportant un cycle de carbone ; un premier cycle est créé en employant le carbone et l'hydrogène comme gaz de remplissage, tandis qu'un deuxième cycle pour le métal est créé en employant l'halogène.

Dans la présente étude, on considère la simulation numérique du transfert thermique par convection naturelle dans une enceinte sphérique contenant 95% d'azote moléculaire et 5% de bromure d'hydrogène et chauffée par un filament de tungstène. La modélisation numérique a été réalisée en utilisant le code puissant de la dynamique des fluides, Fluent, en incorporant le calcul des distributions chimiques à l'équilibre thermodynamique grâce aux UDF (Used Defined Functions). Un cas simple est étudié comme première approche où le cylindre est considéré solide, c'est à dire on néglige l'écoulement à l'intérieur du filament.

2. MODELISATION MATHEMATIQUE

Les principes physiques qui régissent ce problème sont modélisés par les équations de conservation de la masse, des quantités de mouvements et de l'énergie [5] et par l'équation de l'énergie de Gibbs à l'équilibre thermodynamique [6]. Les équations représentant l'écoulement d'un fluide newtonien compressible sont données par:

2-1 Equation de continuité :

Cette équation exprimant la conservation de la masse est donnée comme suit :

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

2-2 Equations de transport de quantité de mouvement :

x- mouvement,

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad} u) + S_{M_x}$$

y- mouvement,

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad} v) + S_{M_y} \quad (2)$$

z- mouvement,

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad} w) + S_{M_z}$$

$S_{M_x} = -\rho g$, $S_{M_y} = 0$ et $S_{M_z} = 0$.

Une équation de type « poisson » pour la correction de la pression, dérivée de l'équation de continuité et les équations de quantité de mouvement linéarisées, sera résolue pour obtenir les corrections des champs de pression et vitesse nécessaires pour satisfaire la continuité.

2-3 Equation de conservation de l'énergie :

$$\frac{\partial(\rho i)}{\partial t} + \text{div}(\rho i \mathbf{u}) = -p \text{div} \mathbf{u} + \text{div}(k \text{grad} T) + \Phi + S_i \quad (3)$$

$div(\mathbf{u}) = 0$ pour un fluide incompressible. S_i s'annule dans notre cas puisque on est concerné par une seule phase sans réaction chimique et sans transfert radiatif. L'équation générale de transport s'écrit de la manière suivante:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + div(\rho\phi\mathbf{u}) = div(\Gamma grad\phi) + S_\phi \quad (4)$$

On utilise la méthode des volumes finis pour la résolution numérique de ces équations. Les détails de l'application de cette méthode numérique sont documentés dans l'ouvrage de Patankar [5]. La forme intégrée de l'équation 3 à l'état stationnaire en utilisant le développement de Taylor est donnée par l'équation 4.

$$\int_A \mathbf{n} \cdot (\rho\phi\mathbf{u}) dA = \int_A \mathbf{n} \cdot (\Gamma grad\phi) dA + \int_{CV} S_\phi dV \quad (5)$$

L'état d'équilibre d'un système chimique peut être déterminé par la minimisation du résultat de l'équation 6:

$$G = \sum_{j=1}^N n_j \cdot \mu_j \quad (6)$$

n_j est le nombre de mole et μ_j est le potentiel chimique de l'espèce j .

La minimisation de l'énergie de Gibbs est réalisée à volume constant et à pression constante.

3. DEFINITION DU PROBLEME

La géométrie de la lampe, définie dans trois dimensions, consiste en une petite sphère; simulant le filament, dans une grande sphère; représentant l'enveloppe de la lampe. La température du filament est fixée à 3500K et celle de la paroi de l'enceinte à 600K. Le fluide c'est de l'azote gazeux sous une pression de 0.79 atm, la dose initiale de HBr est de 2.125×10^{-6} Kg. Le choix des paramètres est basé sur des données expérimentales. On considère un modèle bidimensionnel de la lampe. En ce qui concerne le maillage, on a opté pour des formes de mailles quadrilatérales avec un espacement de 0.5mm, où le plus grand nombre de mailles est concentré dans les régions à fortes variations de gradients de température, Figure 1.

