

## ETUDE DES PROCESSUS ELEMENTAIRES DANS UNE GAINE ELECTROSTATIQUE POUSSIÈREUSE

Djamila BENLEMDJALDI et Abdelatif TAHRAOUI

*Laboratoire d'Electronique Quantique, Faculté de Physique, U.S.T.H.B., B.P. 32 El-Alia,  
Bab-Ezzouar, 16111 Alger, Algérie*

E-mail: [alatif\\_tahraoui@yahoo.fr](mailto:alatif_tahraoui@yahoo.fr)

**RÉSUMÉ :** Dans ce travail, nous avons étudié les effets de l'ionisation et de la recombinaison sur les gaines électrostatiques en présence des grains de poussière. Pour cela, nous avons établi un modèle théorique unidimensionnel, non magnétisé et stationnaire où les ions et les grains de poussière sont modélisés par les équations fluides. Les électrons sont considérés en équilibre thermodynamique ; par conséquent ils obéissent à la statistique de Boltzmann.

Les résultats obtenus montrent que l'épaisseur de la gaine électrostatique diminue lorsque la fréquence des collisions ion-neutre augmente, alors que la présence des impuretés augmente cette dernière. Nous avons montré aussi que l'énergie moyenne de l'impact ionique sur l'électrode est moins importante dans un plasma complexe par rapport au plasma classique où la dynamique des impuretés a été négligée. De plus, lorsque la fréquence des collisions augmente, le profil des densités électronique et ionique devient plus raide. La recombinaison ion-électron est négligeable devant l'ionisation par impact électronique des atomes ou molécules neutres. Cette dernière devient négligeable pour un taux d'ionisation  $k_i < 10^{-11} \text{ cm}^3 / \text{s}$ .

**MOTS CLÉS :** gaine électrostatique, processus élémentaires, grains de poussière

### 1. Introduction

Lorsqu'une surface solide, de potentiel négatif (par exemple une électrode), est en contact avec un plasma globalement neutre, il apparaît un champ électrique qui accélère les ions vers l'électrode et repousse les électrons vers le plasma. Il en résulte une région non neutre intermédiaire entre ces deux derniers, appelée dans la littérature gaine électrostatique. Cette dernière est très riche en processus élémentaires tels que l'ionisation, l'attachement, la recombinaison, etc. Il y'a environ quatre décennies [1], une nouvelle composante a été prise en considération à savoir, les impuretés ou les grains de poussière. La prise en considération de ces derniers rend les modèles théoriques plus réalistes et les rapprochent davantage des résultats expérimentaux.

### 2. Modèle théorique

Nous considérons un plasma de décharge électrique unidimensionnel, stationnaire et non magnétisé, confiné entre les deux électrodes d'un réacteur plasma. Les électrons sont supposés en équilibre thermodynamique, leur densité de particules est donnée par,

$$n_e = n_{e_0} \exp\left(\frac{e\phi}{T_e}\right), \quad (1)$$

où  $\phi$ ,  $e$ ,  $T_e$  et  $n_{e_0}$  sont le potentiel électrostatique, la charge élémentaire, la température électronique et la densité électronique des particules à l'équilibre respectivement.

Les ions positifs sont décrits par les équations fluides,

$$\frac{d(n_i v_i)}{dz} = k_i n_n n_e - k_r n_i n_e, \quad (2)$$

$$v_i \frac{dv_i}{dz} = \frac{F_c}{m_i} + \frac{e}{m_i} E - \frac{1}{n_i m_i} \frac{dp_i}{dz}, \quad (3)$$

où  $k_i$  et  $k_r$  sont les taux d'ionisation et d'attachement respectivement [2],  $F_c$  représente la perte d'impulsion des ions lors de leurs collisions avec le gaz neutre. Son expression est donnée par [3]:

$$F_c = -m_i n_n \sigma_{in} v_i^2, \quad (4)$$

où  $\sigma_{in}$  est la section efficace de la collision ion-gaz neutre et,  $n_n$  est la densité des particules du gaz neutre.

Pour rendre le système d'équations précédent auto-consistant, nous utilisons l'équation d'état adiabatique  $p_i = C n_i^\gamma$ , où  $\gamma = 3$  (problème 1D) et  $C$  une constante.

Les grains de poussière sont décrits par les équations fluides suivantes :

$$\frac{d(n_d v_d)}{\partial z} = 0, \quad (5)$$

$$m_d v_d \frac{dv_d}{dz} = -q_d \frac{d\phi}{dz}. \quad (6)$$

où  $n_d$ ,  $q_d$ ,  $m_d$  et  $v_d$  sont la densité des particules, la charge, la masse et la vitesse des grains de poussière respectivement.

