

# Détermination de la densité électronique et de la température électronique par spectroscopie d'une décharge micro-onde dans un plasma d'hélium

Lazhar BENMEBROUK\*, S. BENTEDJ et Fethi KHELFAOUI  
*Univ Ouargla, Faculté des Mathématiques et des Sciences de la Matière,  
Lab. Rayonnement et Plasmas et Physique des Surfaces, Ouargla 30 000 (Algérie)*  
\* Email : [lazhar.benmebrouk@gmail.com](mailto:lazhar.benmebrouk@gmail.com)

**RÉSUMÉ :** Ce travail est consacré à l'étude de rayonnement émis par plasma de décharge électrique, provoquée dans l'hélium avec une pression de 4.8 Torr, une puissance MW de 108W. Notre calcul numérique permet d'identifier plusieurs raies spectrales. Par l'utilisation de la méthode de Boltzmann nous avons calculé la température électronique ( $T_e=3.23\text{eV}$ ), elle correspond à l'échelle de classification du plasma. L'application de la loi de Saha donne la densité électronique du plasma ( $N_e=3.67 \cdot 10^{13}\text{cm}^{-3}$ ). Les spectres théoriques calculés sont en bon accord avec les spectres expérimentaux.

**MOTS-CLÉS :** Spectroscopie, plasma, Décharge micro-onde, méthode de Boltzmann, élargissement de raies

**ABSTRACT:** In this work we study the radiation emitted by electric discharge plasma of helium gas. The pressure is 4.8 Torr and the power Micro Wave (MW) is of 108W. Our numerical calculation identifies several spectral lines. By using the Boltzmann method we calculated the electronic temperature ( $T_e = 3.23\text{eV}$ ). The application of the Saha law gives the plasma electronic density ( $N_e = 3.67 \cdot 10^{13}\text{cm}^{-3}$ ). The calculated theoretical spectra are in good agreement with the experimental spectra.

**KEYWORDS:** Spectroscopy, plasma, Micro-Wave discharge, Boltzmann method, broadening lines

## 1. Introduction

La spectroscopie d'émission optique est une technique fréquemment utilisée dans la caractérisation de plasmas de décharge électrique [1-3]. L'étude de la lumière émise par la décharge permet de recueillir beaucoup d'informations sur les paramètres de la décharge, comme la densité électronique et la température électronique.

Nous nous sommes intéressés dans notre travail à l'étude des spectres expérimentaux émis par le plasma de décharge électrique (décharge MW). Nous avons présenté notre modèle de diagnostique pour déterminer la température et de la densité électronique du milieu. Nous avons appliqué la loi de Boltzmann et la loi de Saha dans les conditions d'équilibre thermodynamique local. Un programme numérique est élaboré pour réaliser l'étude. Le programme utilise les données de physique atomique de l'hélium neutre (He I) et de différents éléments se trouvant probablement dans le milieu (He II, H, Al et Fe).

## 2. Dispositif et spectre expérimentaux

Les spectres expérimentaux étudiés sont enregistrés et réalisés à partir d'un montage expérimental réalisé par V. A. Shakhmatov et Yu. A. Lebedev [4]. Le système d'enregistrement des spectres (Spectromètre AVASPEC) est basé sur des fibres optiques. Les spectres émis sont enregistrés à travers une fenêtre de quartz (matière transparente pour une longueur d'onde entre 200-800 nm), cette fenêtre est placée dans la partie centrale de la chambre de décharge du gaz (dans la cathode). L'intensité des spectres de rayonnement est la moyenne sur la ligne d'observation coïncidant avec l'axe de la chambre de décharge. D'après [4], l'erreur de mesure d'intensité du rayonnement est de 12 à 14 %. Le spectre expérimental enregistré est présenté dans la figure 1.

