

Modélisation numérique des processus physico-chimiques dans une enceinte sphérique simulant une lampe halogène

Wahiba KAABAR*, Razika HADJADJ, Souheila BOUTEBBA

Département de chimie, faculté des sciences exactes, université Mentouri Constantine
Route Ain-el-Bey - 25000 Constantine, Algérie

* (auteur correspondant: w_kaabar@yahoo.co.uk)

Résumé - Le but de ce travail est la simulation numérique de l'environnement complexe et hostile d'une lampe à tungstène-halogène en considérant les effets thermiques dus au filament et au gaz de remplissage. Les résultats numériques de cette investigation montrent l'effet convectif à l'intérieur de l'enceinte et la dépendance des concentrations des différentes espèces chimiques présentes dans la lampe en opération avec la température du filament. Une observation importante est l'effet de la diffusion thermique sur la concentration des atomes de l'halogène à haute température dans la région intra-filament.

1. Introduction

La lampe à tungstène halogène fut inventée en 1959 par Edward Zuber. 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 Abott et al. [2] ont modélisé la chimie d'une lampe incandescente à halogène en étudiant la cinétique du système H, Br et HBr, en présence d'azote gazeux. Makai et al. [3] ont étudié une lampe à halogène tungstène en simulant la convection libre à l'intérieur de la lampe 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. Le modèle cylindrique du filament en tungstène, n'est d'aucun usage dans cette étude. Le filament hélicoïdal est représenté par des anneaux permettant ainsi la simulation de l'écoulement à l'intérieur et à l'extérieur du filament. La méthode des volumes finis a été utilisée pour résoudre les équations de continuité, de quantité de mouvement (Navier-Stokes) et d'énergie [5]. La méthode de la minimisation de l'énergie de Gibbs a été utilisée pour prédire les réactions chimiques à l'équilibre thermodynamique [6].

2. Modèle mathématique

Le modèle mathématique consiste à coupler le code numérique de la dynamique des fluides, Fluent [7] avec un programme calculant la minimisation de l'énergie de Gibbs. Le modèle ainsi formé permet de prédire la distribution des espèces chimiques à l'équilibre thermodynamique local

pendant l'étude de l'écoulement dans une lampe en opération. La figure 1 montre l'organigramme de calcul.

L'état d'équilibre d'un système chimique peut être déterminé par la minimisation du résultat de l'équation (1):

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

G est l'énergie de Gibbs, 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.

Un set de données de la composition chimique en fonction de la température a été établi en se basant sur une base de données thermodynamique. La simulation débute par le calcul de la composition pour une température de maille donnée.

La fonction d'initialisation consiste à initialiser les variables nécessaires pour le calcul des espèces. La fonction d'ajustement donne la nouvelle distribution des espèces et corrige la pression correspondante. La fonction source de la masse est utilisée pour chaque maille, la valeur de la masse est simplement la variation du nombre de densité, elle est considérée comme une variation de la masse de la maille pour le calcul des équations de conservation de la masse.