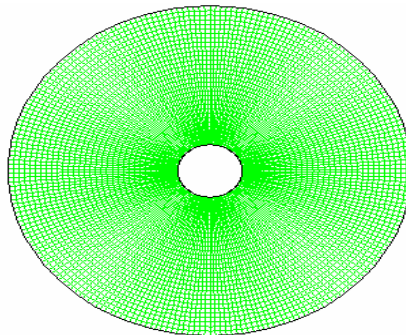


Figure1: Schéma du maillage

4. RESULTATS

Le problème décrit au-dessus a été soumis pour calcul et une solution convergente a été obtenue après avoir exécuté 1000 itérations. Les résultats sont représentés dans le plan vertical.

Le chauffage électrique du filament par effet Joule est une source de chaleur locale dans l'enceinte. Les gradients de température dans le plan polaire entraînent la génération de la force de poussée thermique induisant un mouvement de convection naturelle dans l'enceinte. Le champ thermique est représenté dans la Figure 2. D'importants gradients de température existent dans la région du filament, particulièrement, au dessous du filament où le champ thermique est quelque peu comprimé par le modèle du courant. Les contours de la pression; Figure 2, montrent que la pression minimale est atteinte dans la région au dessus du filament où les forces de poussée thermique accélèrent le gaz vers le haut de l'enceinte. Une fois atteignant la paroi où la pression est maximale, l'écoulement change de direction et suit un mouvement descendant le long et parallèlement à la paroi latérale de l'enceinte.

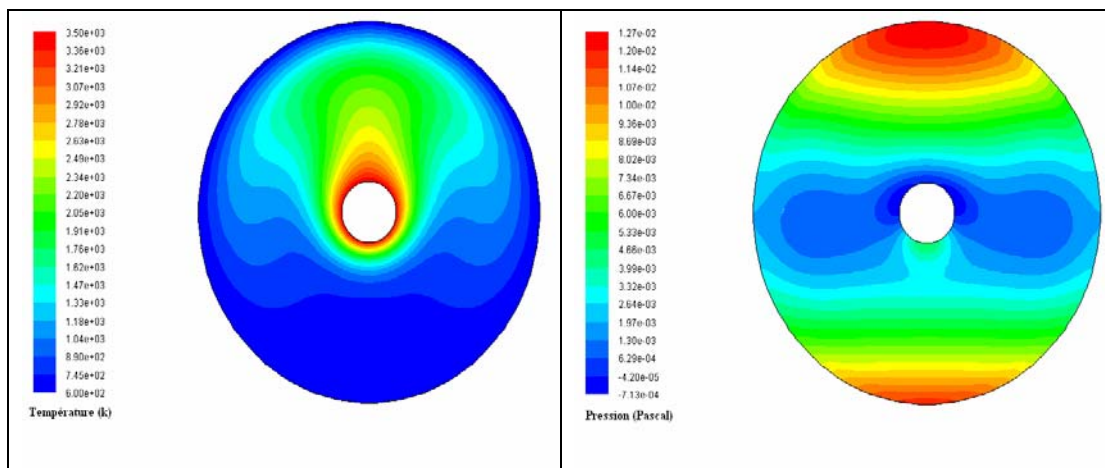


Figure 2: Contours de température et de pression

Les résultats de l'étude des processus physico-chimiques à l'intérieur d'une lampe halogène en fonctionnement sont directement ou indirectement liés à la température élevée du filament. L'augmentation de la température du filament conduit à une augmentation de la température du gaz près du filament et à la création d'importants gradients de température dans le volume de la lampe (Figure 3). Ces gradients résultent en gradients de densité, lesquels produisent une circulation de l'écoulement gazeux (convection). La convection conduit le gaz chaud du filament vers la paroi qui joue le rôle d'un échangeur de chaleur avec le milieu extérieur.

