

## Modélisation bidimensionnelle d'une lampe à décharge à halogénure métallique à haute pression (HgDyI<sub>3</sub>)

Salem Hajji<sup>1</sup>, Rabie Ghay<sup>1</sup>, K. Charrada<sup>1</sup>, George Zissis<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Unité de Recherche Etude des Milieux Ionisés et Réactifs, IPEIM, 5019 route de Kairouan Monastir, Tunisia

<sup>2</sup>Université Paul Sabatier - Bât. 3R3 - 118 route de Narbonne - 31062 Toulouse cedex 9 – France

[Salemhajji10@yahoo.fr](mailto:Salemhajji10@yahoo.fr); [rabie.ghay@gmail.com](mailto:rabie.ghay@gmail.com) ; [kamel.charrada@ipeim.rnu.tn](mailto:kamel.charrada@ipeim.rnu.tn) ;  
[georges.zissis@laplace.univ-tlse.fr](mailto:georges.zissis@laplace.univ-tlse.fr)

### Résumé

Le travail présenté s'intéresse à l'étude de transfert de chaleur et de masse d'une lampe à décharge haute pression mercure dopée à iodure de dysprosium (HgDyI<sub>3</sub>). Cette étude est accomplie par une modélisation numérique basée sur la résolution des équations de l'aérothermique dans le cadre de l'équilibre thermodynamique local (ETL). Pour cela, nous avons réalisé un modèle à deux dimensions, un modèle stable et alimenté en courant continu et en fonction du temps, et de mettre en œuvre avec un logiciel commercial qui s'appelle COMSOL Multiphysics qui utilise les éléments finis.

Après la validation, l'influence de la proportion du dysprosium a été étudiée. La modélisation de plasma de décharge, nous a permis d'analyser et de comprendre l'effet des paramètres externes clés de la décharge sur le comportement de l'arc et en particulier sur la répartition de la température. Nous avons montré que l'augmentation de la proportion de dysprosium provoque la croissance de la température de l'arc centrale chaud de la décharge d'une part et la contraction d'arc d'autre part.

**Mots clés :** Lampe à décharge, équilibre thermodynamique local (LTE), Iodure de dysprosium, Mercure, Modélisation numérique.

### 1. Introduction

La lampe à décharge à haute pression dans le mercure a été et reste largement utilisée pour l'éclairage. Dans la littérature, on trouve plusieurs travaux de modélisation qui traitent les lampes à décharges à haute pression, et en particulier la lampe à mercure haute pression [1-6]. Charrada [7-8] a réalisé un modèle 2D pour étudier l'influence de certains paramètres sur le comportement d'un plasma de décharge dans le vapeur de mercure. Araoud [9] a étudié la dernière phase de montée en régime d'une lampe mercure haute pression. Ben Hamida et al. [10] dans une première partie ont étudié le phénomène de convection dans la lampe à décharge dans une position horizontale. Dans une deuxième partie ces auteurs [11] réalisent une étude thermique en trois dimensions d'une lampe à vapeur de mercure à double enveloppe pour différentes orientations.

La recherche et l'amélioration des caractéristiques des sources de lumière tant sur le plan du rendu de couleurs que celui de l'efficacité lumineuse, a conduit à introduire dans les décharges des additifs métalliques (Thallium, Sodium, Dysprosium...). Sous formes d'halogénures (iodures en général).

Les lampes à halogénures métalliques prennent aujourd'hui une place importante dans le secteur de l'éclairage et commencent à concurrencer sérieusement les lampes à incandescence pour l'éclairage. En effet, ces lampes présentent des atouts indéniables, elles sont connues d'une part par leur efficacité lumineuse et d'autre part par leur bon rendu de couleur.

Les lampes à halogénure métallique constituent un système chimique complexe à haute température. Il est pris en charge par la plupart des chercheurs que la décharge de ces lampes est en équilibre thermodynamique local ETL. Dans ce travail, nous avons étudié l'effet du rapport atomique sur les phénomènes de transport de masse et d'énergie dans une lampe à décharge à halogénure métallique à haute pression (HgDyI<sub>3</sub>).