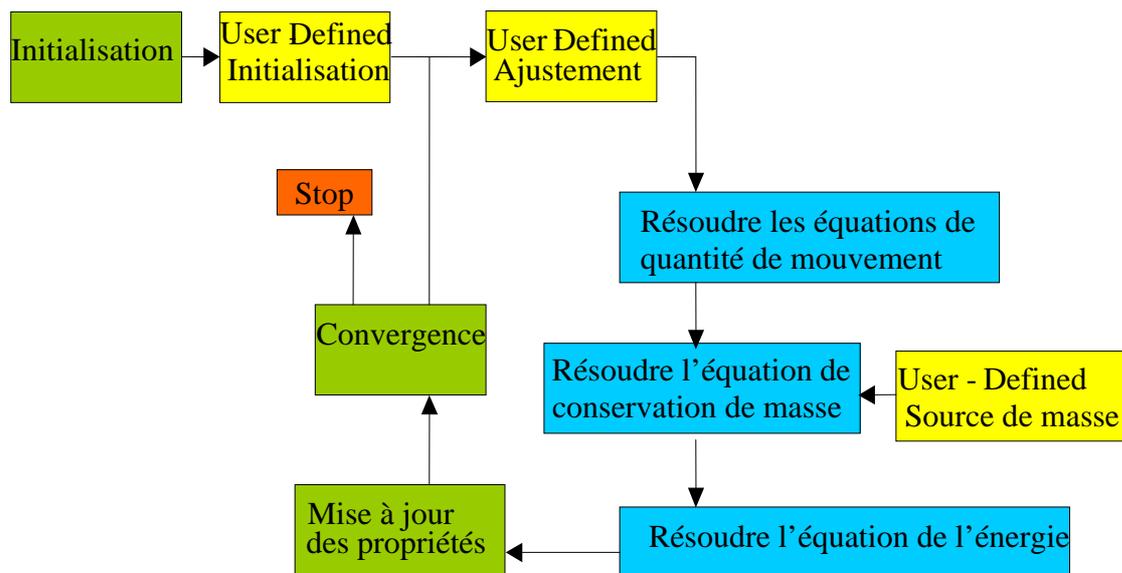


Figure1: Organigramme de calcul

3. Définition du problème

La géométrie de la lampe consiste en une sphère de diamètre 22mm. Le filament hélicoïdal est représenté par des anneaux permettant ainsi la simulation de l'écoulement à l'intérieur et à l'extérieur du filament.

La symétrie du problème (2 plans de symétrie: plan xy et la plan yz) réduit le domaine de calcul au 1/4 du volume total de la lampe. Six températures du filament ont été utilisées dans cette étude. A chaque température du filament correspond une température de la paroi déterminée expérimentalement. Le fluide 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. Le plus

grand nombre de mailles est concentré dans les régions à fortes variations de gradients de température, Figure 2.

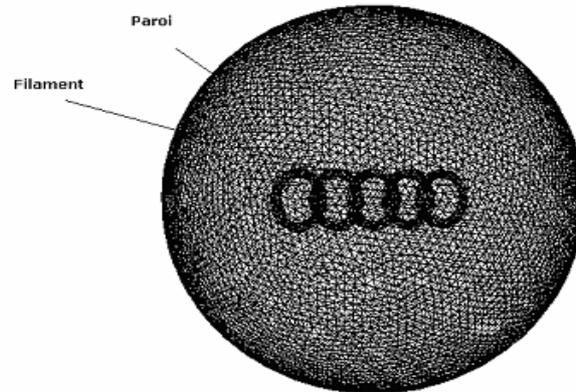


Figure2: Géométrie et maillage

4. Résultats

Pour simplifier le travail et réduire ainsi le temps de calcul, on a considéré les effets thermiques dus au filament et au gaz de remplissage causés par l'échauffement du gaz par le filament dans les plans xy et yz (la pesanteur est selon $-y$).

La figure 3 montre la variation de la température avec le déplacement vertical y. En s'éloignant du filament la température décroît rapidement. Le gaz entourant le filament devient très chaud et les molécules constituant le gaz acquièrent une grande énergie cinétique. Dans cette région; région de Langmuir le transfert thermique se produit à travers la collision par échange de moment, plutôt que par convection. La figure 4 montre les changements de la température selon le déplacement horizontal z. On constate que la température décroît aux extrémités du filament. Ceci est causé par la conduction thermique du filament vers les supports où se produisent les pertes de l'énergie thermique.