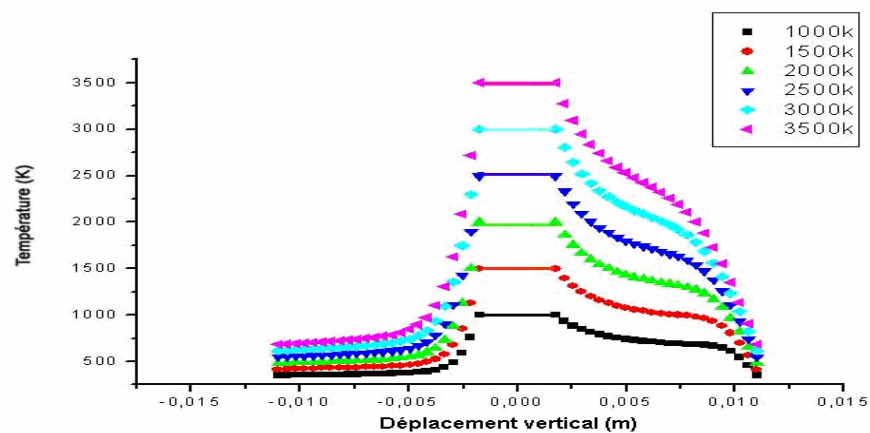
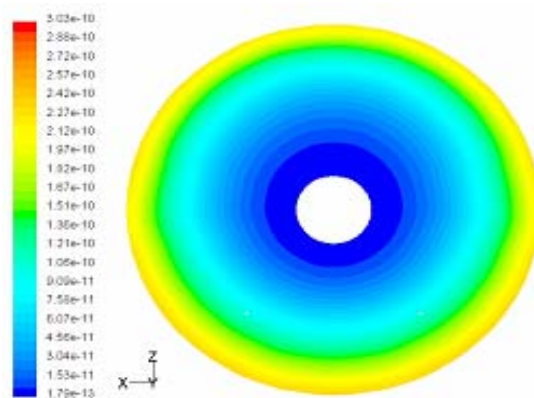
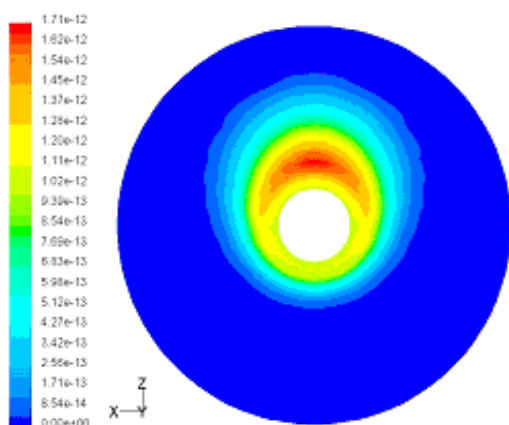


Figure 3 : Variation de la température avec le déplacement vertical pour différentes températures du filament

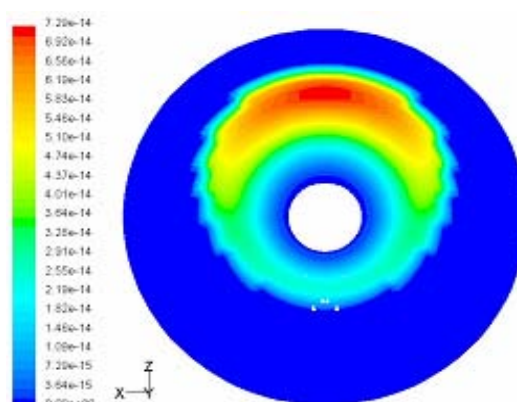
À l'intérieur de l'enceinte le gaz halogéné HBr se combine avec les molécules de tungstène libérées en chauffant le filament. Par effet de convection ces molécules retournent près du filament, le tungstène se redépote sur le filament en lui assurant une régénération permanente, bien qu'à terme non homogène. Les courants internes de la convection contribuent au mécanisme de refroidissement du filament chauffé, ce qui donne une température non uniforme le long du filament dans une lampe en opération.



