

N° d'ordre :

N° de série :

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
FACULTE DES MATHÉMATIQUES
ET DES SCIENCES DE LA MATIÈRE
Département de physique



Mémoire
MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences de la Matière

Filière : Physique

Spécialité : Rayonnement et Spectroscopie et Optoélectronique

Présenté par : KOBBI Sara

Thème :

**Etude des mélanges gazeux pour le calcul des propriétés électriques
de plasmas à plusieurs composantes ioniques
dans un pulvérisateur cathodique en régime RF**

Soutenu publiquement

Le: 04 / 06 / 2017

Devant le jury composé de :

Dr CHOHRA Thouria	MCA	Président	UKM Ouargla
Dr BABAHANI Oumelkheir	MCA	Examineur	UKM Ouargla
Pr KHELFAOUI Fethi	Prof.	Rapporteur	UKM Ouargla
Melle BALLAH Zakia	MAA	Co-encadreur	UKM Ouargla

Année Universitaire : 2016/2017

Dédicaces

Je dédie le présent mémoire à :

*Ma mère, et mon père et mon mari qui m'ont
toujours soutenu affectivement et moralement,*

*à réaliser ce travail, ainsi que mes frères et
mes sœurs pour leur soutien et en particulier*

ma sœur Dalila, À toute ma famille

et mes amies.

A eux, je dédie ce mémoire.

Remerciements

Tout d'abord je tiens à remercier Allah le tout puissant, de m'avoir permis d'arriver à ce niveau d'études, et aussi pour m'avoir donné beaucoup de patience et de courage.

J'adresse mes vifs remerciements à mon Encadreur Pr Fethi KHELFAOUI et mon Co-Encadreur Mme Zakia BALLAH, pour m'avoir constamment guidé tout le long de mon projet et pour les conseils précieux qu'ils m'ont donné, et pour leurs serviabilités, leurs disponibilités et leurs conseils constructifs.

Je tiens à remercier, la Présidente de jury, Dr Thouraia CHOHRA, ainsi que l'Examinatrice, Dr Oumelkheir BABAHANI, pour leurs aides, soutiens et leurs conseils pendant la recherche et pour l'honneur qu'elles m'ont fait en acceptant de juger ce travail.

Je remercie également tout les membres du laboratoire de Rayonnement et Plasmas et Physique des Surfaces (LRPPS), où j'ai accompli ce travail, pour leurs aides et leurs conseils. J'adresse aussi mes sincères reconnaissances à tous les enseignants de l'Université Kasdi Merbah Ouargla pour leurs aides, soutiens et leurs conseils, et en particulier le Prof MEFTAH Mohammed Tayeb. Je voudrais remercier sincèrement tous mes enseignants du primaire jusqu'à la formation universitaire pour leurs encouragements.

SOMMAIRE

Dédicaces	I
Remerciements	II
Sommaire	III
Liste des figures	iv
Liste des tableaux	v
<u>Introduction générale</u>	1
<u>CHAPITRE I : Généralités sur le plasmas froids et la pulvérisation cathodique</u>	
I.1 Généralités sur les plasmas froids	3
I.1.1 Historique sur les plasmas froids	3
I.1.2 Définition de plasmas froids	3
I.1.3 Grandeurs caractéristiques du plasma	3
I.1.3.1 Densités des espèces	3
I.1.3.2 Potentiel plasma	3
I.1.3.3 Degré d'ionisation	4
I.1.3.4. Les températures électronique et ionique	4
I.1.3.5 Fréquence du plasma	5
I.2. Méthodes générales de dépôt des couches minces	5
I.2.1 Le dépôt chimique en phase vapeur (CVD)	6
I.2.2 Dépôt physique en phase vapeur (PVD)	6
I.2.2.1 Le dépôt par la pulvérisation cathodique	7
I.2.2.2 Principe de la pulvérisation cathodique	7
I.2.2.3 Les types de la pulvérisation cathodique	8
I.3 Modélisations des plasmas de décharge électrique	8
I.3.1 Modèle fluide	8
I.3.1.1 Les équations principales de modèle fluide	9
I.3 Travaux réalisés pour la détermination des propriétés électrique	10
<u>Chapitre II : Modélisation numérique de plasmas à plusieurs composantes ioniques</u>	
Introduction	11
II.1. Phénomène physique	11
II.2 Modélisation mathématique	12
II.2.1 Introduction	12
II.2.2. Les équations principales	12
II.2.3. Les réactions chimiques en phase gazeuse	13
II.2.4 Les coefficients de diffusion et de mobilité du mélange gazeux	14

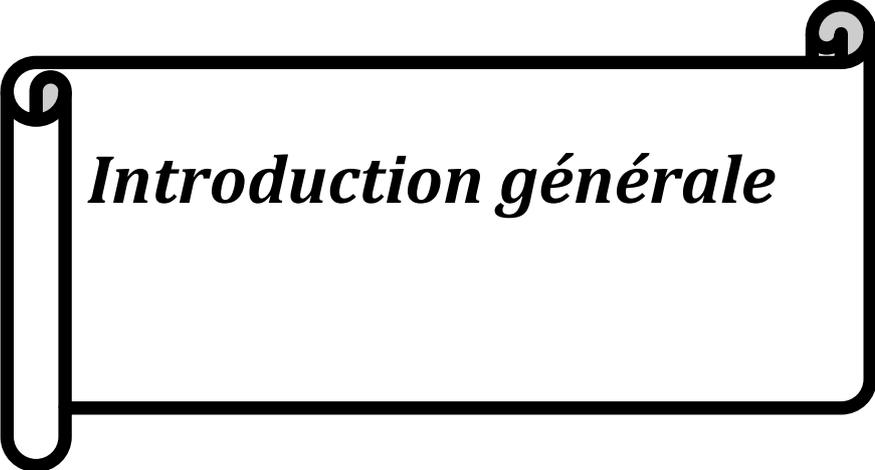
II.2.4.1 Interaction neutre-neutre	14
II.2.4.1 La pression totale	15
II.2.4.2 Interaction ion-neutre	15
II.2.4.3 Interaction ion-ion	16
II.3 Modélisation numérique	17
II.3.1 Discrétisation du domaine de la simulation.	17
II.3.2. Rapprochement de la dérivée partielle par les différences finies	17
II.3.3 Initialisation des données et les conditions aux limites	18
II.3.4.Calcul des propriétés électriques	20
II.3.5 Organigramme pour le calcul numérique	20
<u>Chapitre III : Résultats et Discussion</u>	
Introduction	23
III.1 Les données de base	23
III.2. Détermination des valeurs initiales des densités	24
III.3. Les profils des propriétés électriques	25
III.4. Comparaison des resultants	27
III.5. Les coefficients de mobilité et de diffusion pour les ions	27
III.6. Etude paramétrique	28
III.6.1 Effet des proportions de gaz	28
III.6.2 Effet de la tension électrique	29
<u>Conclusion générales et perspectives</u>	
<u>Références</u>	
Résumé	

Liste des figures

Figure I.1 : schéma de la classification des procédés de dépôt de couche mince.	6
Figure I.2 : Principe de la pulvérisation cathodique.	7
Figure II.1 : Phénomène de pulvérisateur cathodique.	12
Figure II.2 : Discrétisation de domaine de simulation.	17
Figure II.3 : Densités électronique et ionique suivant E. Gogolides et H. Sawin	19
Figure II.4 : Organigramme pour le calcul des densités des particules et du champ électrique	21
Figure II.5 : Organigramme pour calcul des coefficients de transport	22
Figure III.1 : Profil des valeurs initiales des densités en fonction de Z.	24
Figure III.2: Profil des valeurs initiales des particules O, O ⁺ , O ⁻ en fonction de Z.	25
Figure III.3 : Profil des densités en fonction de Z.	25
Figure III.4 : Profil du champ électrique en fonction de la position.	26
Figure III.5 : Les densités des particules suivant D. Benyoucef (10% O ₂ , 90% Ar).	26
Figure III.6: Profil du coefficient de mobilité des ions en fonction de Z.	27
Figure III.7 : Profil du coefficient de diffusion des ions en fonction de Z.	27
Figure III.8 : Profil des valeurs initiales des densités pour (50% O ₂ , 50% Ar) en fonction Z. .	28
Figure III.9 : Profils des densités pour (50% O ₂ , 50% Ar) en fonction de Z.	28
Figure III.10: Profils des densités en fonction de Z pour deux valeurs de la tension électrique (100V et 200 V).	29

Liste des tableaux

Tableau II.1: Les réactions les plus importantes dans le volume	14
Tableau II. 2: les paramètres de Lennard-Jones pour les calculs des coefficients de diffusion	15
Tableau II.3 : Polarisabilités des ions et des molécules dans le volume.	16
Table II.4 : Conditions aux limites	19
Tableau III.1: Les données de simulation	23



Introduction générale

Introduction générale

Les couches minces ont connu ces dernières années un développement remarquable dans plusieurs domaines comme dans la fabrication des cellules solaires, des écrans plats des composants microélectroniques. L'élaboration de couches minces se réalise en général soit par procédés chimiques en phase vapeur (Chemical Vapor Deposition ou CVD), soit par des procédés physiques en phase vapeur (Physical Vapor Deposition ou PVD).

Les procédés physiques en phase vapeur sont des dépôts de couches minces qui se basent sur des phénomènes physiques. Ces dépôts physiques peuvent être obtenus par des méthodes de pulvérisation ou d'évaporation [1].

La méthode la plus utilisée dans les procédés PVD est la méthode de pulvérisation cathodique. Cette méthode est une méthode qui permet de former des couches minces avec une grande vitesse et avec un rendement considérable, l'amélioration de ces couches minces nécessite un choix approprié du gaz, de la nature de la décharge et des conditions expérimentales [2].

L'étude expérimentale de plasma se fait par l'utilisation des méthodes de diagnostic spectroscopique de masse ou d'analyse spectrale. Pour l'étude théorique, il existe plusieurs modèles comme le modèle microscopique, le modèle électrique, le modèle hybride et le modèle fluide [3].

L'objectif de notre travail est le calcul des propriétés électriques (la densité électronique, les densités ioniques, le potentiel électrique et le champ électrique) d'un plasma à plusieurs composantes ioniques d'un mélange gazeux Ar/O₂ dans un pulvérisateur cathodique. Le pulvérisateur cathodique est alimenté par une source de tension radiofréquence RF de 13,56 MHz.

Dans le premier chapitre, nous allons présenter des généralités sur les plasmas froids et les différents paramètres nécessaires. Après nous présenterons la déposition PVD dans le pulvérisateur cathodique et la modélisation des plasmas de décharge électrique où nous nous intéressons au modèle fluide.

Le deuxième chapitre présente de la modélisation numérique pour calculer les propriétés électriques dans les plasmas à plusieurs composantes ioniques. Après la définition du phénomène physique, nous présenterons comment traiter les mélanges gazeux. Pour le

Introduction générale

calcul, nous avons choisi la Méthode des Différences Finies (MDF) et la méthode itérative de Gauss-Seidel.

Le troisième chapitre est une présentation des différents résultats. Les données du calcul sont en général, celles des travaux de D. Benyoucef [4, 5]. Il s'agit des densités de huit particules (les électrons, les molécules O_2 , les atomes O et Ar et quatre ions : Ar^+ , O_2^+ , O^- , O^+). Le champ électrique et le potentiel électrique obéissent aux équations de Poisson et de Maxwell.

Les conclusions générales et les perspectives sont présentées à la fin du mémoire.