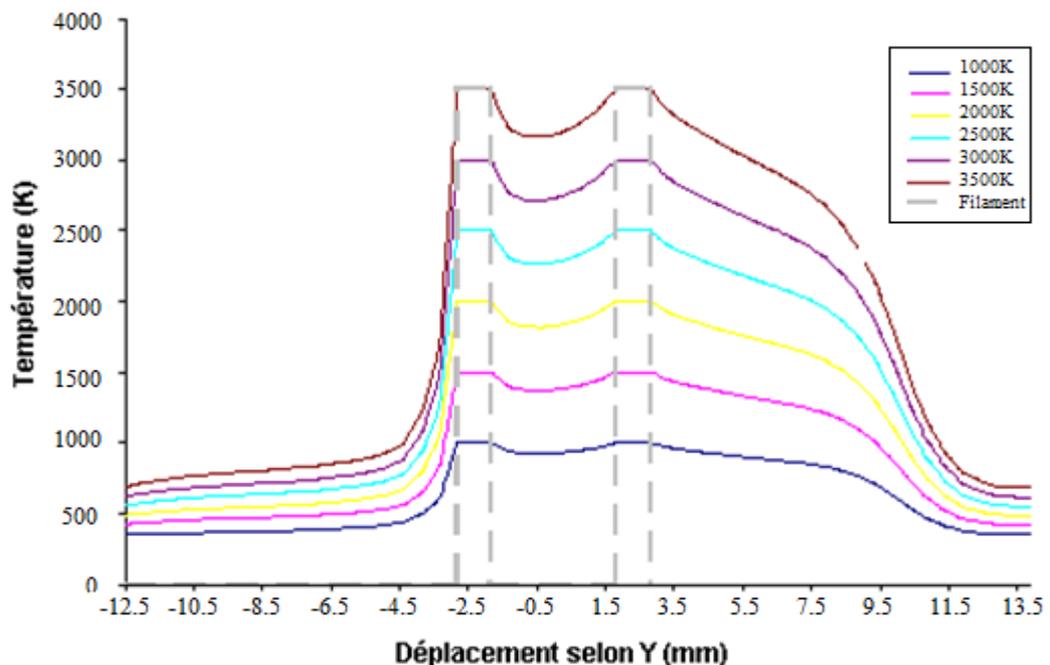


Figure 3: Variation de la température avec le déplacement vertical pour différentes températures du filament

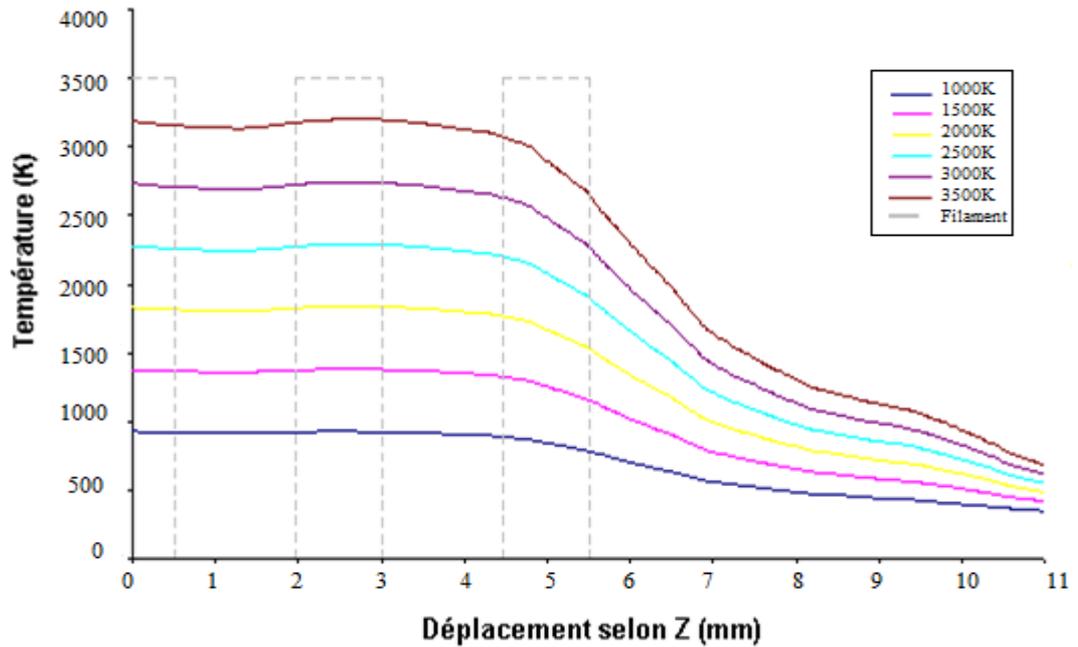


Figure 4: Variation de la température avec le déplacement horizontal pour différentes températures du filament

Pour les températures élevées l'effet des anneaux est observé, les pertes dues au gaz apparaissent lorsque l'écoulement se produit entre les anneaux constituant le filament. La figure 5 montre bien la région chaude du filament ainsi que la région de Langmuir. On constate qu'une grande proportion de l'enceinte est froide, ceci peut être mieux représenté par la figure 6.