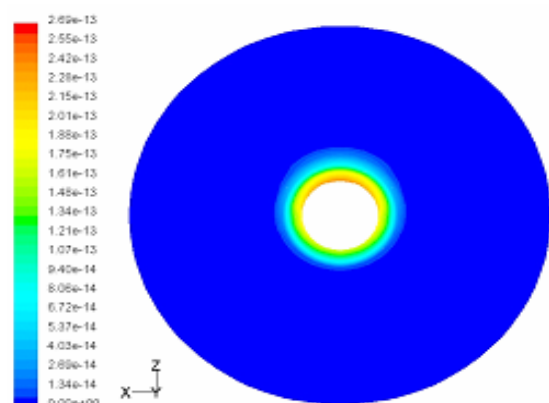
Concentration de la molécule de HBr (kg)



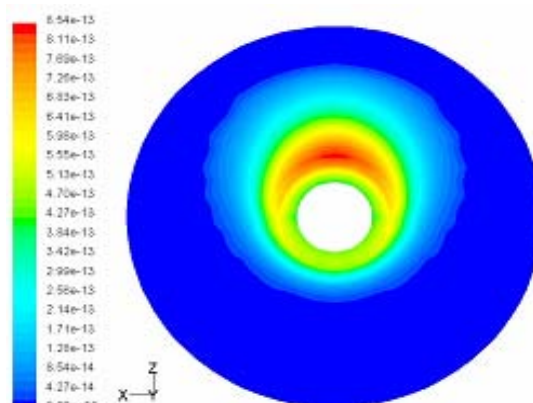
Concentration de l'atome de Br (kg)



Concentration de la molécule de Br₂ (kg)



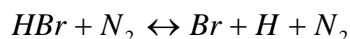
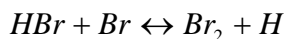
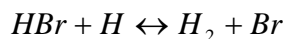
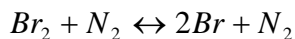
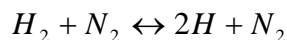
Concentration de l'atome de H (kg)



Concentration de la molécule de H₂ (kg)

Figure 4: Concentrations des différentes espèces chimiques présentes dans la lampe

Dans les lampes à tungstène halogène la région près du filament est la région où les phénomènes physique et chimique se produisent. Le HBr est gazeux à température ambiante. A l'intérieur de la lampe ce gaz se mélange et circule avec le gaz de remplissage N₂. Quand la température augmente HBr se dissocie en gaz plus stables ou en atomes selon les réactions suivantes:



Cinq espèces chimiques sont présentes dans la lampe: Br, Br₂, HBr, H et H₂, leurs concentrations sont données dans la Figure 4.

La molécule de HBr est instable dans la région à proximité du filament, elle se dissocie à cause de la température élevée. La quantité des atomes H et Br augmente au fur et à mesure que celle de HBr diminue. Cependant une quantité importante des atomes H se transforme en gaz H₂, alors que les atomes de Br forment avec les atomes H des molécules HBr dans la région à basse température, près de la paroi, qui seront reconduites dans la région du filament par convection.

D'après la figure 4, il est clair que la production des atomes de brome, responsable du cycle de régénération du tungstène, commence à une température d'environ 1100K.

5. CONCLUSION

Les résultats numériques de cette investigation montrent l'effet convectif à l'intérieur de l'enceinte simulant une lampe halogène et la dépendance des concentrations des différentes espèces chimiques présentes dans la lampe en opération avec la température. Une observation importante est l'effet de la diffusion thermique sur la concentration des atomes de Brome à haute température.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. L. Nagy et E. Biro, Analysis of Internal Filling Gas of Small-Sized Halogen Lamps by Gas Chromatography, *J. chromat.* A 520 (1990).
2. M. J. Abbott, D. L. Trindell et R. Devonshire, Computer Modeling of Halogen Incandescent Lamp Chemistry, *Electrochem. Soc. Pro.* (1993), 93.
3. L. Makai, G. Hárs, G. Varga, G. Fülöp et P. Deák, Computer simulation of the operating pressure of tungsten halogen lamps, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **38** (2005), 3217.
4. A. Bunk, M. Damm et G. Rosenbauer, Incandescent Lamps Employing Filaments Comprising High Temperature Stable Metal Carbides in Bulbs with a Carbon-Hydrogen-Fluorine Component-Containing Fill, *PCT Int. Appl.* **22** (2006), 22.
5. S.V. Patankar, *Numerical heat transfer and fluid flow*, Hemisphere Publishing Corporation, Taylor and Francis Group. New York (1980).
6. R.H. Davies, A.T. Dinsdale, J.A. Gisby, J.A.J. Robinson, S.M. Martin, Thermodynamics and Phase Equilibrium Software from the National Physical Laboratory, *CALPHAD*, **26(2)**, (2002), 229.