Chapitre I :

*Généralités sur les plasmas
froids et la pulvérisation
cathodique*

Chapitre I :**Généralités sur les plasmas froids et la pulvérisation cathodique****I.1 Généralités sur les plasmas froids****I.1.1 Historique sur les plasmas froids**

Le terme "plasma" a été introduit en physique en 1928 par le physicien américain I. Langmuir pour désigner, dans les tubes à décharge, certaines régions équipotentielles contenant un gaz ionisé électriquement neutre. Ce mot a été utilisé, pour désigner un état dilué de la matière, analogue à un gaz, mais constitué de particules chargées, électrons et ions positifs, en proportions telles que le milieu soit globalement neutre [6].

I.1.2 Définition de plasmas froids

Les plasmas froids sont des gaz faiblement ionisés, ils contiennent des charges négatives (électrons et les ions négatifs), des charges positives et des particules neutres. Ils sont caractérisés par des paramètres macroscopiques : la température, la pression et les propriétés physiques: conductivité électrique, densité, vitesse moyenne, énergie moyenne [7].

I.1.3 Grandeurs caractéristiques du plasma**I.1.3.1 Densités des espèces**

La densité d'une espèce donnée représente le nombre des particules contenues en moyenne par unité de volume autour d'un point donné de l'espace et à un instant donné. Les densités sont souvent exprimées par cm^{-3} ou m^{-3} [5].

I.1.3.2 Potentiel plasma

Le potentiel électrostatique moyen dans le plasma est bien défini, il est à peu près constant dans le volume du plasma dans le cas d'une géométrie plan-plan. On peut le définir à partir de l'énergie nécessaire pour transporter une particule chargée depuis le plasma jusqu'à un endroit où le potentiel est nul. D'une manière générale le potentiel plasma est supérieur par rapport aux parois qui l'entourent [5].

I.1.3.3 Degré d'ionisation

Le degré d'ionisation nous permet de classer les plasmas, en plasmas faiblement ionisés (plasmas froids, en général) ou fortement ionisés (plasmas chauds) [8].

$$\alpha = \frac{n_e}{n_e + n_0} \quad (\text{I.1})$$

n_0 : Densité neutre

n_e : Densité électronique

Si $\alpha < 10^{-4}$, alors le plasma sera dit « faiblement » ionisé et si $\alpha > 10^{-4}$, alors il est dit « fortement » ionisé. Le mouvement des particules chargées peut être alors dominé par des collisions avec d'autres particules chargées si le plasma est « fortement ionisé » ou par collision avec des neutres s'il est « faiblement ionisé ».

I.1.3.4. Les températures électronique et ionique

Les plasmas froids sont des milieux gazeux hors équilibre thermodynamique. Les énergies des électrons, des ions et des molécules excitées sont différentes ; il n'existe pas de température thermodynamique pour le plasma comme on peut la définir pour un gaz neutre. La valeur des énergies des espèces présentes dans le plasma suit cependant une loi de distribution statistique qui peut être de type Maxwell-Boltzmann [9] et l'on peut ainsi définir la température statistique des différents éléments en utilisant l'équation :

$$E_c = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot m v^2 = \left(\frac{3}{2}\right) \cdot k_B T \quad (\text{I.2})$$

Où : E_c est l'énergie cinétique, m est la masse de la particule, v est la vitesse quadratique moyenne, T est la température en Kelvin et k_B est la constante de Boltzmann. On définit ainsi trois températures :

- T_e : pour les électrons
- T_i : Pour les ions.
- T_n : Pour les espèces neutres.

Les masses des ions et des molécules étant proches, leurs températures sont voisines et de l'ordre de la température ambiante. Par contre la température électronique est beaucoup plus élevée.

I.1.3.5 Fréquence du plasma

Si on produit dans un plasma, une perturbation locale sous forme d'un excès de charge électrique, le plasma va tendre à revenir vers l'état d'équilibre ce qui engendre généralement des oscillations pendulaires non amorties du plasma autour de son état d'équilibre [6].

La pulsation ω_{pe} de ces oscillations plasma est:

$$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{n_{e0} p_e^2}{m_e \epsilon_0}} \quad (I.3)$$

ϵ_0 : Permittivité du vide = $8,85 \cdot 10^{-12} \text{F.m}^{-1}$.

q_e : Charge de l'électron = $1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$.

n_{e0} : Densité électronique du plasma non perturbé.

La fréquence plasma électronique:

$$f_{pe} = \frac{\omega_{pe}}{2\pi} \quad (I.4)$$

La fréquence plasma ionique :

$$f_{pi} = \frac{\omega_{pi}}{2\pi} \quad (I.5)$$

I.2. Méthode générales de dépôt des couches minces

La déposition des couches minces peut être réalisée par différents procédés : par procédés chimiques en phase vapeur (Chemical Vapor Deposition ou CVD) et par procédés physiques en phase vapeur (Physical Vapor Deposition ou PVD). La classification des méthodes est présentée sur le schéma de la Figure I.1.

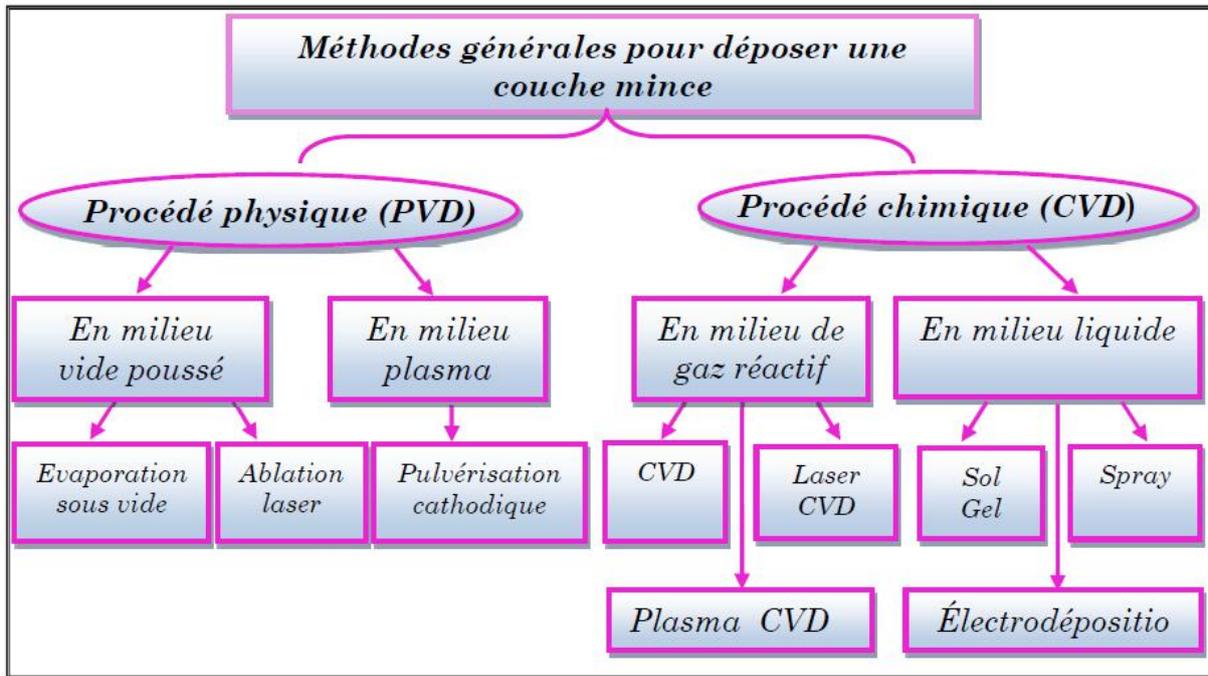


Figure I.1 : Schéma de la classification des procédés de dépôt de couches minces [10].

Les techniques les plus utilisées pour déposer des couches minces sont : les procédés PVD et les procédés CVD [10].

I.2.1 Le dépôt chimique en phase vapeur (CVD)

Ce procédé permet d'obtenir un dépôt solide en faisant réagir chimiquement des composés volatils sur un substrat, les parois du réacteur sont généralement chauffées. Une température du substrat élevée permet de vaincre la barrière d'activation de la réaction, de favoriser la diffusion dans le substrat des atomes apportés à la surface, ce qui permet une bonne adhésion du dépôt [11].

I.2.2 Dépôt physique en phase vapeur (PVD)

Le dépôt physique en phase vapeur (PVD: Physical Vapor Deposition) présente beaucoup d'avantages par rapport au dépôt chimique en phase vapeur; par exemple les films sont denses, le processus est facile à contrôler et il n'y a pas pollution [12]. La méthode la plus utilisée dans les procédés PVD est la méthode de pulvérisation cathodique.

I.2.2.1 Le dépôt par la pulvérisation cathodique

Le phénomène de pulvérisation a été découvert en 1852 par Grove. Dans un tube à décharge, il a observé la création d'un dépôt du métal constituant les électrodes sur les parois du tube. Pour des raisons technologiques, l'utilisation intensive de la pulvérisation comme moyen de production de couches minces date seulement des années 50 [13].

I.2.2.2 Principe de la pulvérisation cathodique

La pulvérisation cathodique est un phénomène d'éjection des particules à partir de la surface d'un matériau. Lorsque celui-ci est bombardé par un flux d'ions énergétique d'un plasma, les particules sont éjectées de la cible ; ils viennent se déposer sur la surface du substrat (anode) placée parallèlement à la cible à quelques centimètres (3 à 5 cm). Les ions d'argon sont accélérés dans le champ électrique de la cible, portée à une tension négative (3 à 5KV) par rapport à celle du plasma [13]. La Figure I.2 présente le principe de la pulvérisation cathodique.

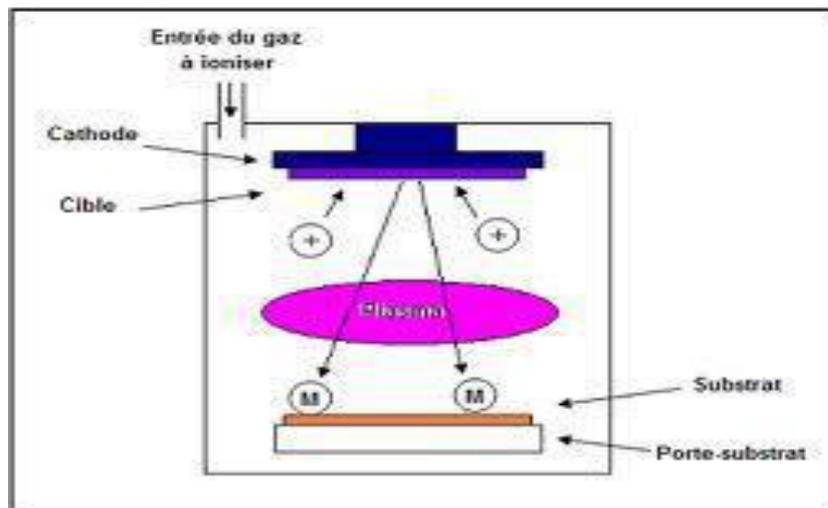


Figure I.2 : Principe de la pulvérisation cathodique [13].

I.2.2.3 Les types de la pulvérisation cathodique

Les principaux types de la pulvérisation cathodique sont :

- La pulvérisation cathodique continue DC : elle permet de déposer les matériaux conducteurs et semiconducteurs [14].
- La pulvérisation cathodique alternative AC : elle permet de déposer les matériaux conducteurs, semiconducteurs et les matériaux isolants [14].