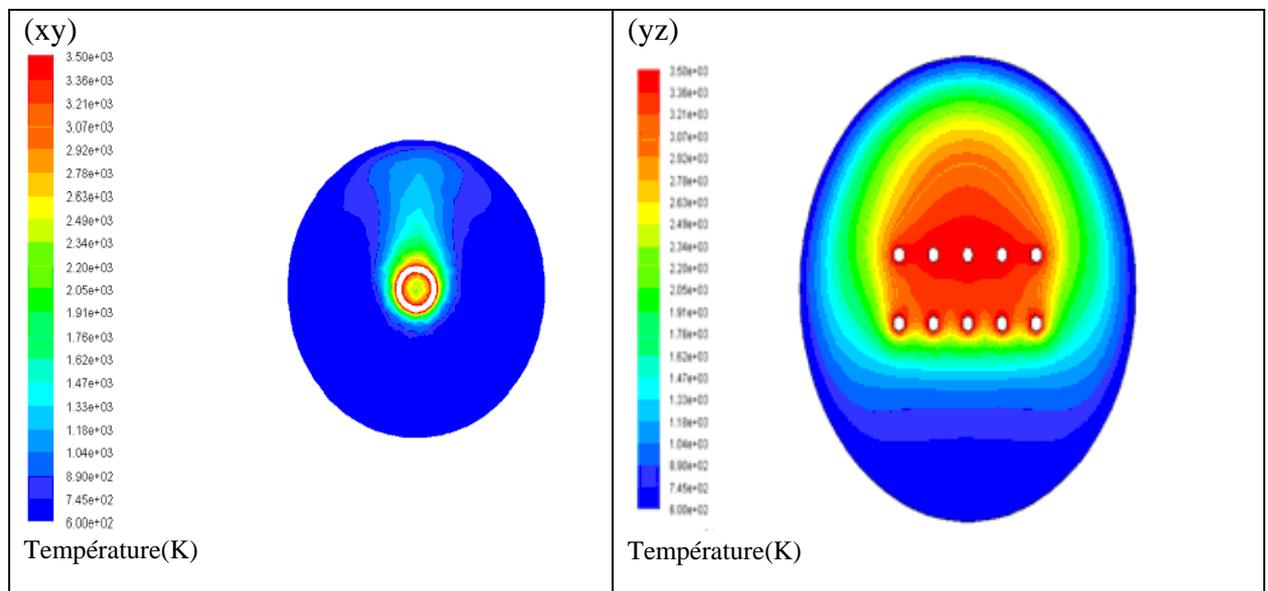


Figure 5: Distribution de la température dans les plans xy et yz pour une température du filament de 3000K

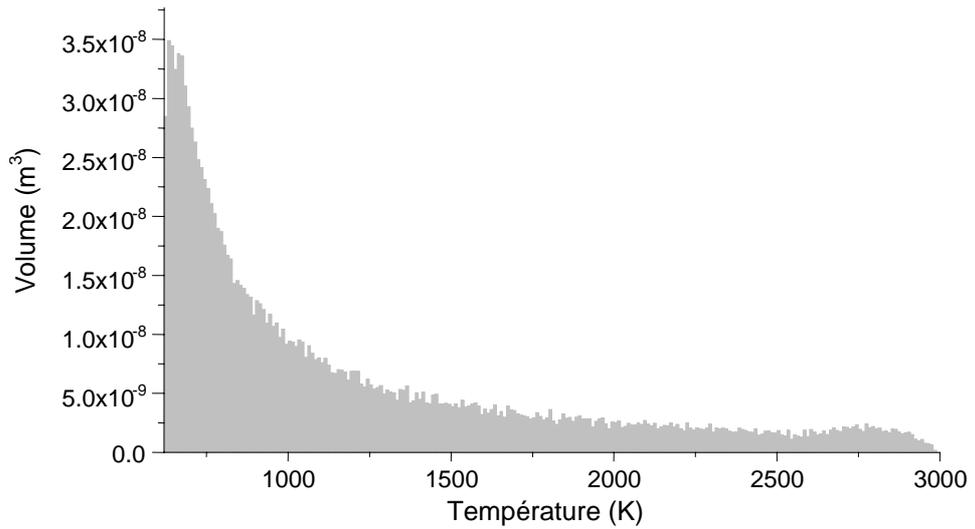


Figure 6: Distribution thermique dans l'enceinte

La température moyenne dans l'enceinte est de 1200K, elle correspond à l'énergie thermique moyenne nécessaire pour les processus chimiques.

