Un modèle collisionnel radiatif appliqué à l'étude des lampes à décharge gaz rare « basse pression »

T. Bezanahary et G. Zissis

Centre de Physique des Plasmas et de leurs Applications de Toulouse, CPAT, Groupe Source Intense de Photons, 118 route de Narbonne, 31062 Toulouse cedex 04, France

Résumé. Les décharges « basse pression » (mTorr - quelques dizaines de Torr) présentent un intérêt certain du fait de leurs propriétés. Elles sont utilisées très couramment dans des processus industriels (traitement de surface par exemple). Ces types de décharges ont été largement étudiés au cours de ces dernières années, tout particulièrement les lampes « basse pression » [5-6]. Dans cet article, nous traitons le cas des décharges de gaz rares simples ou de leur mélange à l'aide d'un modèle collisionnel radiatif.

1. LES LAMPES A DECHARGE

1.1. Généralités

De prime abord, les lampes à décharge sont très faciles à concevoir. Elles sont composées d'un tube de verre ou de quartz (le matériau dépendant de l'utilisation que l'on veut en faire) auquel on adjoint aux extrémités des éléments métalliques que l'on appelle : électrodes. Ce tube est préalablement rempli avec un gaz, un mélange de gaz ou d'autres éléments (le sodium par exemple). En reliant les électrodes à une source de tension, on amorce la décharge.

Ce type de source de lumière émet des raies de longueur d'onde bien déterminée. La diversité des éléments de remplissage permet d'obtenir des lampes dont les longueurs d'onde s'étalent sur une très large gamme spectrale allant de l'ultraviolet à l'infrarouge en passant par le visible.

Cependant, pour contrôler le système de manière très précise (c'est-à-dire pouvoir choisir le type de rayonnement produit, utiliser le mélange adéquat, s'assurer du bon fonctionnement, ...), il s'avère qu'une étude détaillée doit être menée. On se rend compte alors que le fonctionnement de la décharge est régi par une multitude de phénomènes tous plus ou moins complexes et surtout fortement liés les uns avec les autres.

1.2. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement des lampes fluorescentes est basé sur une conversion d'énergie. En effet, il s'agit de transformer l'énergie électrique apportée en rayonnement.

La différence de potentiel appliquée entre les électrodes crée un champ électrique. Les électrons accélérés par le champ vont entrer en collision avec les autres particules présentes dans la décharge. On aura donc des collisions entre électrons, des collisions entre un électron et un atome ou bien des collisions entre des atomes.

Lorsque les collisions se font sans modification de l'énergie interne des différents éléments mis en jeu, il s'agit de collisions élastiques. Dans ce cas, il y a juste un échange de l'énergie cinétique ce qui en fait se traduira par un échange de chaleur. Les collisions inélastiques sont des collisions au cours desquelles il y a modification de l'énergie interne des particules. Lors de ce type de collision, l'électron incident apporte une énergie suffisante pour exciter la structure électronique de l'atome. Un électron de l'atome va passer à un niveau d'énergie plus élevé. Cependant, cet électron va de nouveau retomber sur un niveau d'énergie inférieure, c'est au cours de cette relaxation qu'un photon est émis.

1.3. Les lampes fluorescentes

Les tubes des lampes fluorescentes classiques sont composés par un mélange de mercure et d'argon. Le mercure s'avère être un élément qui permet d'obtenir très facilement et avec une très bonne efficacité la raie 254 nm. Le rayonnement ultraviolet obtenu est converti en rayonnement visible à l'aide de phosphores préalablement déposés sur la paroi du tube. Cependant, des considérations environnementales peuvent nous inciter à vouloir remplacer le mercure ou au moins à en diminuer sa proportion dans le mélange. De plus, dans certaines applications bien spécifiques comme les enseignes lumineuses, les lampes pour photocopieuses ou les lampes dites « plates », le mercure est remplacé par un gaz rare pur ou un mélange de gaz rare. En effet, Les gaz rares permettent d'obtenir des raies très intéressantes :

Elément/ transition	1P1 → 1S	3P1→1S	Niveaux p → Niveaux s
Néon	73.6 nm	74,4 nm	540 nm - 808 nm (Rouge)
Argon	104,8 nm	106,7 nm	668 nm – 1149 nm (Infrarouge proche)
Krypton	116,5 nm	123,6 nm	556 nm – 599 nm (Jaune) 759 nm – 1878 nm (Infrarouge proche)
Xénon	129,6 nm	147,0 nm	450 nm – 492 nm (Bleu) 764 nm – 3623 nm (Infrarouge proche)

Tableau 1. Raies émises suivant la nature des éléments

2. LE MODELE COLLISIONNEL RADIATIF

2.1. Principes

En basse pression, la température électronique est très grande par rapport à la température du gaz (T_e est de l'ordre de 10^4 K alors que T_g est de l'ordre de quelques centaines de K). Notre système se trouve donc dans un état très éloigné de l'équilibre thermodynamique local. Nous ne pouvons donc pas appliquer les lois comme la loi de Boltzmann ou la loi de Saha. Dans ces conditions, le modèle collisionnel radiatif apparaît comme le modèle le plus approprié. Ce type de modèle a été utilisé pour étudier la lampe fluorescente classique (mélange mercure – argon) [1-2]. Il a été aussi utilisé pour étudier des décharges de gaz rares purs, notamment la décharge d'argon [3-4].