I.3. Modélisations des plasmas de décharge électrique

L'expérimentation sur les plasmas coutant cher, et du fait de la complexité des problèmes rencontrés dans la physique des plasmas, il est indispensable de développer des modèles numériques de simulation des mécanismes rencontrés lors d'une décharge. En effet, la modélisation joue un rôle assez important dans le développement de la théorie des plasmas de par la pertinence des résultats numériques prédits par ces simulations, pour simuler les plasmas de décharges. On peut distinguer quatre catégories de modèles [5] :

- Modèle Cinétique
- Modèle Particulaire
- Modèle Hybride
- Modèle Fluide

Nous nous intéressons dans ce mémoire à la description du Modèle Fluide.

I.3.1 Modèle fluide

Les propriétés du milieu (densités, vitesse, énergie...) sont décrites uniquement par des grandeurs moyennes, et non par les fonctions de distribution des vitesses des particules. Ces grandeurs sont les solutions des trois premiers moments de l'équation de Boltzmann, qui correspondent aux équations de continuité, de transfert de quantité de mouvement et de transfert d'énergie [15].

I.3.1.1 Les équations principales du modèle fluide

➤ **Equation de continuité** [16] :

Pour chaque particule dans la décharge (électron, ion, neutre) un bilan de densité peut être écrit comme :

$$\frac{\partial n_j}{\partial t} = -\nabla \Gamma_j + S_j \quad (I.6)$$

$$\Gamma_j = -D_j \nabla n_j \pm \mu_j n_j E \quad (I.7)$$

Où:

n_j , Γ_j et S_j sont respectivement la densité, le flux et le terme source de particule j . D et μ sont respectivement le coefficient de diffusion et le coefficient la mobilité. Pour les neutres la mobilité est égale à zéro [17].

On adopte : + pour les ions positifs ; - pour les électrons et les ions négatifs.

➤ **Equation de transfert de quantité de mouvement** [18] :

$$\frac{\partial nm \langle \vec{V} \rangle}{\partial t} + \vec{\nabla} (nm \langle \vec{V} \vec{V} \rangle) + \vec{\nabla} P - n \vec{F} = R_m \quad (I.8)$$

Où :

$$R_m = -mn \langle \vec{V} \rangle V_m \quad (I.9)$$

\vec{F} : La force externe résultant du champ électrique et magnétique, V_m : la fréquence de transfert de la quantité de mouvement, R_m la quantité de mouvement perdu en raison des collisions, P : la pression, \vec{V} la vitesse des particules chargées et le symbole $\langle \rangle$ indique une moyenne statistique.

➤ **Equation d'énergie** [18] :

$$\frac{\partial n \langle E \rangle}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{q} - n \vec{F} \cdot \vec{V} = R_{en} \quad (I.10)$$

R_{en} : est le taux de perte d'énergie, q faisceau du flux totale.

Ces équations avec l'équation de Poisson et les équations de Maxwell permettent le traitement du plasma comme un fluide.

I.3 Travaux réalisés pour la détermination des propriétés électriques

Plusieurs chercheurs ont travaillé sur des propriétés électriques; ils ont proposé divers modèles.

- E. Gogolides et H. Sawin (1992) [18] se sont intéressés à la détermination des propriétés électriques d'un plasma d'Ar et de FS_6 , ils ont utilisé le modèle fluide à une dimension en régime stationnaire.
- D. Benyoucef (2011) [5] a étudié les caractéristiques électriques et énergétiques dans les décharges RF de type magnétron dans un mélange (Ar, O_2) par l'application du modèle fluide à géométrie cylindrique et la méthode type Monte Carlo.
- Z. Ballah (2009) [2] a étudié les propriétés électriques d'un plasma d'argon utilisé pour la déposition des couches minces de silicium dans un pulvérisateur cathodique magnétron en régime stationnaire. Le pulvérisateur est alimenté par une source de tension radiofréquence et la configuration géométrique est unidimensionnelle.
- S. Abid (2012) [14] s'est intéressée à la détermination des propriétés électriques (densité électronique, densité ionique, potentiel électrique et le champ électrique) d'un plasma d'argon utilisé pour la déposition des couches minces de silicium dans un pulvérisateur cathodique magnétron à deux dimensions, elle a appliqué le modèle fluide pour un système stationnaire à géométrie cylindrique.
- Z. Kouidri (2015) [19] s'est intéressée à la détermination des propriétés électriques (densité électronique, densité ionique, température électronique et potentiel électrique) d'un plasma d'argon utilisé pour la déposition de couches minces de silicium par pulvérisation cathodique à une dimension. Elle a appliqué le modèle fluide à une dimension en régime stationnaire.
- K. Benouaer (2014) [20] s'est intéressée à la détermination des propriétés électriques (densité électronique, densité ionique, potentiel électrique et le champ électrique) d'un plasma à plusieurs composantes ioniques (mélange Ar, O_2) utilisé pour la déposition de couches minces de silicium par pulvérisation cathodique à une dimension en régime stationnaire, elle a appliqué le modèle fluide à une dimension en régime stationnaire.

Chapitre II :

*Modélisation numérique de
plasmas à plusieurs
composantes ioniques*

Chapitre II :

Modélisation numérique de plasmas à plusieurs composantes ioniques

Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'étude d'un mélange gazeux (Ar/O₂) dans un pulvérisateur cathodique. Nous présentons la modélisation pour le calcul des propriétés électriques de plasmas à plusieurs composantes ioniques en considérant des coefficients de transport variables dans le mélange.

II.1. Phénomène physique

Nous avons considéré que :

- ❖ Le pulvérisateur cathodique est alimenté par une source de radiofréquence RF 13,56MHz.
- ❖ Le réacteur est constitué de deux plaques placées parallèlement à quelques centimètres. La cible peut être considérée comme une cible de silicium.
- ❖ Le gaz introduit dans le réacteur est un mélange gazeux (Ar/O₂).
- ❖ Le champ électrique créé entre les deux électrodes provoque l'ionisation du gaz.
- ❖ Les réactions chimiques peuvent se produire dans le volume. Les particules considérées sont : électrons, Ar, O₂, O, e, Ar⁺, O₂⁺, O⁻ et O⁺.
- ❖ Les coefficients de transport des différentes particules du mélange sont considérés variables dans l'espace.

Nous considérons que les densités volumiques des deux molécules Ar et O₂ constantes et invariables ; et nous proposons la résolution du problème à une dimension et en régime stationnaire. La figure II.1 présente le phénomène physique.

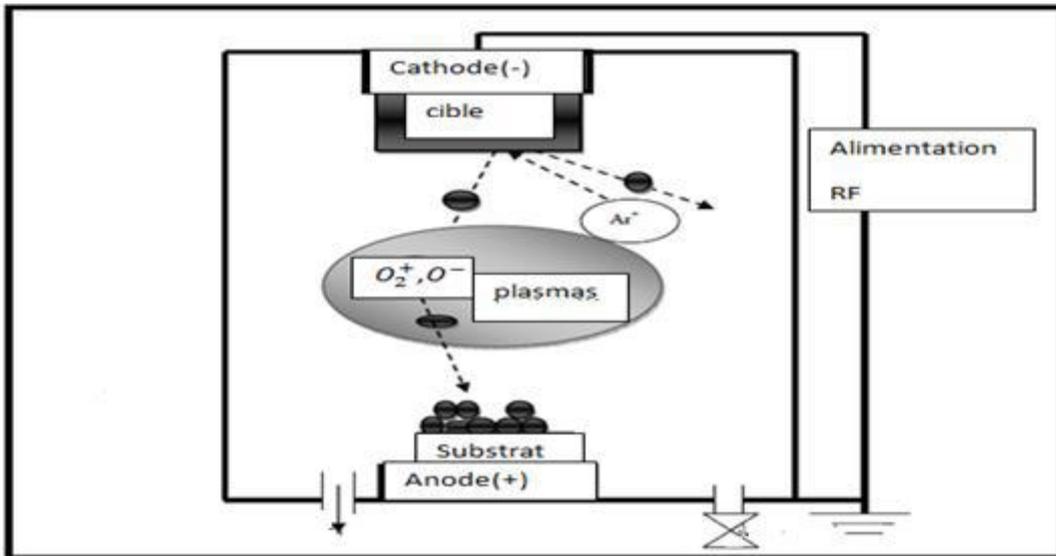


Figure II.1 : Phénomène de pulvérisateur cathodique [14]

II.2. Modélisation mathématique

II.2.1 Introduction

Pour la détermination des propriétés électriques, nous avons choisi le modèle fluide à une dimension en régime stationnaire, dans notre étude nous nous intéressons à huit particules les plus dominants dans le volume (Ar, O₂, O, e, Ar⁺, O₂⁺, O⁻ et O⁺).

II.2.2. Les équations principales

Les équations principales pour le calcul sont :

a. Equation de continuité [17] :

$$\frac{\partial \Gamma_j}{\partial z} = S_{réac,j} \quad (\text{II.1})$$

$$\Gamma_j = -D_j \frac{\partial n_j}{\partial z} \pm \mu_j n_j E \quad (\text{II.2})$$

Où: S_j le terme source de particule j ;

Par exemple A + B → C + D ; le terme source pour les particules dans une telle réaction est:

$$S_{réac,C} = S_{réac,D} = -S_{réac,A} = -S_{réac,B} = K_{réac} n_A n_B$$

Où K_{réac} : la constante de réaction. La forme générale des constantes de réaction est :

$$K = AT^B \exp\left(-\frac{C}{T}\right) \quad (\text{II.3})$$

Dans l'équation II.3, les paramètres A, B et C sont des constantes liées à la réaction chimique.

b. **Equation de Maxwell** [17] :

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} = \frac{e}{\varepsilon_0} (n_{O^+} + n_{O_2^+} + n_{Ar^+} - n_{O^-} - n_e) \quad (\text{II.4})$$

c. **Equation de Poisson** :

$$\Delta V + \frac{\rho}{\varepsilon_0} = \Delta V + \frac{e}{\varepsilon_0} (n_{O^+} + n_{O_2^+} + n_{Ar^+} - n_{O^-} - n_e) = 0 \quad (\text{II.5})$$

II.2.3. Les réactions chimiques en phase gazeuse

Pour avoir une couche mince du silicium, on utilise un mélange gazeux (Ar/O₂). Nous considérons dix réactions chimiques les plus dominantes dans le volume.

Le tableau II.1 présente les réactions chimiques de production et de consommation des molécules O₂, des atomes O et Ar et des quatre ions (Ar⁺, O₂⁺, O⁻, O⁺) et e choisis et les constantes de réaction.

Tableau II.1: Les réactions les plus importantes dans le volume [21].