### 2. Equations du modèle et hypothèses

L'état de la décharge électrique est caractérisé par la multiplicité et la complexité des processus physiques et chimiques. Il sera donc difficile de tenir compte de tous ces phénomènes avec précision, c'est ainsi que notre

modèle, basé sur les résolutions des équations du model fluide est basé sur des hypothèses simplificatrices justifiées par des effets expérimentaux.

- L'écoulement est supposé axisymétrique, et laminaire.
- Toutes les forces extérieures autres que la force de gravité seront négligées.
- Le champ électrique est supposé purement axial.
- Les termes de dissipation visqueuse dans l'équation de l'énergie ne seront pas pris en compte. Le fluide est supposé mono-terme et la vitesse de chaque espèce est supposée égale à la vitesse globale du fluide, ainsi, nous ne tenons pas en compte des phénomènes de démixtion et de diffusion des espèces présents dans la décharge.
- Le fluide est considéré comme un gaz parfait.

En tenant compte de ces hypothèses les équations du model fluide seront présentées comme suit :

- Équation de la conservation de la masse

$$\frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho v_r)}{\partial r} = 0 \quad (1)$$

- Équations de la quantité de mouvement

$$v_r \frac{\partial(v_r)}{\partial r} + v_z \frac{\partial(v_r)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\mu \frac{\partial v_r}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (\mu \frac{\partial v_r}{\partial z}) - 2\mu \frac{v_r}{r^2} \right] \quad (2)$$

$$v_r \frac{\partial(v_z)}{\partial r} + v_z \frac{\partial(v_z)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\mu \frac{\partial v_z}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (\mu \frac{\partial v_z}{\partial z}) \right] \quad (3)$$

Équation de l'énergie

$$\rho C_p (v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_z \frac{\partial T}{\partial z}) = \frac{\partial}{\partial z} (rK \frac{\partial T}{\partial z}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rK \frac{\partial T}{\partial r}) + \sigma E^2 - U \quad (4)$$

Avec  $\Gamma = \frac{k}{C_p}$

- Equation d'état 
$$P = \frac{R}{M} \rho T \quad (5)$$

Pour l'évaluation du terme source dans l'équation de l'énergie, le champ électrique étant supposé constant radialement et lié à l'intensité du courant par l'équation suivante :

$$I = 2\pi E \int_0^R \sigma r dr \quad (6)$$

### 3. Géométrie et conditions aux limites

Les conditions aux limites et la géométrie étudiée sont données par la figure et le tableau ci-dessous :

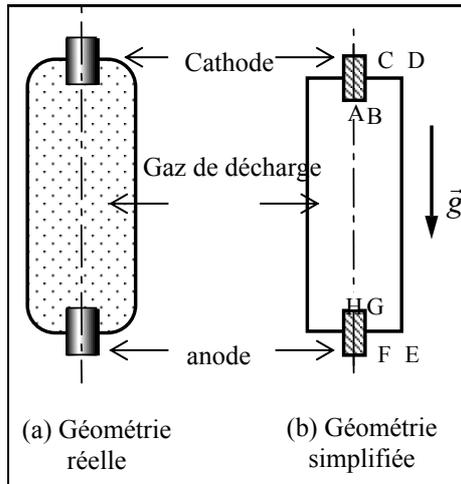


Figure 1 : Géométrie de la décharge étudiée

Tableau 1 : Conditions aux limites

	T	V	$u_r$	$u_z$
Axis(AH)	$\frac{\partial T}{\partial r} = 0$	$\frac{\partial V}{\partial r} = 0$	0	$\frac{\partial u_z}{\partial r} = 0$
CDEF	$T_w = 1200$	Electrical isolation	0	0
FG/BC	$T(z)$	Continuity	0	0
AB/GH	$T_{elec} = 2900$	Continuity	0	0

### 4. Résultats et discussions

Notre modèle a été appliqué d'une part à une décharge mercure pur étudiée par T. Nimalasuriya [12] et aux décharges dans la vapeur de mercure dopée à l'iodure de dysprosium étudiées par le même auteur d'autre part. Les caractéristiques des décharges étudiées sont données par le tableau 2.