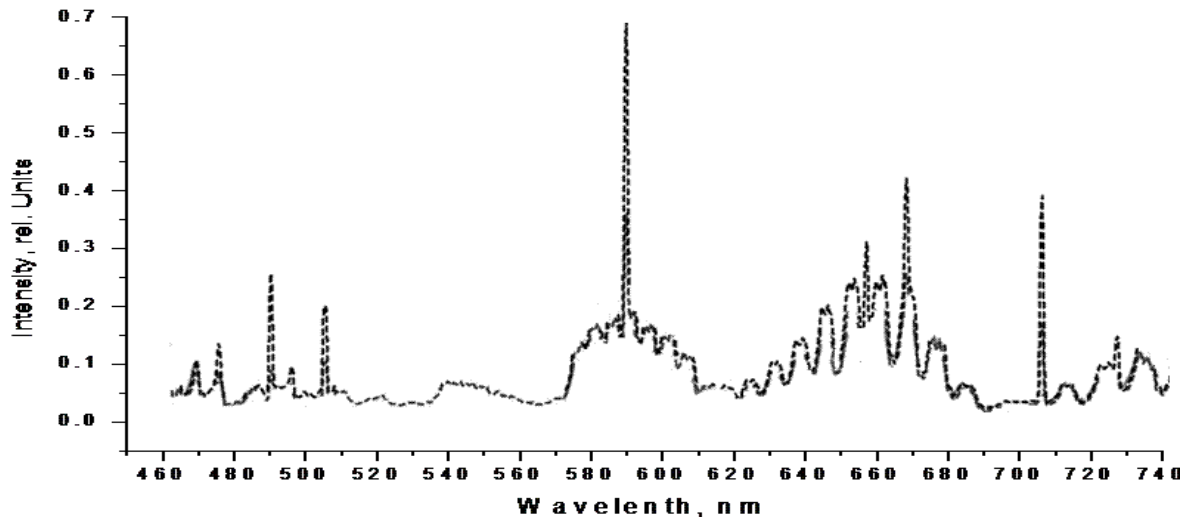


Figure 1 : Spectre expérimental résultant d'une chambre de décharge MW (2.45GHz) provoquée dans l'hélium avec une pression de 4.8 Torr et une puissance de 108W [4].

### 3. Programme de calcul de profil de raie

Nous avons élaboré un programme numérique en langage Fortran 77 qui permet de calculer les spectres de transitions électroniques théoriquement.

Le programme est basé sur les données de physique atomique de chaque élément et sur les paramètres de collisions de Van Der Waals.

Le programme prend en considération les lois et les équations suivantes : Distribution de Maxwell-Boltzmann, loi de Boltzmann, loi de Saha, loi de Dalton, loi de neutralité électrique, loi de conservation de la matière.

Le programme tient compte des différents types d'élargissements des raies : Élargissement naturel, élargissement Doppler, élargissement Stark, élargissement de Van der Waals, élargissement instrumental de forme Gaussien et élargissement instrumental. L'élargissement instrumental peut être de forme Lorentzienne ou de Profil de Voigt.

Le programme tient compte des méthodes spectroscopiques.

La décharge électrique peut contenir un gaz pur ou un gaz avec des impuretés.

Pour le calcul, il est demandé les données suivantes :

- ✓ La longueur d'onde minimale.
- ✓ La longueur d'onde maximale.
- ✓ Le nombre de points représentant le spectre.
- ✓ La pression du gaz.
- ✓ Les constantes de Van Der Waals
- ✓ La largeur expérimentale : forme gaussienne
- ✓ La largeur expérimentale : forme Lorentzienne
- ✓ La masse atomique
- ✓ Les fichiers d'entrée des bases de données atomiques de chaque élément proposé.

### 4. Méthodes du diagnostic spectroscopique

#### 4.1. Identification des espèces atomiques

Pour étudier les spectres expérimentaux et le diagnostic, nous préparons les bases de données de physique atomique pour tous les éléments pouvant se trouver dans le milieu. Le gaz considéré est l'hélium (He, He<sup>+</sup>) ; les impuretés pouvant existées sont (O, Fe, H, Al).