Réactions chimiques	Constantes de réaction [m^3S^{-1}]
$e + A_r \rightarrow A_r^+ + 2e$	$K_1 = 2.3 \times 10^{-14} \cdot T_e^{0.59} \cdot \exp(-17.44/T_e)$
$e + O_2 \rightarrow O_2^+ + e + e$	$K_2 = 2.43 \times 10^{-15} \cdot T_e^{1.03} \cdot \exp(-12.29/T_e)$
$e + O_2 \rightarrow O + O^-$	$K_3 = 1.07 \times 10^{-15} \cdot T_e^{-1.39} \cdot \exp(-6.26/T_e)$
$O_2^+ + O^- \rightarrow O_2 + O$	$K_4 = 2.6 \times 10^{-14} (300/T_g)^{0.44}$
$O^+ + O^- \rightarrow O + O$	$K_5 = 4.00 \times 10^{-14} (300/T_g)^{0.43}$
$e + O^- \rightarrow O + e + e$	$K_6 = 5,4710^{-14} \cdot T_e^{0.324} \cdot \exp(-2.98/T_e)$
$O + O^- \rightarrow O_2 + e$	$K_7 = 2.3 \times 10^{-16}$
$e + O_2 \rightarrow O^+ + O^- + e$	$K_8 = 7.10 \times 10^{-17} \cdot T_e^{0.5} \cdot \exp(-17/T_e)$
$O_2 + O^+ \rightarrow O_2^+ + O$	$K_9 = 2.10 \times 10^{-17} (300/T_g)^{0.5}$
$O_2^+ + O^- \rightarrow O + O + O$	$K_{10} = 2.6 \times 10^{-14} (300/T_g)^{0.44}$

II.2.4 Les coefficients de diffusion et de mobilité du mélange gazeux

Dans un mélange gazeux les coefficients de diffusion et de la mobilité sont calculés selon les cas suivants :

II.2.4.1 Interaction neutre-neutre

Le coefficient de diffusion binaire $D_{i,j}$ de l'espèce neutre j dans chaque espèce neutre i dans le gaze est calculé par la formule :

$$D_{i,j} = \frac{3k_B T_{\text{gaz}} (4\pi k_B T_{\text{gaz}} / 2m_{ij})^{1/2}}{16P_{\text{tot}} \pi \sigma_{ij}^2 \Omega_D(T^*)} \quad (\text{m}^2/\text{S}) \quad (\text{I.6})$$

où P_{tot} la pression totale du gaze m_{ij} est la masse réduite $m_{ij} = m_i m_j / (m_i + m_j)$,

$\sigma_{ij} = (\sigma_i + \sigma_j) / 2$ est le diamètre de collision binaire et $T^* = T_{\text{gaz}} / \epsilon_{ij}$ avec $\epsilon_{ij} = \sqrt{\epsilon_i \epsilon_j}$ sont les paramètres de Lennard-Jones $\sigma(A^0)$ et $\epsilon(K)$ et K_B est la constante de Boltzmann.

$$\Omega_D(T^*) = \frac{A}{T^* B} + \frac{C}{e^{D \cdot T^*}} + \frac{E}{e^{F \cdot T^*}} + \frac{G}{e^{H \cdot T^*}}$$

Où: $A = 1.06036$, $B = 0.15610$, $C = 0.19300$, $D = 0.47635$, $E = 1.03587$,
 $F = 1.52996$, $G = 1.76474$, $H = 3.89411$ [22].

Calculé sur le fond continue (ou background) des particules i , le coefficient de diffusion D_j des espèces neutre j peut être obtenu de la relation suivante [22] :

$$\frac{P_{\text{tot}}}{D_j} = \sum_{i=\text{background}} \frac{P_i}{D_{i,j}} \quad (\text{II.7})$$

Il existe d'autres relations permettant de calculer la diffusivité binaire [23] :

$$D_{ij} = \frac{0.001858 T^{3/2} \sqrt{(M_i + M_j)/M_i M_j}}{P \sigma_{i,j} \Omega_D} \text{ en } [\text{cm}^2/\text{s}] \quad (\text{II.8})$$

Où : P est la pression partielle du système binaire (i,j) en (atm) ;

Et M_i et M_j sont les masses moléculaires en (g/mole).

Le tableau II.2 présente les constantes qui se rapportent aux calculs des coefficients de diffusion.

Tableau II.2 : Les paramètres de Lennard-Jones pour les calculs des coefficients de diffusion

Les molécules	$\sigma_i [\text{Å}^0]$	$\epsilon_i [\text{K}]$	Les références
Ar	3.504	117.70	[24]
O ₂	3.433	113	[25]
O	2.660	70.0	[26]

II.2.4.1 La pression totale

Dans un mélange de gaz parfaits de composition connue à une pression totale P_{tot} et une température T données et occupant un volume V donné, en définissant la pression partielle P_i du composant i comme étant la pression du gaz i, on a [27] :

$$P_i V = n_i R T \quad (\text{II.9})$$

Où : n_i le nombre de particule.

Par conséquent, en vertu de la première loi des mélanges :

$$P_{\text{tot}} = \sum P_i \quad (\text{II.10})$$

La pression totale est égale à la somme des pressions partielles ; ce résultat est connu sous le nom de loi de Dalton.

Si on considère le nombre de molécules contenu dans une unité de volume, on a [17] :

$$P_{\text{tot}} = K_b T_{\text{gaz}} \sum N_i \quad (\text{II.11})$$

II.2.4.2 Interaction ion-neutre

Le coefficient de mobilité binaire de l'ion j dans chaque espèce neutre i est défini par la formule suivante [17]:

$$\mu_{i,j} = 0.514 \frac{T_{\text{gaz}}}{p \sqrt{m_{ij} \alpha_i}} \quad (\text{m}^2/\text{VS}) \quad (\text{II.12})$$

Où: P la pression en (Pascal), m_{ij} la masse réduite, T_{gaz} la température de gaz et α_i (A^3) la polarisabilité du background ou fond continue de gaz i .

Pour obtenir μ_j , le coefficient de mobilité de d'ion j , on utilise la loi de Blanc [28]:

$$\frac{P_{\text{tot}}}{\mu_j} = \sum_{i=\text{background}} \frac{P_i}{\mu_{i,j}} \quad (\text{II.13})$$

Où : P_{tot} est la pression totale du gaz et P_i est la pression partielle du background du gaz i .

Pour les ions, la relation entre les deux coefficients de transport D_j et μ_j est :

$$D_j = \frac{K_B T_{\text{ion}}}{e} \mu_j \quad (\text{II.14})$$

Où T_{ion} la température des ions qui est supposé être égale à la température du gaz, cette relation est connue sous le nom de relation d'Einstein.

Pour les ions présents dans le gaz, les coefficients de transport, en fonction de la valeur locale du champ électrique réduit, nous avons la relation suivante [29] :

$$\text{Où :} \quad K_B T = K_B T_{\text{gaz}} + \frac{m+m_g}{5m+3m_g} m_g (\mu E)^2 \quad (\text{II.15})$$

m : Masse de l'ion.

m_g : Masse du mélange gazeux.

Le tableau II.2 présente la polarisabilité des ions et des molécules dans le volume.

Tableau II.3 : Polarités des ions et des molécules dans le volume.

Molécule	Polarisabilité [A^3]	Référence
Ar	11.13	[16]
O ₂	1.6	[16]
O	5	[16]

II.2.4.3 Interaction ion-ion

Les collisions ion-ion sont souvent négligées parce qu'il est considéré que les densités des ions sont faibles dans ces milieux. Cette considération permet de traiter les ions comme séparés ; et il est plus facile de résoudre ces problèmes [30].

II.3 Modélisation numérique :

Pour la résolution numérique des propriétés électrique, nous choisissons la Méthode des Différences Finies (MDF). Cette méthode est basée sur les étapes suivantes [31]:

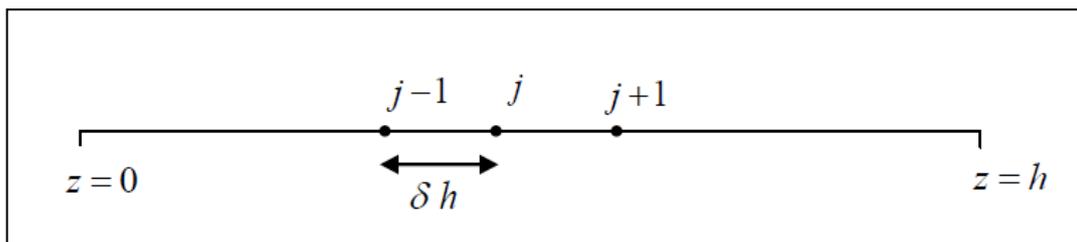
1. Discrétisation du domaine de la simulation.
2. Rapprochement de la dérivée partielle par une différence finie.
3. Initialisation des données et détermination des conditions initiales et des conditions aux limites.

II.3.1 Discrétisation du domaine de la simulation :

Le domaine de la simulation entre les deux électrodes est divisé à j_{max} points selon l'axe (z).

$$z(j)=(j-1)dh \quad (II.16)$$

Où : $dh = \frac{H}{j_{max} - 1}$, j est la division selon l'axe z, H la distance entre les deux électrodes et dh est le pas de la discrétisation. Le schéma suivant (figure II.1) présente la discrétisation du domaine de simulation :



La figure II.1 : Discrétisation du domaine de simulation.

II.3.2. Rapprochement de la dérivée partielle par les différences finies

La Méthode des Différences Finies (MDF) consiste à approximer les dérivées partielles d'une équation au moyen des développements du Taylor [32].

Le développement de Taylor par rapport l'espace (z) :

$$f(j \pm 1) = f_j \pm hz \left(\frac{\partial f}{\partial z} \right) + \frac{(hz)^2}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} \pm \dots$$

Les approximations des dérivées partielles d'ordre un et deux dans la Méthode de Différences Finies (MDF) sont:

$$\frac{\partial f}{\partial z} = \frac{f_{j+1} - f_{j-1}}{2dh}$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial z^2} = \frac{f_{j-1} - 2f_j + f_{j+1}}{(dh)^2}$$

II.3.3 Initialisation des données et les conditions aux limites

1. Initialisation des données

Pour Les densités électronique et ionique, nous avons considéré les densités à la forme quadratique [33] :

$$n_j = AN1_j + AN2_j \times \left(1 - \frac{(j-1)}{j_{\max} - 1} \right)^2 \times \left(\frac{(j-1)}{j_{\max} - 1} \right)^2 \quad (\text{en cm}^{-3}) \quad (\text{II.18})$$

Où: $AN1_j$, $AN2_j$ sont des constantes.

Et nous avons considéré au niveau des deux électrodes la densité électronique nulle. Les densités ioniques sont des valeurs comme les résultats de l'article de E. Gogolides et H. Sawin [18], qui ont calculé des propriétés électriques d'un plasma Ar et de FS₆, Ils ont utilisé le modèle fluide à une dimension en régime stationnaire.

La figure II.2 présente le résultat de leur calcul.

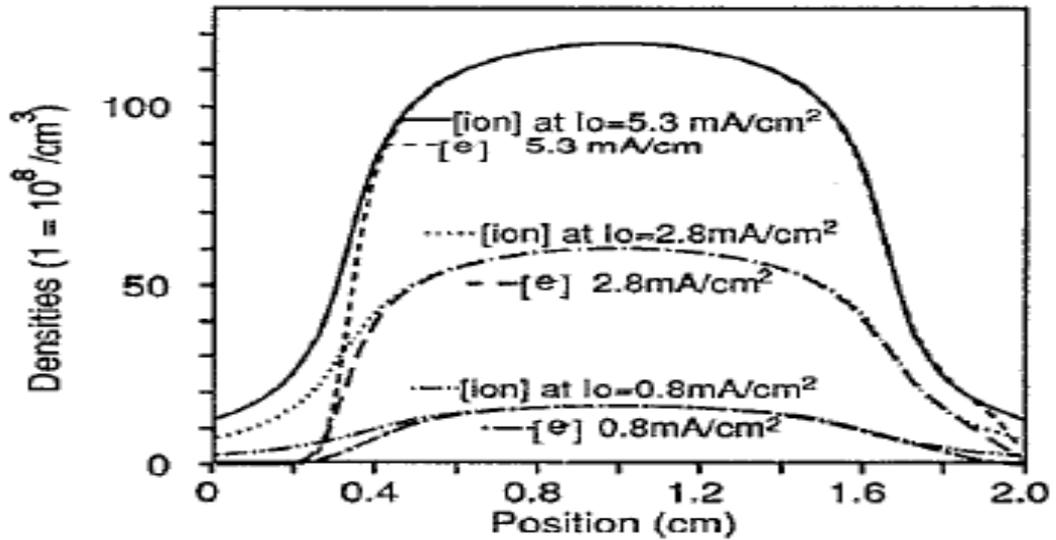


Figure II.2 : Densités électronique et ionique suivant E. Gogolides et H. Sawin [18].