Tableau 2 : Les caractéristiques des décharges étudiées

Discharge	D1	D2
Diameter (mm)	8	8
Longueur entre les électrodes	18	18
$m_{Hg}$ (mg)	10	10
$m_{DyI_3}$ (mg)	0	4
Power (W)	130	130

$I_{\text{arc}}(\text{A})$	0.8	0.8
----------------------------	-----	-----

#### 4. 1 Validation du modèle

La figure 2 sur laquelle nous avons représenté les profils de température calculés et ceux mesurés par Nimalasuriya [12] montre un accord assez satisfaisant entre l'expérience et le modèle.

D'autre part, sur la figure 3 sont représentés les profils radiaux de température calculés par notre modèle et les profils expérimentaux mesurés par Nimalasuriya [12] pour la décharge  $\text{HgDyI}_3$ . Nous signalons aussi le bon accord entre nos résultats et les mesures.

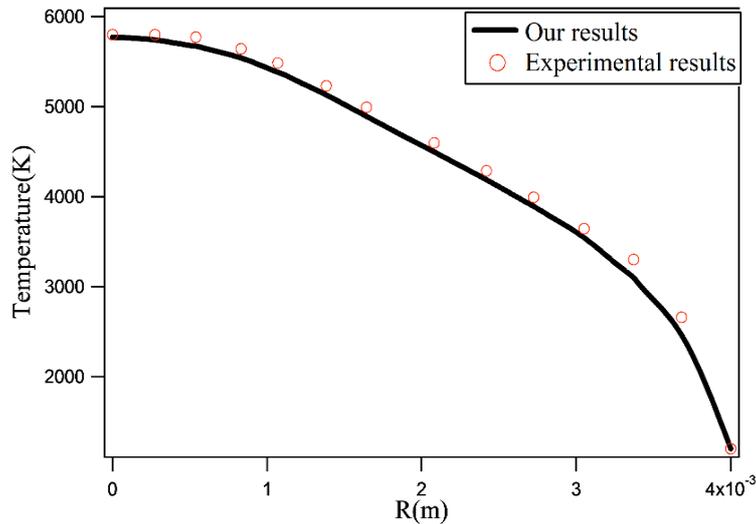


Figure 2 : Comparaison du profil radial de la température avec les calculs de Nimalasuriya [12] pour la décharge Hg

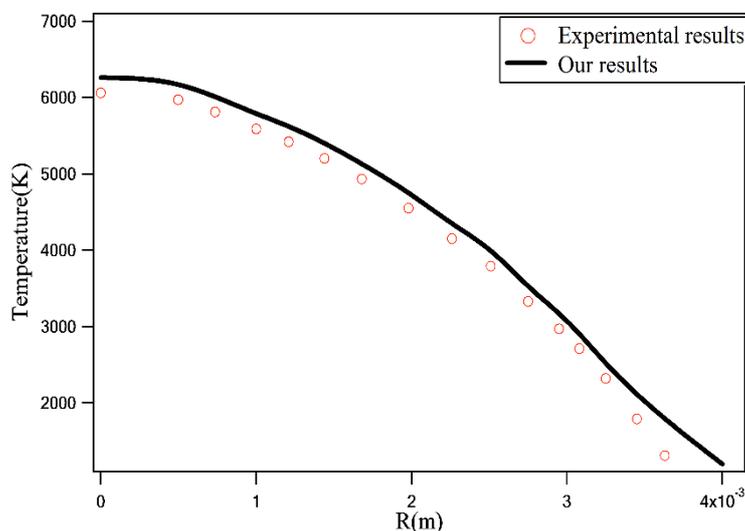


Figure 3 : Comparaison du profil radial de la température avec les calculs de Nimalasuriya [12] pour la décharge  $\text{HgDyI}_3$

#### 4. 2. Influence du rapport atomique

Dans cette partie nous étudions l'influence de la proportion dysprosium additif sur le comportement des principaux paramètres caractéristiques de la température de la décharge.