La molécule de HBr est instable dans la région à proximité du filament, elle se dissocie à cause de la température élevée selon l'équation: $HBr + N_2 \leftrightarrow Br + H + N_2$

L'atome de brome est responsable du cycle de régénération du tungstène, sa concentration dépend de la température; plus la température du filament est grande et plus sa concentration est grande. La figure 7 montre que la production des atomes de brome est maximale dans la région de Langmuir, c'est la région où la quantité de vapeur de tungstène est grande. La production de ces atomes commence à une température d'environ 1100K, qui correspond approximativement à la température moyenne de l'enceinte.

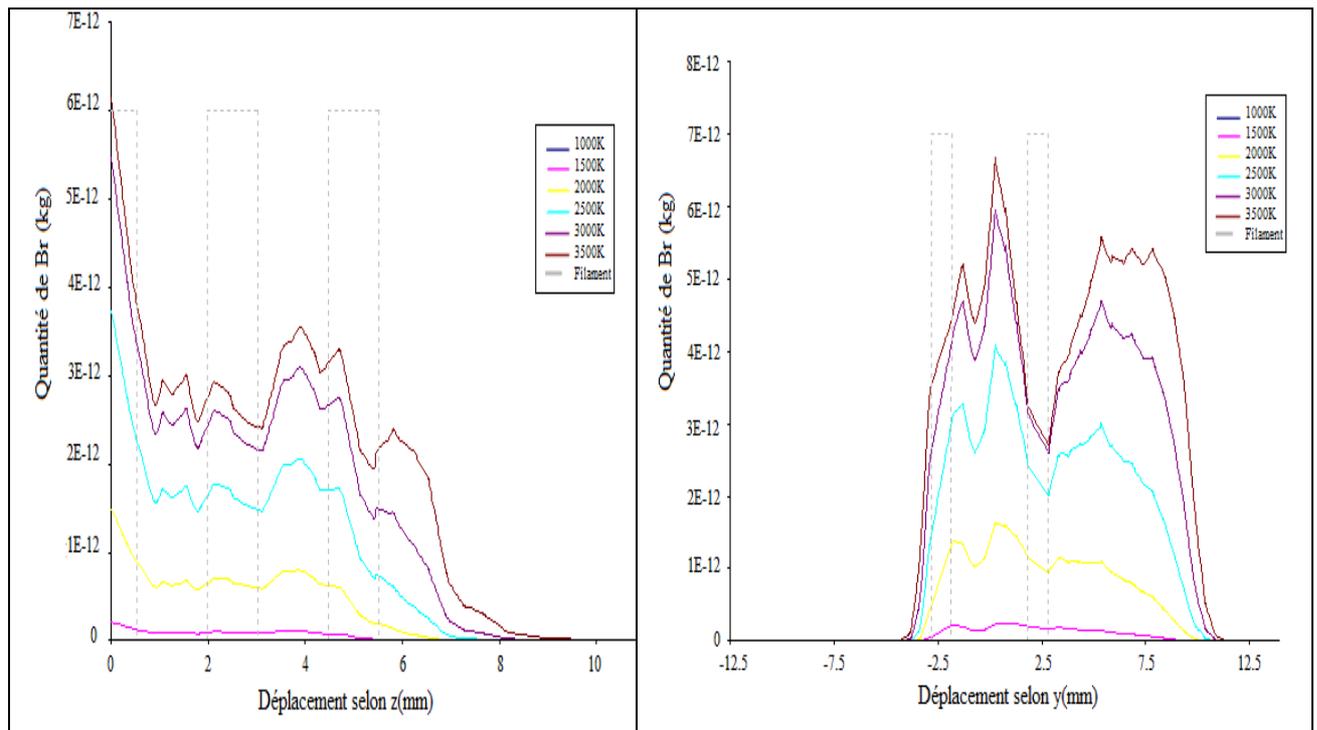


Figure 7: Distributions des atomes de brome en fonction du déplacement selon les directions z et y pour différentes températures du filament

5. Conclusion

Les résultats de cette étude montrent que les processus physico-chimiques à l'intérieur d'une lampe halogène en fonctionnement sont directement 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 la création d'importants gradients de température dans le volume de la lampe. Une observation importante est l'effet de la diffusion thermique sur la concentration des atomes de Brome à haute température.

Références

- [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 et D. L. Trindell, 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.
- [7] Fluent inc., www.fluent.com, (2006).