En effet, il est basé sur la résolution des équations de conservation des atomes sur les niveaux excités. Il s'agit de faire le bilan de tous les processus entrant en jeu dans le peuplement et le dépeuplement de ces différents niveaux. Puis, en résolvant le système d'équation, nous pouvons alors calculer les différentes densités et remonter aux grandeurs caractéristiques de la décharge pour enfin obtenir le rayonnement.

2.2. Les hypothèses

Pour simplifier les calculs, nous avons considéré certaines hypothèses :

- Nous supposons un tube cylindrique infiniment long. On suppose que la colonne positive occupe tout l'espace inter-électrodes.
- La colonne positive est homogène suivant l'axe.
- La colonne positive est régie par la diffusion (régime de Schottky)
- On se place en régime stationnaire

Les différentes espèces que nous avons supposées présentes dans le plasma sont les suivantes : Les atomes à l'état fondamental, les atomes à l'état excité et enfin les ions.

Il est à noter qu'il existe divers niveaux d'excitation due à la structure interne des atomes. Ainsi nous considérons les états excités 3P_1 et 1P_1 (1s4,1s2 dans la notation de Paschen). Ces états sont dit résonants. Nous prenons également en compte les atomes à l'état excité 3P_2 et 3P_0 (1s5, 1s2 dans la notation de Paschen). Ces derniers sont appelés niveaux métastables.

2.3. Les équations

Les équations à résoudre sont les équations de conservation des espèces excitées.

$$\frac{\partial n_j}{\partial t} = n_e \sum_k (n_k z_{jk} - n_j z_{kj}) + \sum_k (n_k A_{kj}^* - n_j A_{jk}^*) + H_j^{(p)} - n_j H_j^{(d)} + \text{div}(D_j \text{grad}(n_j)) \quad (1)$$

Cette équation rend compte de tous les processus contribuant aux variations de population de l'atome à l'état excité de niveau d'énergie j. Le premier terme du membre de droite traduit les collisions entre les électrons et les atomes, puis le suivant les phénomènes radiatifs. Le troisième terme traduit les collisions entre les lourds et enfin le dernier terme rend compte des pertes par diffusion. Pour calculer la densité des électrons nous utilisons l'équation de conservation de la neutralité électrique.

$$n_e = n_{GR^+} + n_{GR_2^+} \quad (2)$$

La loi des gaz parfaits est utilisée pour calculer la densité de l'état fondamental.

$$n_o = \frac{P_g}{K_b T_g} \quad (3)$$

Enfin, nous utilisons la loi d'Ohm pour calculer le champ électrique

$$I = 2\pi \int_0^R r j_e(r) dr = 2\pi E q \int_0^R r \mu_e(r) n_e(r) dr \quad (4)$$

On peut aussi noter que c'est par le biais de ce terme que nous pourrions introduire la variable temporelle.

3. LES RESULTATS

3.1. La température électronique

La température électronique compte parmi les grandeurs les plus importantes dans l'étude des propriétés du plasma. Nous avons calculé la température au centre de la décharge en résolvant l'équation de conservation de l'énergie électronique. Nous montrons ici sa variation en fonction de l'intensité du courant appliqué à l'entrée.

Figure 1. Température électronique en fonction du courant

Elle décroît à mesure que l'intensité augmente, ceci s'explique par le fait que la décharge se thermalise.

3.2. Les pertes

Une fois les transitions entre les différents niveaux calculés, nous pouvons en déduire les échanges d'énergie. Nous considérons le cas d'un mélange de gaz rare (néon-argon). Nous montrons l'influence du rayon du tube ainsi que de la pression sur l'importance des pertes élastiques et inélastiques.

Figure 2. Proportion des pertes élastiques et inélastique en fonction du courant et de la pression

4. CONCLUSION

Le modèle collisionnel radiatif est un outil complet permettant d'étudier les propriétés des décharges « basse pression ». Son élaboration nécessite un lourd travail bibliographique du fait du grand nombre de données de base qu'il requiert. Cependant, son utilisation ne pose pas de trop grands problèmes numériques.

Références

- [1] Zissis G., Benetruy P., Bernat I., Phy Rev A, volume 45, n°2 (1992), pp 1135-1148
- [2] Plagnol V., Zissis G., bernat I., Damelincoirt J.J. and Bonneval J.L., J.Phys III France, 3,(1993), pp 1167-1180
- [3] Vlcek J., J. Phys. D, vol 22, (1989), pp 623-631
- [4] Boagerts A., Gijbels R., J.A.P. volume 84, n°1,(1998), pp 121-136
- [5] Kagan, Y.M., Lyaguschenko R.I., Khakhaev A.D., Opt ; spectr. 14, (1963) pp 317
- [6] Sommerer T.J. J.Phys. D, 29, (1996), pp 769-778