Une première étape consiste à récolter les bases de données de physique atomique. La base de données récoltée [5] comprend les niveaux d'énergie concernés ( $I_E$  et  $J_E$ ), les poids statistiques

( $g_i$  et  $g_j$ ) liés à chaque niveau d'énergie, les longueurs d'onde  $\lambda_{ij}$  des transitions et les probabilités des transitions radiatives ( $A_{ij}$ ).

Pour le domaine de longueur d'onde 450nm à 750nm, et pour les éléments H, HeI, HeII, OI, FeI, AlI, les spectres calculés sont présentés dans la figure 2. L'échelle entre l'intensité de chaque espèce n'est pas respectée car le but est la vérification de l'existence de l'espèce. Les positions des pics concordent avec ceux du spectre expérimental.

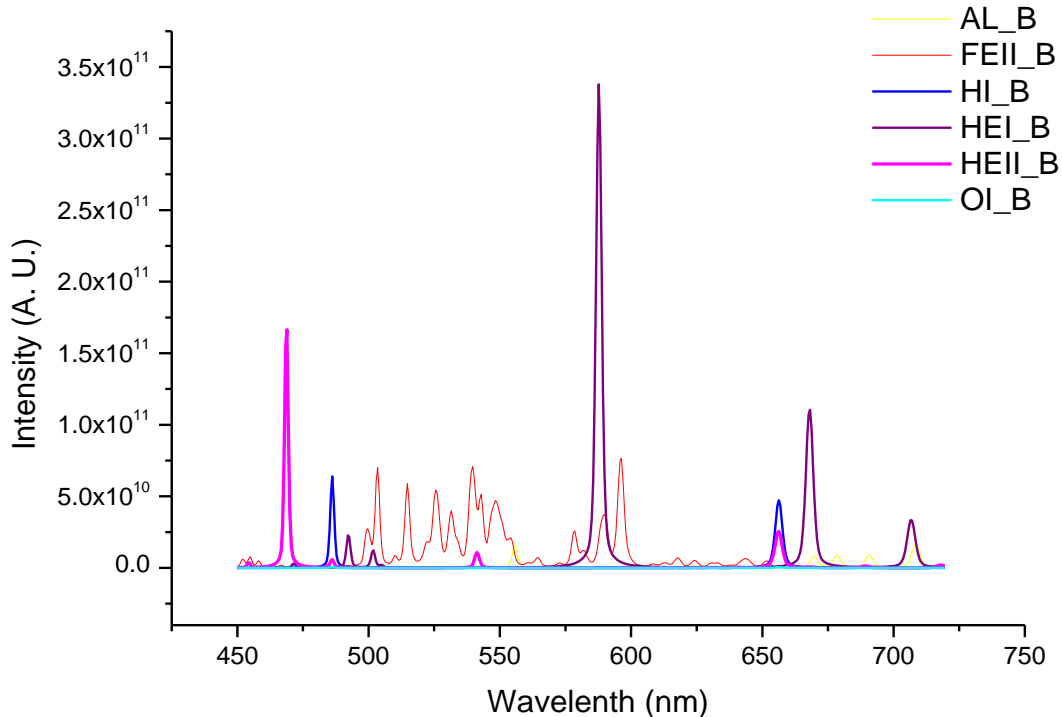


Figure 2 : Spectres théorique pour chaque élément

## 4.2. Détermination de la densité et de la température

Plusieurs méthodes spectroscopiques permettent de déterminer la température et la densité électronique. Ces méthodes sont basées sur l'étude du profil des raies (élargissement et déplacement), d'autres sont basées sur l'étude du spectre continu, et d'autres utilisent le rapport entre les intensités des raies spectrales.

Nous avons utilisé cette dernière méthode comme moyen de diagnostic.