##### 4.2.1. Distribution de la température

Nous rapportons sur la figure 4 la distribution de la température dans le cas d'une décharge mercure pur, d'une décharge faiblement dopée en tri-iodure de dysprosium  $R_0$  ( $Hg/DyI_3$ )=20000 et d'une décharge fortement dopée en tri-iodure de dysprosium  $R_0$  ( $Hg/DyI_3$ )=100. Cette figure montre que l'addition de tri-iodure de dysprosium entraîne une augmentation de la température de la décharge de canal chaud. Ce comportement est obtenu en réduisant le rapport atomique mercure-tri-iodure de dysprosium tout en maintenant constante la pression totale dans la décharge. Ce qui revient donc à augmenter progressivement la masse de dysprosium et réduire celle de mercure.

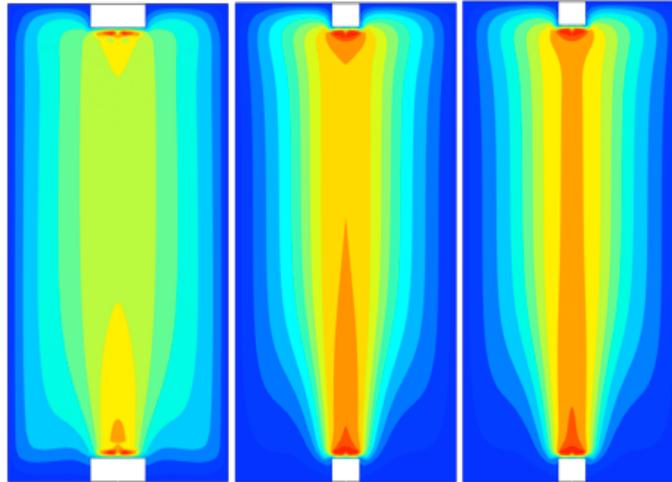


Figure 4 : Influence du rapport atomique sur la distribution de température

Sur la figure 5, nous avons porté l'évolution du profil radial de la température au centre de la décharge ; on constate que l'augmentation de la proportion de dysprosium entraîne une croissance de la température centrale de la colonne positive. L'augmentation de la proportion de dysprosium ( $Dy$ ,  $Dy^+$ ) augmente le rayonnement émis. La plupart de ce rayonnement est émis juste à côté du centre de l'axe.

La figure 5 montre également la contraction de l'arc. Ce phénomène s'explique par les atomes d'additifs de métal ( $Dy$ ,  $Dy^+$ ) ont des nombreuses niveaux d'énergie, dont certain nombre sont assez à basse altitude, de sorte que le potentiel moyenne d'excitation est très faible par rapport à la potentielle d'ionisation. Qui entraîne une perte de rayonnement à proximité des flancs de l'arc, où la plupart des atomes d'additifs sont présents, ce qui se traduit alors par un arc contracté. Cela pourrait donner lieu à des profils de température de décharge resserrée.