❖ Pour le champ électrique, les valeurs initiales peuvent être prise comme suit :

$$E_{j+1} = \frac{2dh e}{\epsilon_0} (n_{O_{2j}^+} + n_{Ar_j^+} + n_{O_j^+} - n_{O_j^-} - n_{e_j}) + E_{j-1} \quad (II.19)$$

2. Les conditions aux limites au niveau des deux électrodes

Les conditions aux limites au niveau des deux électrodes sont présentées par le tableau II.4.

Table II.4 : Conditions aux limites au niveau des électrodes

	Pour l'anode	Pour la cathode
La densité électronique	$n_e _{z=0} = 0$	$n_e _{z=h} = 0$
La densité ionique	$\frac{\partial n_i}{\partial z} _{z=0} = 0$	$\frac{\partial n_i}{\partial z} _{z=h} = 0$
Le champ électrique	$\frac{\partial E}{\partial z} _{z=0} = 0$	$\frac{\partial E}{\partial z} _{z=h} = 0$

II.3.4. Calcul des propriétés électriques

En appliquant les expressions des dérivées partielles du schéma de la Méthode des Différences Finies (MDF), nous obtenons pour les densités des particules des équations de la forme :

$$A_{j-1}n_{j-1} + A_j n_j + A_{j+1} n_{j+1} = B_j \quad j=2, j_{\max}-1 \quad (\text{II.17})$$

Des équations similaires peuvent être obtenues pour le champ électrique.

On est amené à la résolution du système d'équations matricielles ($A.X=B$). Pour la résolution numérique des densités; nous appliquons la méthode itérative de Gauss-Seidel.

Pour le calcul du champ électrique, nous utilisons la première équation de Maxwell relative aux densités de charges électrique :

$$E_{j+1} = \frac{2dh}{\epsilon_0} \left(n_{O_{2j}^+} + n_{A_{rj}^+} + n_{O_j^+} - n_{O_j^-} - n_{e_j} \right) + E_{j-1} \quad (\text{II.18})$$

Pour le calcul du potentiel électrique, nous utilisons l'équation suivante :

$$E = -\text{grad } V$$

II.3.5 Organigramme pour le calcul numérique

La figure II.3 présente l'organigramme pour le calcul des densités des particules et le champ électrique en fonction de z .

La figure II.4 présente l'organigramme pour le calcul des coefficients de transport en fonction de z .

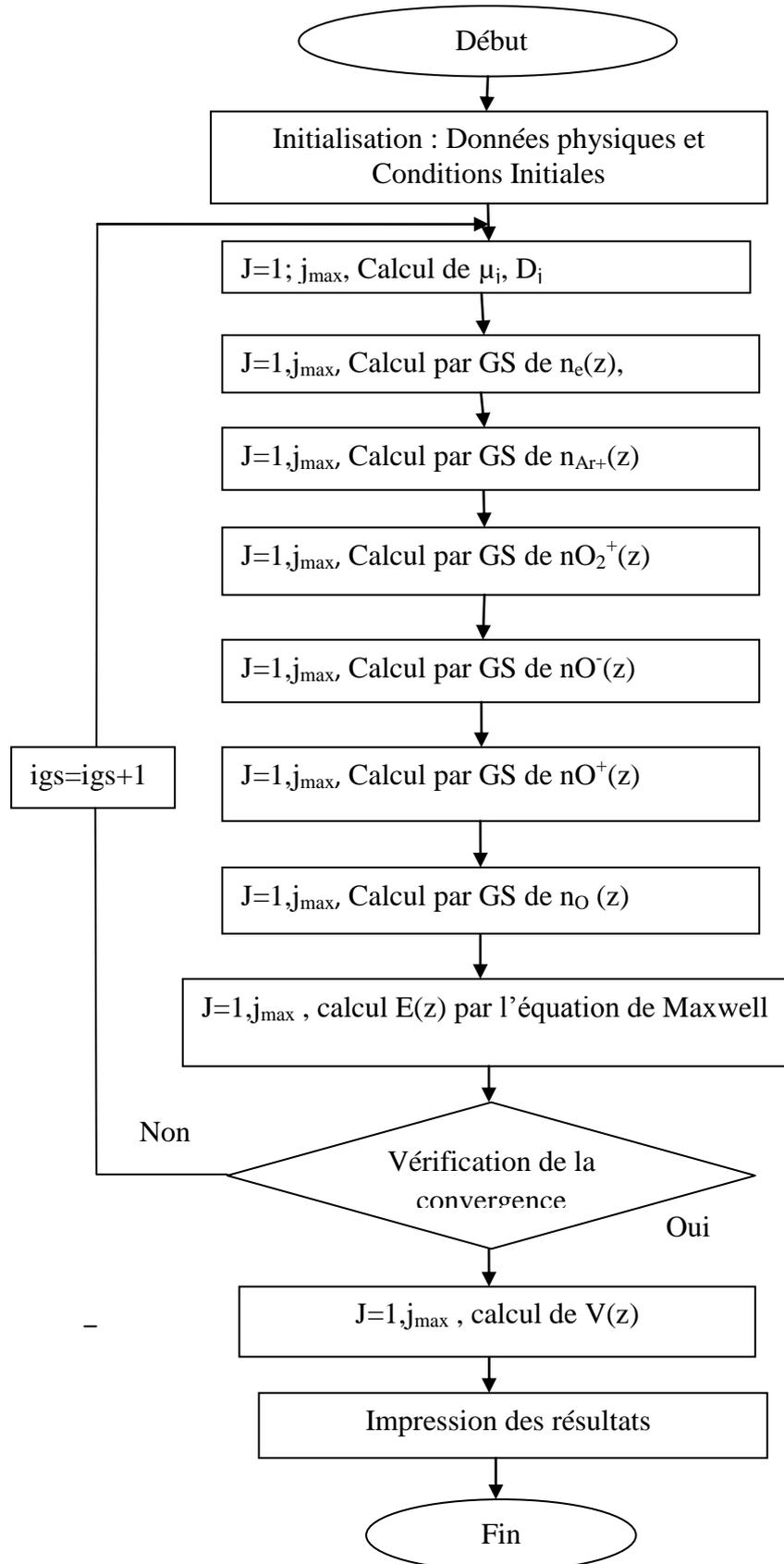


Figure II.4 : Organigramme pour le calcul des densités de particule et du champ électrique.

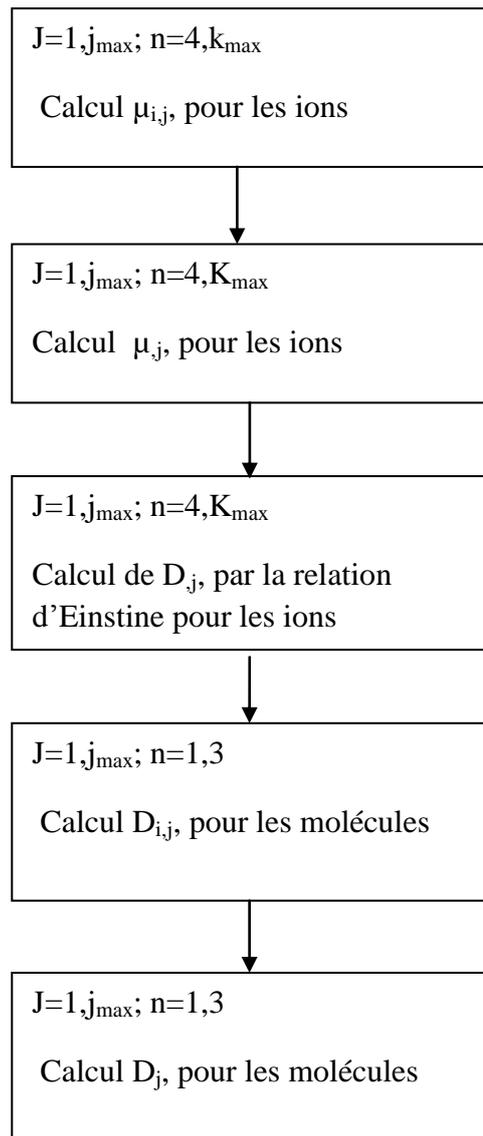
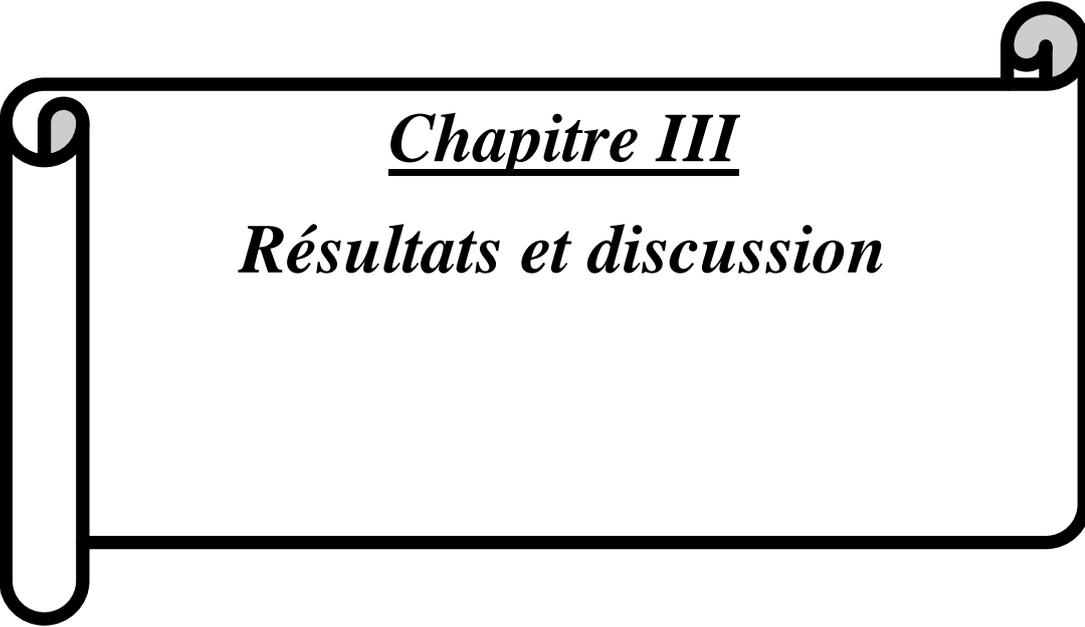


Figure II.5 : Organigramme pour le calcul des coefficients de transport



Chapitre III

Résultats et discussion

Chapitre III: Résultats et Discussion

Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les principaux résultats du modèle numérique développé pour le calcul des propriétés électriques.

Les données utilisées sont celles de D. Benyoucef [4]. D. Benyoucef a calculé les densités et le champ électrique dans un plasma de décharges RF 13,56MHz de type magnétron d'un mélange gazeux Ar/O₂. Il a considéré trois ions (Ar⁺, O⁺, O₂⁺).

Pour notre calcul, nous avons considéré un mélange gazeux Ar/O₂ dans un pulvérisateur cathodique RF 13,56 MHz. Nous avons considéré les espèces suivantes: e, Ar, O₂, Ar⁺, O₂⁺, O⁻, O⁺ et O.