Premièrement on suppose que les différentes particules sont indépendantes, et que l'équilibre thermodynamique soit établi localement en chaque point du plasma, alors le milieu est considéré à l'équilibre thermodynamique local (E.T.L.). Les fonctions de distribution de Maxwell-Boltzmann et la loi de Saha demeurent valables. Dans ce cas on peut appliquer le diagnostic spectroscopique pour en déduire la température et la densité

### 4.2.1. Choix des espèces et des transitions radiatives

La composition chimique d'un milieu étant souvent difficile à connaître de façon précise, surtout lorsque les spectres étudiés proviennent d'impuretés, des électrodes (la cathode et l'anode) ou des murs de l'enceinte.

Pour déterminer la température, nous avons préféré utiliser le rapport d'intensité de deux ou plusieurs raies d'un même atome ou d'un même ion. La comparaison entre les spectres théoriques (Figure 2) et le spectre expérimental (Figure 1), permet d'identifier les raies spectrales qui sont représentés dans le tableau 1 et le tableau 2.

**Tableau 1 : Les données de la physique atomique pour quelques transitions trouvées et leurs intensités expérimentales pour l'He**

N° de pic	$\lambda(nm)$	$A_{ij}(S^{-1})$	$E_i$ (eV)	$E_j$ (eV)	$g_i$	$g_j$	I (u.a.)	Conf <sub>i</sub>	Conf <sub>j</sub>
1	492.330	1.99 E +07	21.218044	23.736357	3	3	0.7	1s2p(1P0)	1s4d(1D)
2	501.707	1.4 E +07	20.615796	23.087040	1	1	1.6	1s2s(1S)	1s3p(1p0)
3	587.759	3.94 E +07	20.964248	23.073678	1	1	5.9	1s2p(3p0)	1s3d(3D)
4	667.999	6.38 E +07	21.218044	23.074097	3	3	3.5	1s2p(1P0)	1s3d(1D)
5	706.715	1.54 E +07	20.964117	22.718488	3	3	3.3	1s2p(3P0)	1s3s(3S)

**Tableau 2 : Les données de la physique atomique pour quelques transitions trouvées et leurs intensités expérimentales pour l'He<sup>+</sup>**

N° de pic	$\lambda(nm)$	$A_{ij}(S^{-1})$	$E_i$ (eV)	$E_j$ (eV)	$g_i$	$g_j$	I (u.a.)	Conf <sub>i</sub>	Conf <sub>j</sub>
1	468.58	2.2 E +08	48.31581	51.01679437	6	8	2.1	3d (2D)5/2	4f(2F0)7/2
2	656.199	2.2 E +07	51.016816	52.906245	8	10	2.6	4f(2F0)7/2	6g(2G)9/2

**4.2.2. Détermination de la densité électronique ( $N_e$ )**

Nous appliquons la loi de Saha pour estimer la densité électronique dans le milieu.

Pour un plasma d'hélium la loi de Saha est donnée par :

$$\frac{N_e \times N_{He^+}}{N_{He}} = \frac{2 \times B_{He^+}(T)}{B_{He}(T)} \frac{(2\pi\mu k_B T)^{\frac{3}{2}}}{h^3} \exp\left(-\frac{(E_{ion} + \delta E)}{k_B T}\right) \tag{1}$$

Où  $N_e$  : est la densité électronique

$N_{He^+}$  : est la densité des ions  $He^+$

$N_{He}$  : est la densité des neutres  $He$ .

$B_{He^+}(T)$  est la fonction de partition de l' $He^+$

$B_{He}(T)$  est la fonction de partition de l' $He$ .

Nous avons négligé la densité ionique de l' $He^{++}$ . Pour simplifier l'équation précédente (1), il faut suivre les étapes suivantes :

- Calculer la densité primaire du gaz de l'Hélium.
- Application de la loi de conservation de la matière.
- Application de la loi de la neutralité du plasma.