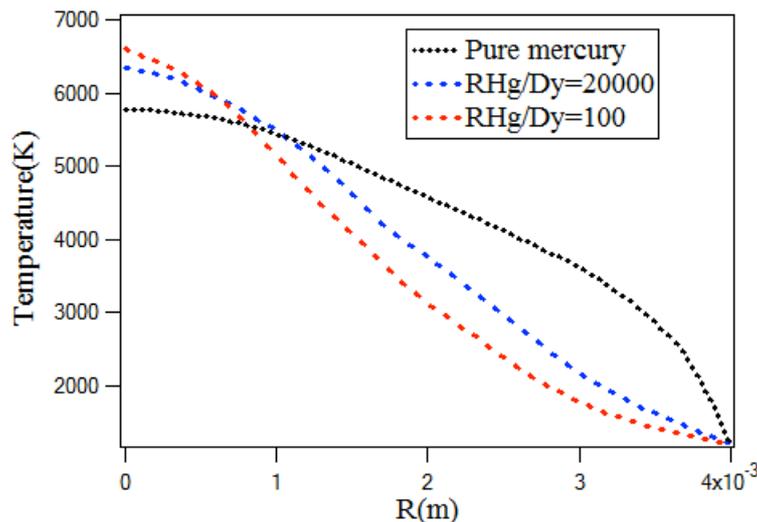


Figure 5 : Influence du rapport atomique sur le profil radial de la température

#### 4. 2.2. Vitesse de convection

Nous présentons sur La figure 6 le champ de vitesse dans le cas d'une décharge mercure pur, d'une décharge faiblement dopée en tri-iodure de dysprosium  $R_0$  ( $Hg/DyI_3$ )=20000 et d'une décharge fortement dopée en tri-iodure de dysprosium  $R_0$  ( $Hg/DyI_3$ )=100.

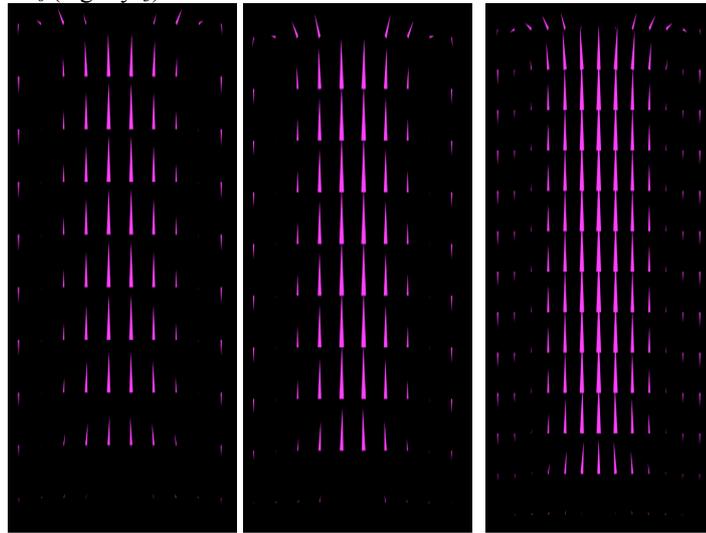


Figure 6 : Influence du rapport atomique sur le champ de vitesse

L'analyse de ces figures montre que l'addition du dysprosium entraîne l'augmentation de la vitesse dans la décharge. Ce phénomène s'explique par le refroidissement radiatif qui est moins efficace au centre du plasma du dysprosium, en raison de l'absence d'un fort radiateur. Convection donc plus forte. La figure 7 illustre la variation radiale de la composante axiale de la vitesse, la composante radiale demeure toujours très faible. Nous notons une augmentation de cette composante suite à l'addition de l'iodure de dysprosium. Nous remarquons aussi que la position radiale pour laquelle la vitesse s'annule est indépendante de la proportion de dysprosium ajoutée.

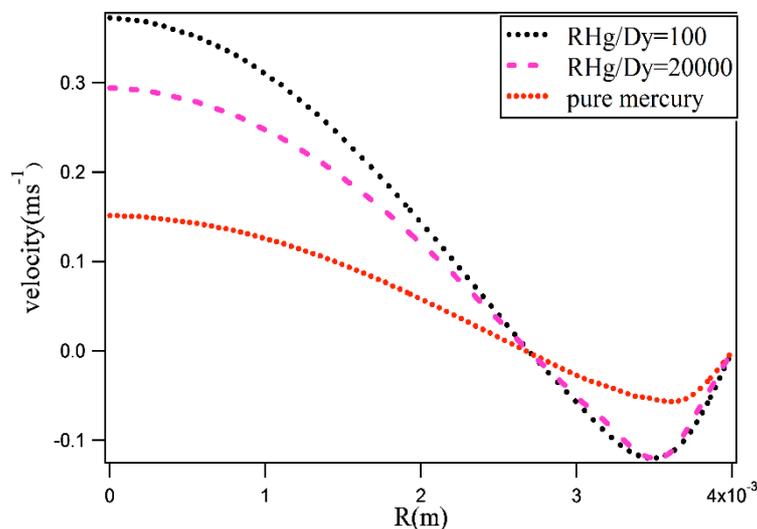


Figure 7 : Profil radiale de la composante axiale de la vitesse pour différents rapport atomiques.