III.1 Les données de base

Les données nécessaires pour l'exécution de la simulation sont regroupées dans le tableau III-1.

Tableau III.1: Les données de simulation

	La valeur
Le coefficient de mobilité électronique (μ_e)	3999.6/P _g [m ² Pa/S]
Le coefficient de diffusion électronique (D _e)	15998.4/P _g [m ² Pa/SV]
La température électronique(T _e)	4[eV]
La température de gaz (T _{gas})	300[k]
La température des ions(T _{ion})	300[k]
La pression de gaz (p _{gaz})	50[mTorr]
La distance entre les deux électrode (H)	2.5[cm]
le potentiel entre les deux électrodes (Va)	200[V]

III.2. Détermination des valeurs initiales des densités

Pour la détermination des valeurs initiales des fonctions des densités, nous avons utilisé la relation suivante [33] :

$$n_j = AN1_j + AN2_j \times \left(1 - \frac{(j-1)}{j_{\max} - 1}\right)^2 \times \left(\frac{(j-1)}{j_{\max} - 1}\right)^2 \quad (\text{en cm}^{-3})$$

Pour la détermination des constantes AN2e (le pic de la densité électronique), nous avons utilisé les valeurs de l'article D Benyoucef [4]. Pour les autres particules, nous considérons que la densité de charge négative égale à la densité de la charge positive dans le plasma (milieu globalement neutre) et nous avons utilisé les rapports entre les constantes des réactions chimiques. Selon les rapports suivants :

$$AN2_{Ar^+} = 89 \%$$

$$AN2_{O^-} = 1\%$$

$$AN2_{O^+} = 1\%$$

$$AN2_{O_2^+} = 10\%$$

$$AN2_O = 1\%$$

Pour ces données, nous avons obtenu les valeurs initiales (initialisation) pour les fonctions de densité suivant les figures III.1 et III.2. La figure III.1 présente les valeurs initiales des densités des différentes espèces, entre autres les espèces chargées majoritaires. La figure III.2 présente les densités initiales des espèces minoritaires : les trois particules O, O⁺ et O⁻. A noter que nous avons considéré que les densités de Ar et O₂ invariable du fait du faible taux de consommation de ces éléments très majoritaires (plus que 10⁵ que celle des électrons).

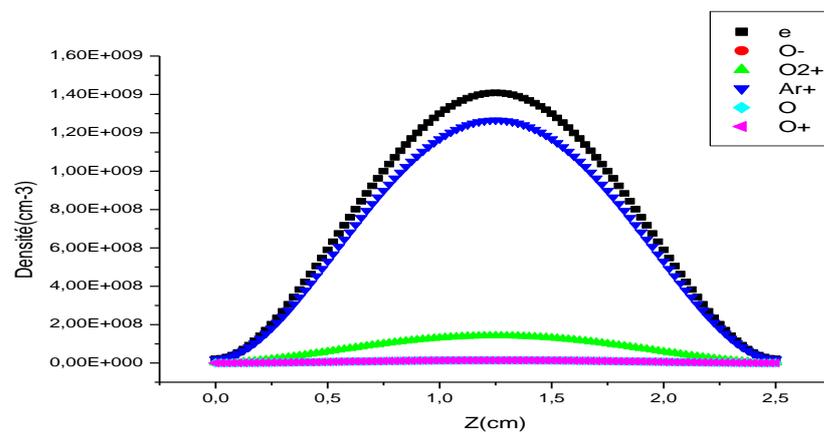


Figure III.1 : Profil des valeurs initiales des densités en fonction de Z.

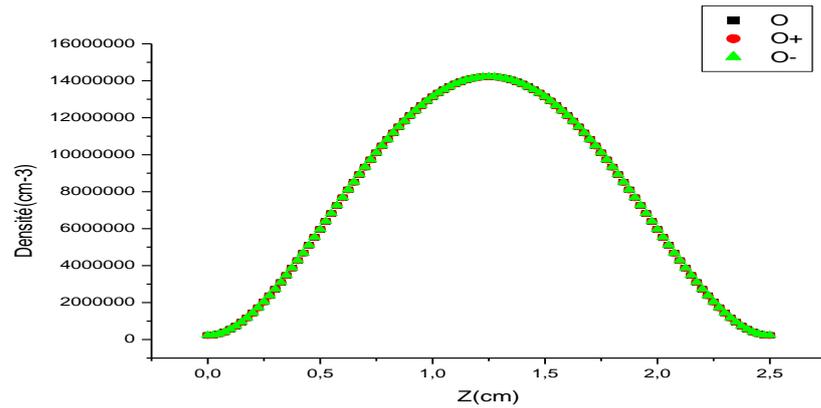


Figure III.2: Profil des valeurs initiales des particules O, O⁺, O⁻ en fonction de Z.

III.3. Les profils des propriétés électriques

La figure III.3 présente la variation des densités entre les deux électrodes en fonction de la position Z pour le nombre des itérations de Gauss-Seidel GS=6.

La figure III.4 présente profil du champ électrique en fonction de la position pour le même nombre d'itération GS=6.

La figure III.5 présente profil du potentiel électrique en fonction de la position pour le même nombre d'itération GS=6.

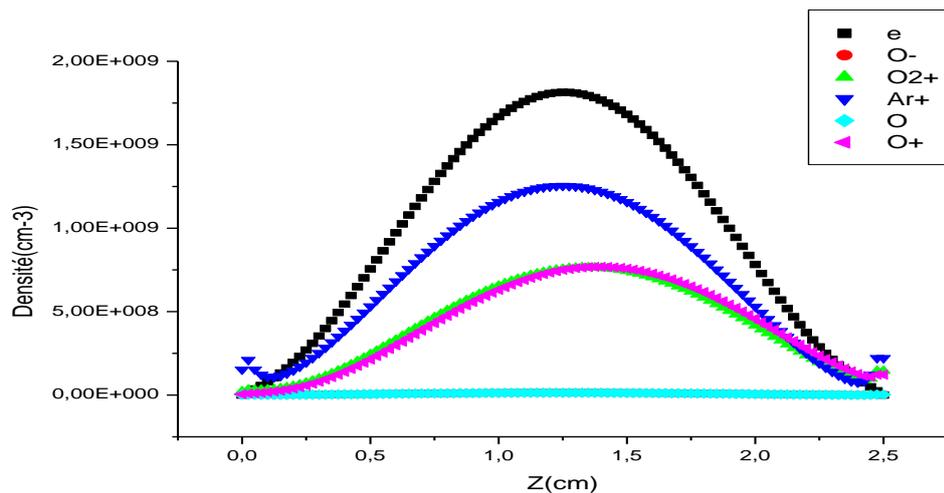


Figure III.3 : Profil des densités en fonction de Z.

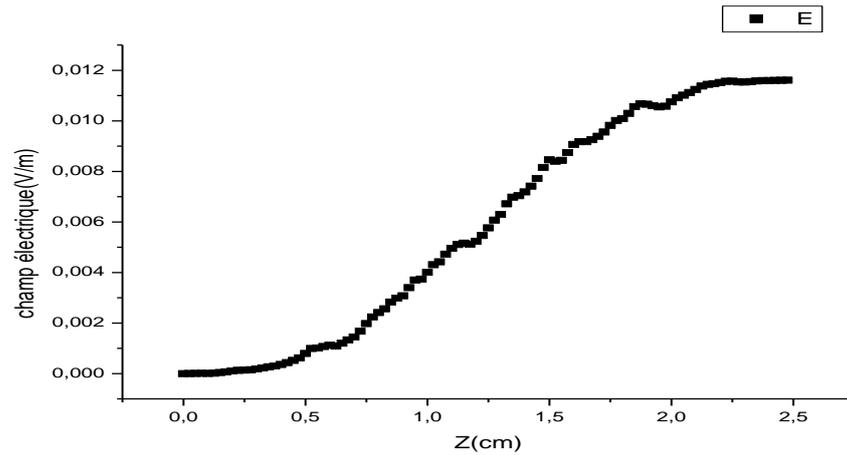


Figure III.4 : Profil du champ électrique en fonction de la position.

III.4. Comparaison des résultats

La figure suivante présente les résultats des travaux de D. Benyoucef.

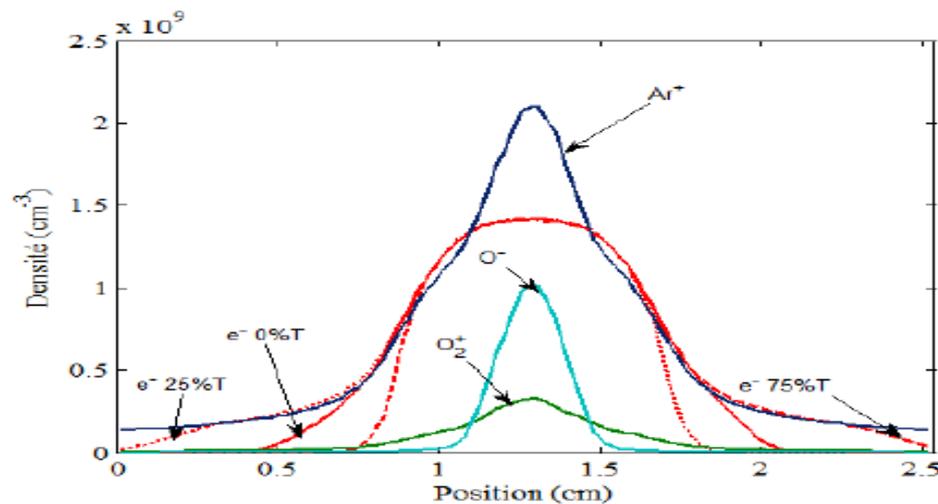


Figure III.5 : Les densités des particules suivant D. Benyoucef [4] (10% O₂, 90% Ar).

Nous observons qu'il y a des petites différences dans les résultats. La forme générale des courbes concorde. Les différences peuvent être attribuées aux modèles utilisés :

- Dans les travaux de D. Benyoucef, il y a un effet du champ magnétique et l'étude est faite en fonction du temps (période du régime RF).
- Dans nos calculs nous avons plus d'espèces dans le volume (O et O⁺).
- La convergence de nos calculs itératifs de Gauss-Seidel n'est pas encore atteinte.

III.5. Les coefficients de mobilité et de diffusion pour les ions

La figure III.6 présente le profil des coefficients de mobilité des ions en fonction de Z. Pour les données utilisées, ces coefficients de mobilité sont quasiment constants.

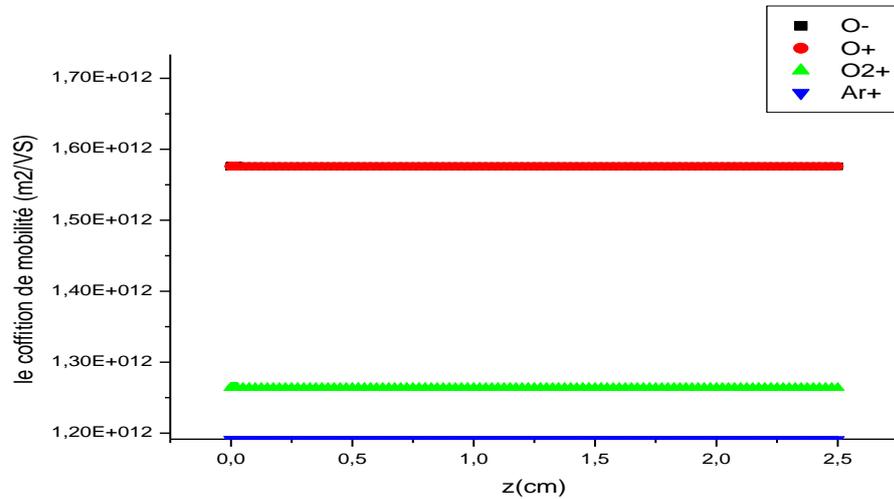


Figure III.6: Profil du coefficient de mobilité des ions en fonction de Z.