Alors la formule simplifiée de la loi de Saha est :

$$\frac{N_e^2}{(N_0 - N_e)} = \frac{2 \times B_{He^+}(T)}{B_{He}(T)} \frac{(2\pi\mu k_B T)^{\frac{3}{2}}}{h^3} \exp\left(-\frac{(E_{ion} + \delta E)}{k_B T}\right) \tag{2}$$

Dans laquelle la fonction de partition  $B(T)$  pour  $He$  et pour  $He^+$  est égale au poids statistique du niveau fondamental, et l'énergie d'ionisation pour l'hélium est égale de 24.6 eV.

L'application numérique de la dernière équation donne la densité électronique suivante :

$$N_e = 3.67 \times 10^{+13} cm^{-3}$$

A partir des résultats trouvés nous remarquons que :

- Le milieu est faiblement ionisé et que les neutres sont les espèces majoritaires.
- Le taux d'ionisation du milieu est égale à  $2.3 \times 10^{-4}$ , il est dans les normes des plasmas froids (degré d'ionisation de  $10^{-5}$  à  $10^{-1}$ ).

- D'autre part nous observons que la densité électronique du plasma est proche de l'ordre de  $10^9$  à  $10^{12}$  particules par  $\text{cm}^3$ ; c'est le cas des plasmas de microdécharge [6].

#### 4.2.3. Détermination de la température électronique ( $T_e$ )

Nous utilisons la méthode de rapport d'intensité  $R$  de deux raies pour calculer la température mais pour deux raies en deux degré d'ionisation différents c'est-à-dire l'un pour He et l'autre pour  $\text{He}^+$ . On prend le pic  $n=4$  dans le **Tableau 1** et le pic  $n=2$  dans le **Tableau 2**. On a :

$$T_e = \frac{(E_m - E_n)}{\left[ \ln \left( \frac{\lambda_1 A_2 g_m R}{\lambda_2 A_1 g_n} \right) + \ln \left( \frac{N_{\text{He}^+}}{N_{\text{He}}} \right) - \ln \left( \frac{B_{\text{He}^+}}{B_{\text{He}}} \right) \right]} \quad (3)$$

L'application numérique dans l'équation (3) donne la température en Kelvin est  $T_e=65507.58\text{K}$ , et en électronvolt elle est  $T_e=3.23$  eV.

La température électronique trouvée est très bonne. En particulier, la température des électrons est typiquement comprise entre 3 et 5eV [7].

### 5. Conclusion

Le modèle numérique proposé permet d'identifier plusieurs raies spectrales et il montre que les spectres théoriques calculés sont en bon accord avec les spectres expérimentaux. Par l'utilisation de la méthode de Boltzmann, nous avons calculé la température électronique,  $T_e = 3.23$  eV. Elle coïncide bien avec l'échelle de classification du plasma. L'application de la loi de Saha, nous a permis de trouver une bonne valeur de la densité électronique du plasma de décharge électrique ( $N_e=3.67 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ).

### Références

- [1] Wujec T. and Musielok J.; ACTA Physica Polonica A, Vol. **95** No=02 (1999).
- [2] Grycuk T., Michalicka M. and Rogaczewski J.; ACTA Physica Polonica A, Vol. **101** No=06 (2002).
- [3] Sainz A., García M. C. and Calzada M. D.; ECA, Vol. **29C**, p4, 132, 2005.
- [4] Shakhmatov V. A. and Lebedev Yu. A., "Radiation Spectroscopy in the Study of the Influence of a Helium–Nitrogen Mixture Composition on Parameters of DC Glow Discharge and Microwave Discharge", (2011).
- [5] <http://physics.nist.gov/cgi-bin/ASD/energy1.pl>
- [6] Raimbault J-L.; " Physique des plasmas et applications"; Université Paris-Sud 11, (2010).
- [7] Chabert P.; "Plasma radiofréquence pour la microélectronique"; Laboratoire de physique des plasma, CNRS, Ecole polytechnique, UPMC, U. Paris Sud, (2014).