## 5. Conclusion

Au cours de ce travail, nous avons proposé une modélisation fluide d'une lampe à décharge mercure dopée à tri-iodure de dysprosium ( $HgDyI_3$ ). La modélisation du plasma de décharge, nous a permis d'analyser et de comprendre l'influence du rapport atomique sur le comportement de la décharge et surtout sur la distribution de température. Nous avons montré, que l'augmentation de la proportion du dysprosium entraîne une croissance de la température du canal chaud d'une part et la contraction de l'arc d'autre part.

Ce modèle pourrait être utilement amélioré pour rendre compte d'autres phénomènes comme, par exemple, les écarts à l'équilibre thermodynamique locale (ETL). En effet, généralement l'étude des décharges halogénure métallique haute pression est menée dans le cadre de l'hypothèse de l'équilibre thermodynamique locale (ETL) quel que soit le mode d'alimentation considéré. Dans ce domaine de pression, cette approche constitue une approximation très satisfaisante et simplifie énormément la modélisation de ces décharges. D'un autre côté, les phénomènes complexes aux pieds d'arc sont, dans notre modèle fluide, très simplifiés et il sera intéressant d'introduire un modèle unidimensionnel aux interfaces plasma-électrodes pour approcher au mieux la réalité.

## REFERENCES

- [1] K. C. Paul, T. Takemura, T. Hiramoto, M. Yoshioka, and T. Igarashi, *IEEE Trans. Plasma Sci.* 34(2), 254 (2006).
- [2] W. Shyy and P. Y. Chang, *J. Appl. Phys.* 67, 1712 (1990).
- [3] P. Y. Chang, W. Shyy, and J. T. Dakin, *Int. J. Heat Mass Transfer* 33, 483 (1990).
- [4] W. Shyy and P. Y. Chang, *Int. J. Heat Mass Transfer* 33, 495 (1990).
- [5] P. Y. Chang and W. Shyy, *Int. J. Heat Mass Transfer* 34, 1857 (1992).
- [6] K. Charrada and G. Zisis, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 33, 968 (2000).
- [7] K. Charrada, étude hydrodynamique d'un plasma de décharge mercure haute pression, Analyse de l'influence des transports de masse. 'Généralisation à un système à deux fluides'. Thèse d'université, Université Paul Sabatier (1995)
- [8] K. Charrada. G. Zisis Spatio-temporal study of the deviations from thermal equilibrium in a heigh-pressure mercury plasma working under an ace power supply, *journal of physics D: Applied Physics*. Vol, 33, p 968-976, 2000.
- [9] Z. Araoud'' Etude du régime dynamique d'un plasma de décharge électrique dans la vapeur de mercure'' école nationale d'ingénieure de Monastir (2009).
- [10] M. B. Ben Hamida, H. Helali, Z. Araoud, and K. Charrada Contrast between the vertical and horizontal mercury discharge lamps *Physics of Plasmas*, vol. 18, 063506, (2011)
- [11] M. B. Ben Hamida and K. Charrada, A three-dimensional thermal study of a mercury discharge lamp with double envelope for different orientations, *J. Plasma Physics*, vol. 81, 905810202, (2015).
- [12] T. Nimalasuriya, A.J. Flikweert, M. Haverlag, P. Kemps, G.M.W. Kroesen, W.W.Stoffels and J.J.A.M. van der Mullen, *Journal of Physics D-Applied Physics* 39 (2006) 2993–3001.