La figure III.7 présente le profil des coefficients de diffusion des ions en fonction de Z. Pour les données utilisées, ces coefficients de mobilité sont quasiment constants.

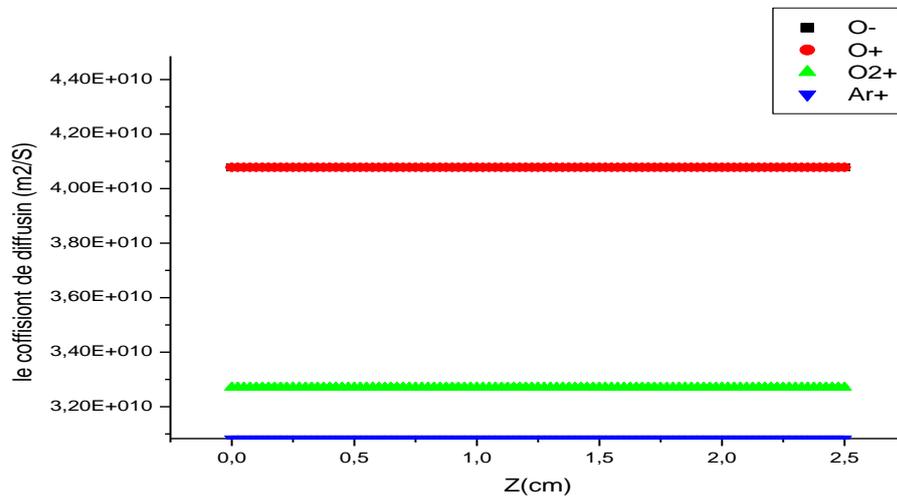


Figure III.7 : Profil du coefficient de diffusion des ions en fonction de Z.

III.6. Etude paramétrique

III.6.1 Effet des proportions de gaz

Lorsque nous changeons les proportions de gaz à O₂ 50% et Ar 50%, nous optons pour les rapports d'initialisation suivants :

$$AN_{2_{Ar^+}} = 40 \%$$

$$AN_{2_{O^-}} = 10\%$$

$$AN_{2_{O^+}} = 10\%$$

$$AN_{2_{O_2^+}} = 40\%$$

$$AN_{2_o} = 10\%$$

Pour ces proportions, à 50%, nous avons obtenu les profils des figures III.8 et III.9. La figure III.8 est celle des initialisations des densités des particules. La figure III.9 présente les densités des particules pour un nombre très réduit d'itération de Gauss-Seidel. La convergence n'est pas atteinte et les conservations des charges ou de masses ne sont pas vérifiées.

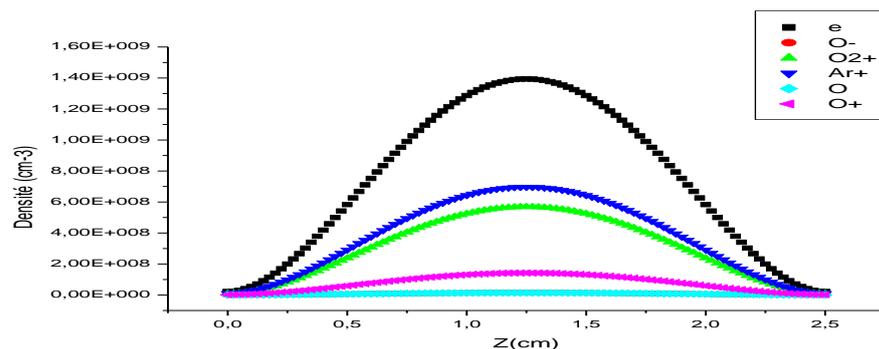


Figure III.8 : Profil des valeurs initiales des densités pour (50% O₂, 50% Ar) en fonction Z.

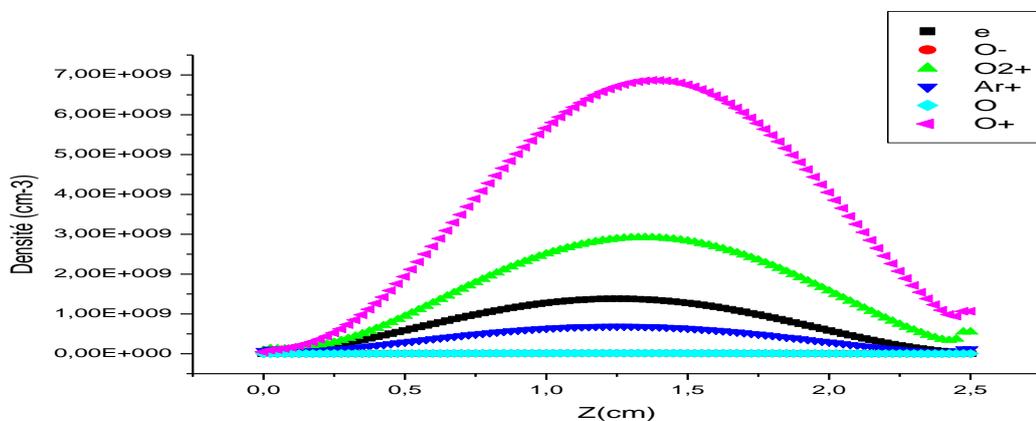


Figure III.9 : Profils des densités pour (50% O₂, 50% Ar) en fonction de Z.

III.6.2 Effet de la tension électrique

Les proportions initiales du gaz sont 90% Ar et 10% O₂. La figure III.10 montre l'effet du changement de la tension électrique sur les densités des particules en fonction de position. Bien que le nombre d'itérations de Gauss-Seidel est très réduit, les densités pour les deux valeurs de la tension électriques $V=100V$ et $V=200V$ sont superposables.

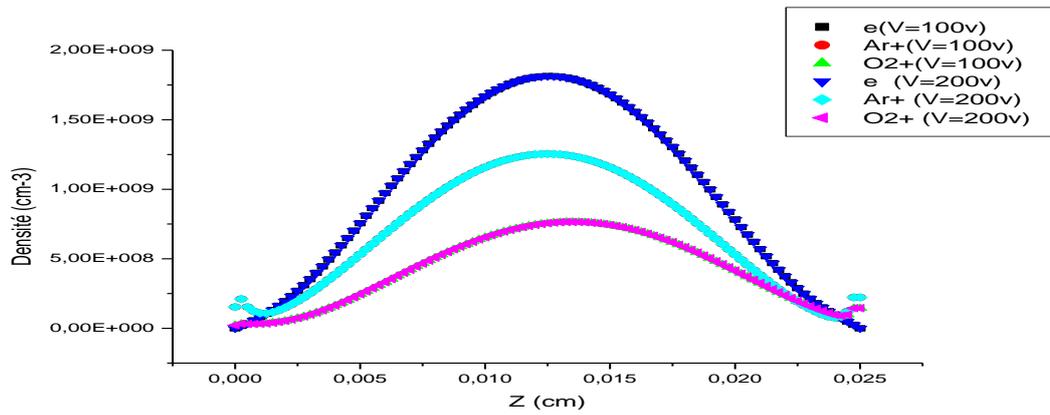
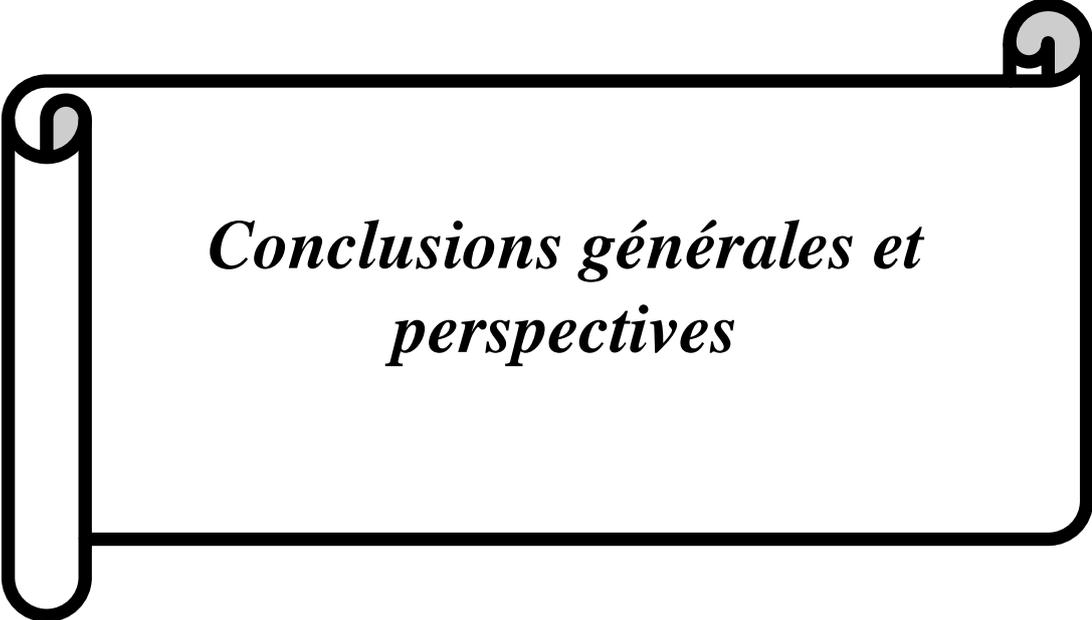


Figure III.10: Profils des densités en fonction de Z pour deux valeurs de la tension électrique (100V et 200 V).



*Conclusions générales et
perspectives*

Conclusion générale et perspectives

Les couches minces sont utilisées dans divers domaines industriels comme dans la fabrication des cellules solaires et des écrans plats. Les techniques d'élaboration des couches minces ont connu lors de ces dernières décennies un développement considérable. Le silicium est un matériau qui a eu un immense succès pour la réalisation des couches minces. Il possède des propriétés électriques et des structures mécaniques très convenables. Les couches minces peuvent être élaborées en général soit par procédés physiques en phase vapeur (PVD), soit par procédés chimiques en phase vapeur (CVD).

Dans ce mémoire nous nous sommes intéressés à l'étude d'un mélange gazeux Ar/O₂ dans un pulvérisateur cathodique est alimenté par une source de tension radiofréquence RF.