La charge d'un grain de poussière est due principalement à l'attachement des électrons et des ions par ce dernier. Son équation de charge est donnée par,

$$v_d \frac{\partial q_d}{\partial z} = I_e + I_i, \quad (7)$$

où  $I_e$  et  $I_i$  sont les courants de charge des grains de poussière donnés par [4]:

$$I_e = -\pi r_d^2 e \left( \frac{8T_e}{\pi m_e} \right)^{1/2} n_{e,j} \exp\left( \frac{eq_d}{r_d T_e} \right), \quad (8)$$

$$I_i = \pi r_d^2 e v_i n_i \left( 1 - \frac{2eq_d}{r_d m_i v_i^2} \right), \quad (9)$$

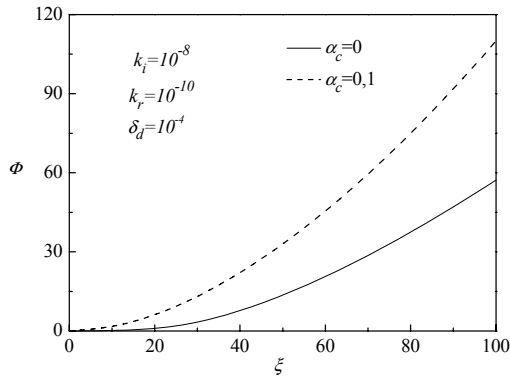
où  $r_d$  est le rayon du grain de poussière.

Pour fermer le système des équations précédentes, nous utilisons l'équation de Poisson,

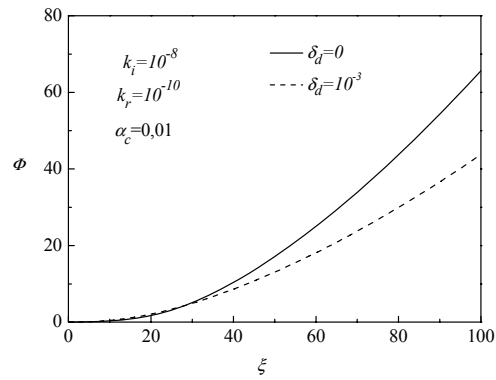
$$\frac{d^2 \phi}{dz^2} = -\frac{1}{\epsilon_0} (n_i e - n_e e + n_d q_d), \quad (10)$$

### 3. Résultats numériques et interprétations

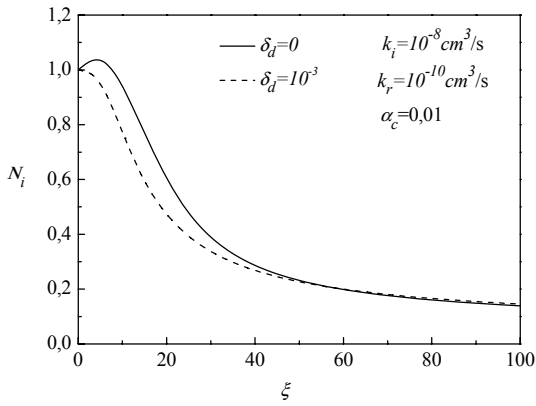
Nous avons représenté dans les figures (1) et (2) le potentiel électrostatique normalisé  $\Phi = -e\phi/T_e$  en fonction de la variable spatiale  $\xi = z/\lambda_{D_i}$ ,  $\lambda_{D_i} = (\epsilon_0 T_e / n_i e^2)^{1/2}$  étant la longueur de Debye ionique. Nous observons que la prise en compte des collisions ion-neutre réduit l'épaisseur de la gaine électrostatique. Pour la valeur  $\alpha_c = \lambda_{D_i} \sigma_{in} n_n = 0.1$ , du paramètre de collisionnalité et une électrode de potentiel électrostatique normalisé  $\Phi_0 = -e\phi_0/T_e = 60$ , l'épaisseur de la gaine électrostatique est réduite de 33%. Nous pouvons expliquer ce phénomène par le fait que les collisions des ions réduisent leur vitesse et augmentent leur densité de particules (conservation du flux ionique).