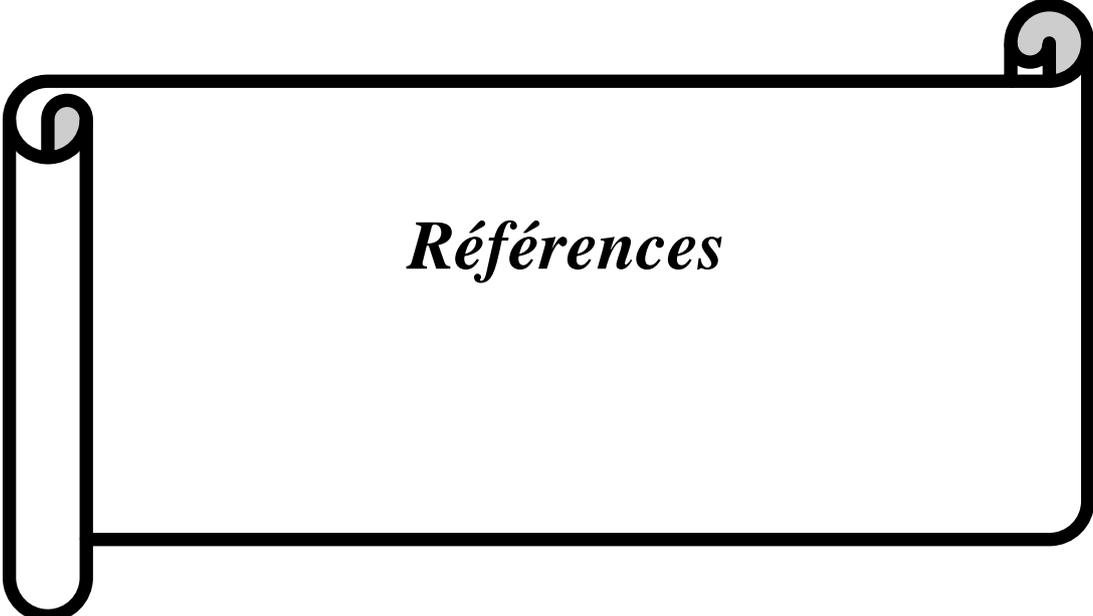
Pour l'étude, nous avons considéré huit particules dans le volume du réacteur. Ces particules sont : les électrons, Ar, O₂, Ar⁺, O₂⁺, O⁻, O⁺ et O. Nous avons considérés dix réactions chimiques les plus dominantes dans le volume. Les proportions initiales du mélange sont 10% O₂ et 90%Ar.

Pour le calcul des densités des particules et le champ électrique dans le plasma, nous avons proposé la résolution l'équation de continuité et l'équation de Maxwell. Nous avons considéré le problème à une dimension en régime stationnaire, les coefficients de transport sont considérés variables dans le mélange gazeux suivant les positions Z dans le réacteur. Pour la modélisation numérique nous avons opté pour la Méthode des Différences Finies (MDF) et l'algorithme itératif de Gauss-Seidel.

Les principaux résultats du modèle numérique sont suivant les données des travaux de D. Benyoucef [4]. Les proportions initiales du mélange sont 10% O₂ et 90%Ar. Pour une température électronique de 4eV et des températures des neutres et des ions de 300K, la densité des électrons est de l'ordre de $1.4 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ au centre du réacteur.

Comme perspectives nous proposons :

- L'étude d'autres mélanges gazeux.
- L'étude temporelle et à trois dimensions des densités dans un mélange gazeux.
- L'étude des mélanges gazeux (Ar/O₂) pour des températures variables.
- L'étude de l'effet du champ magnétique.



Références

Références

- [1] O. Babahani; "Simulation numérique par la méthode de Monte Carlo de la déposition de couche mince par procédé CVD"; Thèse de Doctorat; Université de Ouargla (2013).
- [2] Z. Ballah, F. Khelfaoui et M. T. Meftah; "Modélisation numérique des propriétés électriques dans un pulvérisateur cathodique magnétron" ; Annales de la Faculté des Sciences et Sciences de l'Ingénieur, Vol. 1 n 3 ; pp 24-31 (2009).
- [3] P. Scheubert; "Modeling and Diagnostics of Low Pressure Plasma Discharges"; Thèse de doctorat, Université de Munchen (2002).
- [4] D. Benyoucef ; "Self-consistent particle modeling of radio frequency discharge in Ar/O₂ mixtures : Effects of crossed electric and magnetic" ; Journal of Applied Physics, Vol 109 ; pp1-9 (2011)
- [5] D. Benyoucef; "Modélisation particulaire et multidimensionnelle des décharges hors équilibre à basse pression excitées par champs électromagnétiques" ; Thèse de Doctorat, Université de Toulouse Paul Sabatier (2011).
- [6] L. Delcroix; Physique des plasmas; Paris, Inter Édition (1994).
- [7] D. R. Nicholso ; "Introduction to plasma theory"; University of Iowa ; John-Wiley & Sons (1983).
- [8] H. Hidalgo; "Dépôt chimique en phase vapeur de couches minces d'alumine dans une post-décharge micro-onde"; Thèse de Doctorat, Université de Limoges (2003).
- [9] Francis F. Chen, Jane P. Chang; "Principles of Plasma Processing"; University of California, Los Angeles, pp 16-18, 2002.
- [10] O. Daranféd; "Elaboration et caractérisation de couches absorbantes des cellules solaires en couches minces à base de Cu₂ZnSnS₄"; Thèse de doctorat, Université de Constantine (2013).
- [11] H. Frédéric; "Caractérisation de décharges magnétron Ar/NH₃ et Ar/H₂/N₂ pour la synthèse de films minces de nitrure de silicium"; Thèse de Doctorat, Université Libre de Bruxelles (2011).
- [12] Yan- Mei Jiang; "Pulvérisation cathodique assistée par ordinateur"; Thèse de Doctorat, Université de Paris (1992)
- [13] M. Khachba; " Caractérisation de la réaction interfaciale entre une couche mince de tungstène et un substrat d'acier"; Mémoire de magister, Université de Constantine (2008).
- [14] س. عبيد ; "دراسة في ثلاث أبعاد للمقادير الكهربائية في الجهاز الرش المهبطي المغنطروني باستعمال طريقة الحجم المنتهية" ;مذكرة ماجستير ,جامعة قاصدي مرباح ورقلة (2010).

- [15] Annemie Bogaerts, Renaat Gijbels; "Numerical modelling of gas discharge plasmas for various applications"; Vol. **69**, pp 37–52, (2003).
- [16] A. V. Phelps; "The diffusion of charged particles in collisional plasmas : Free and ambipolar diffusion at low and moderate pressures "; Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology Vol. **95** pp 407-428 (1990).
- [17] G. J. Nienhuis and W. J. Goedheer; "A self-consistent fluid model for radio-f requency discharges in SiH₄-H₂ compared to experiments"; Vol. **82** pp 2060-2071(1997).
- [18] E. Gogolides et E.H. Sawin; "Continium modeling of radiofrequency glow discharges, I. Theory and results for electropositive and éélectronegative gases"; J. Appl. Phys, Vol. **72**, pp 3971-3987 (1992).
- [19] ز. قويدري, "مفعول درجة الحرارة الالكترونية على الخصائص الكهربائية في بلازما التفريغ الكهربائي" ; مذكرة
ماجستير, جامعة قاصدي مرباح ورقلة (2015)
- [20] خ. بن واعر ; " الخصائص الكهربائية البلازما متعددة المركبات الأيونية بطريقة الرش المهبطي بمصدر
RF ; مذكرة ماجستير, جامعة قاصدي مرباح ورقلة (2014).
- [21] J. T. Gudmundsson et E. G. Thorsteinsson; "IOP PUBLISHING"; Iceland (2007).
- [22] D. Herrebout, A. Bogaerts, M. Yan and R. Gijbels; "Journal of applied Physics"; Vol. **90**,
pp 570-578 (2001).
- [23] J. Lieto; Le génie chimique à l'usage des chimistes; Paris 1998.
- [24] F. Cuadros, et I. Cachadina; "Determination of Lennard-Jones interaction parameters
using a new procedure. Molecular Engineering"; Vol. **6**, pp 319-325 (1996).
- [25] D. Atkins et J. Paula ; "Chimie Physique" ; De Boek ; Paris (2008).
- [26] P. André, J. Aubreton, S. Clain, M. Dudeck, E. Duffour, M. Elchinger, B. Izrar,
D. Rochette, R. Touzani, et D. Vacher; "Transport coefficients in thermal plasma:
applications to mars and titan atmospheres"; The European Physical Journal,
Vol. **57**(2), pp 227-234 (2010)
- [27] Ph. Chen; "Thermodynamique et gaz"; 35 exercices corrigés, (1993)
- [28] A. Rehman, H. C. Kwon, W. T. Park, et. J. K. Lee; "Phys. Plasmas"; Vol. **90**, pp 1-9
(2011).
- [29] Hagelaar, G. J. M. (2000); Modeling of microdischarges for display technology
Eindhoven ; Technische Universiteit Eindhoven, DOI: 10.6100/IR538700.
- [30] Edward A. Mason, Earl W. Mc Daniel; "Transport properties of ion gazes"; Ed. John
Wiley and Sons (1988).

- [31] ز. بلة; "الدراسة التشخيصية بالمحاكات العددية لمسبار كهربائي ساكن في رش المهبطي"; مذكرة ماجستير جامعة قاصدي مرباح ورقلة (2007)
- [32] M. Sibonyet et J. Claude Mardon; "Approximations et équations différentielles"; Hermann (1982).
- [33] M. Belhacini, Y. Benhadda et A. Hamid;; "the Etude paramétrique d'un décharge radio fréquence à basse pression"; Proceeding of 2^{ème} Séminaire International sur la physique des plasmas 2nd International seminar on plasma physics pp136-139 (2013).

ملخص

يهدف عملنا هذا بتحديد الخصائص الكهربائية لبلازما متعددة المركبات الأيونية لمزيج غازي Ar/O_2 المستعمل لتوضيح طبقات السليسيوم بالإعتماد على طريقة الرش المهبطي المغذي بمصدر جهد متناوب لتردد مذياعي RF. استعملنا نموذج الموائع لنضام مستقر ولبعد واحد، فبالنسبة لحساب الكثافات اقترحنا معادلة الاستمرارية بدلالة معاملات الانتقال متغيرين في المزيج الغازي ومن أجل حساب الحقل الكهربائي استعملنا معادلة ماكسويل أما من أجل الحل العددي للمسألة اقترحنا برنامج بلغة الفور ترون واستعملنا طريقة الفروق المنتهية وخوارزمية غوص صيدل.

الكلمات المفتاحية: تشخيص البلازما، الرش المهبطي، مزيج غازي، المركبات الأيونية، الخصائص الكهربائية.

Résumé

Notre travail s'intéresse à la détermination des propriétés électriques d'un plasma à plusieurs composantes ioniques d'un mélange gazeux Ar/O_2 utilisé pour la déposition des couches minces de silicium dans un pulvérisateur cathodique. Le pulvérisateur est alimenté par une source de tension radiofréquence $RF=13,56MHz$. Nous appliquons le modèle fluide à une dimension en régime stationnaire pour le calcul des densités nous avons proposé la résolution l'équation de continuité en fonction des coefficients de transport variables dans le mélange et la résolution l'équation de Maxwell pour le calcul de champ électrique. Pour la résolution numérique des équations différentielles, nous avons proposé un programme de calcul numérique en langage fortran. Il utilise la Méthode des Différences Finies et l'algorithme itératif de Gauss-Seidel.

Mots clés: diagnostic de plasmas, pulvérisateur cathodique, mélanges gazeux, composantes ioniques, propriétés électriques.

Abstract:

In this work, we are interested on electrical properties of plasma of several ionic components of a gas mixture Ar/O_2 used in deposition of thin silicon films. The deposition will be on a sputtering process with a radiofrequency source $RF = 13.56MHz$. We use a model fluid for a stationary system in one dimension. To calculate densities, we proposed the resolution of the equation of continuity and the resolution Maxwell's equation for the calculation of electric field. The transport coefficients are taken variable in the mixture. For numerical resolution of differential equations, we proposed numerical calculation program in fortran language. It uses the finite difference method and the Gauss-Seidel algorithm.

Keyword: Diagnosis of plasmas, sputtering process, Gas mixtures, Ionic components, electrical properties.