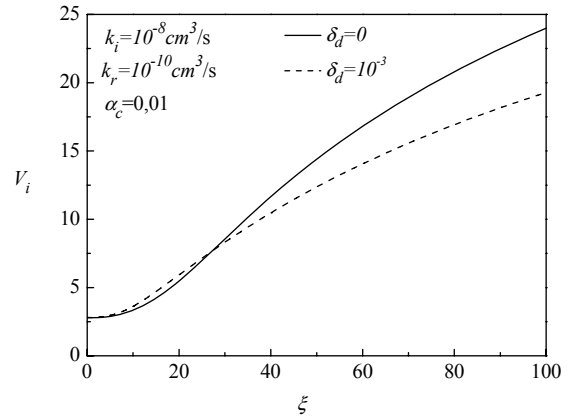
**Figure (1):** Potentiel électrostatique  $\Phi$  en fonction de la variable spatiale  $\xi$



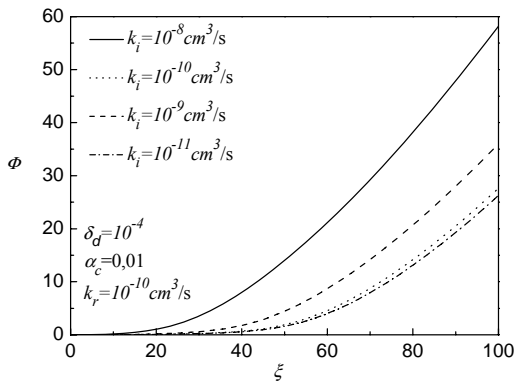
**Figure (2):** Potentiel électrostatique  $\Phi$  en fonction de la variable spatiale  $\xi$



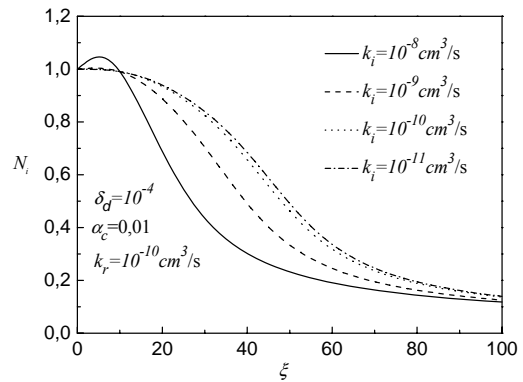
**Figure (3):** Densité des particules ionique  $N_i$  en fonction de la variable spatiale  $\xi$



**Figure (4):** Vitesse ionique  $V_i$  en fonction de la variable spatiale  $\xi$



**Figure (5):** Potentiel électrostatique  $\Phi$  en fonction de la variable spatiale  $\xi$



**Figure (6):** Densité des particules ionique  $N_i$  en fonction de la variable spatiale  $\xi$

Les paramètres physiques utilisés sont :  $\delta_d = n_{d_0} / n_{i_0} T_e = 2 eV$  ,  
 $T_i = 0.1 eV$  ,  $n_n = 10^{13} cm^{-3}$  ,  $n_{i_0} = 10^9 cm^{-3}$  et  $r_d = 1 \mu m$  .

A partir de l'équation de Poisson (5), nous pouvons conclure que le gradient du champ électrique augmente et par conséquent l'épaisseur de la gaine diminue puisque la différence de potentiel gaine-électrode est constante. Ce résultat est en bon accord avec ceux de la littérature [5]. Pour  $\alpha_c < 10^{-4}$ , les collisions n'ont aucun effet. A l'inverse, l'augmentation de la densité des grains de poussière élargie l'épaisseur de la gaine électrostatique comme le montre la figure (2) pour les mêmes raisons que nous venons de les citées. De plus, la figure (3) montre que la présence des impuretés rend le profil de la densité ionique plus raide et la figure (4) montre que l'énergie moyenne de l'impact ionique sur l'électrode est moins importante, ce qui permet de négliger l'émission des particules par l'électrode. Dans la figure (5), nous observons que l'ionisation des atomes ou molécules neutres par impact électronique élargisse la gaine électrostatique. La recombinaison ion-électron est négligeable devant l'ionisation des atomes ou molécules neutres par impact électronique. Cette dernière devient négligeable pour un taux d'ionisation  $k_i < 10^{-11} \text{ cm}^3 / \text{s}$ .

### Références

- [1] A. Bouchoule, Dusty Plasmas, Physics, Chemistry and Technological Impacts in Plasma Processing, Wiley, Chichester, UK (1999).
- [2] M. A. Lieberman and A. J Lichtenberg, Principles of Plasma Discharges and Materials Processing: Wiley, New York (1994).
- [3] X. P. Chen, Phys. Plasmas 5, 804 (1997).
- [4] J. E. Allen, Physica Scripta. 45, 497-503 (1992).
- [5] T. E. Sheridan and J. Goree, Phys. Fluids B 3, 2796 (1991).