



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DE BOUIRA



FACULTE DES SCIENCES ET SCIENCES APPLIQUEES
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

MEMOIRE PRESENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLOME
DE MASTER Deux EN PHYSIQUE
OPTION

Physique des matériaux.

**Etude théorique de l'effet de la force de résistance ionique sur la formation
des gaines électrostatiques d'un plasma d'Argon**

Présenté par : Mebarki Ismahane

La soutenance aura lieu le 19/06/2023 à 10h

Devant le jury :

Président : Mr : Zamoum Redouane M.C.A. Univ. Bouira

Rapporteur : Mr : Zaham Bouzid M.C.B. Univ. Bouira

Co-encadreur: Mr : Chibani Moussa M.A.A. Univ. Bouira

Examineurs : Mr : Merich Abderrzak M.C.A. Univ. Bouira

Mr : Belghit Slimen M.C.B. Univ. Bouira

Dédicace

Avec l'expression de ma reconnaissance, Je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère :

Mon cher père

Je n'oublierai sa gentillesse, ses sacrifices et ces encouragements, il était toujours un guide dans toutes mes actions et un refuge. Qu'il trouve dans ce travail l'expression de mon grand amour envers lui et de ma grande reconnaissance !

À la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse, Ma lumière du jour et l'étoile de mes nuits, mon symbole de patience,

d'amour et de tendresse, Mon adorable mère

Je fais également un clin d'œil aux autres personnes de ma vie : mes frères, Islem et Mostapha Et ma sœur Chahrazed

Je n'oublie pas de penser à mes fidèles amis que je considère comme mes sœurs, avec lesquelles j'ai partagée beaucoup de moments de plaisir

À celui qui m'a soutenu tout au long de mon parcours académique et a été la meilleure aide pour moi B.b

Que dieu les garde tous

Mebarki Ismahane

Remerciements

Avant tout, nous remercions Allah le tout puissant de nous avoir donnée le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'études et que grâce à lui ce travail a été réalisé.

En effet, le présent mémoire de Master n'aurait pu avoir le jour sans la contribution de nombreuses personnes, dont je me fais aujourd'hui un plaisir et un devoir de les remercier.

Je suis reconnaissant à mon encadreur D. B Zaham qui m'a aidée à progresser dans ce travail grâce à ses conseils, directifs, son esprit critique et son soutien tout long de la réflexion de cette recherche. Et qui a bien voulu assurer le suivi de mon étude à travers son encouragement et ses précieux conseils qui m'ont été très utiles dans l'élaboration de cette recherche.

Je exprime toute mon reconnaissance à Mr. Merriche Abderrzak de bien vouloir nous fait

l'honneur de présider le jury de ce mémoire.

J'adresse mes sincères remerciements aux Mr. zamoum et Mr. belghit membres de jury, pour avoir accepté de juger ce travail.

Je tiens à remercier vivement tous mes enseignants qui nous ont aidés à l'accumulation des connaissances nécessaires durant le cursus universitaire.

Mes vifs remerciements s'adressent à toute ma famille.

Tous ceux qui ont participé de près ou de loin dans la réalisation de ce travail

Je trouve ici l'expression de ma profonde gratitude et remerciements.

MERRI

Ismaïane

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
I.CHAPITRE I: Généralités sur le plasma et l'interaction avec la surface solide	5
I.1.Introduction.....	6
I.2.Paramètres Et grandeurs caractéristique du plasma.....	6
I.2.1. La densité.....	6
I.2.2. La température.....	7
I.2.3. Degré d'ionisations	7
I.2.4. La longueur de Debye.....	8
I.3.Décharge électrique dans un gaz.....	8
I.4.Interaction d'un plasma avec la surface solide	9
I.4.1.Introduction.....	9
I.4.2.Les gaines électrostatiques.....	11
I.4.3.Types des gaines électrostatiques.....	12
I.4.3.1.Gaine électroniques.....	12
I.4.3.2.Gaine ionique.....	14
I.4.4.Critère et vitesse de Böhm.....	16
I.5. Définition du plasma poussiéreux	17
I.5.1. Description de la formation des grains de poussières dans les plasmas.....	17
I.5.2. Formation des grains de poussière à partir d'un gaz réactif.....	18
I.5.3. Formation des grains de poussière par pulvérisation.....	19
• Formation des clusters primaires.....	19
• Croissance des clusters et nucléation.....	19
• Coagulation.....	19
• Croissance.....	19
I.5.4. Processus de charge des grains de poussière.....	20
I.6.Conclusion.....	21
II.CHAPITRE II : Effet de la force de résistance ionique sur la formation des gaines électrostatiques dans un plasma d'Argon.....	22
II.1.Introduction.....	23
II.2. FORCES AGISSANT SUR UN GRAIN DE POUSSIÈRE.....	23
II.2.1.Force de la gravité.....	24
II.2.2. Force électrique.....	24

II.2.3. Force de résistance ionique.....	25
II.2.4. Force de résistances des neutres.....	27
II.2.5. Force thermo phorétique.....	27
II.3. Paramètres et ordre de grandeurs des différentes forces.....	28
II.4. EQUATIONS UTILISES DANS LE MODELE.....	29
II.4.1. Equations fluides.....	29
II.4.1.1. Equation de continuité.....	29
II.4.1.2. Equation du mouvement.....	29
II.4.2. Equation de la charge d'une graine de poussière.....	29
II.5. APPROXIMATIONS DANS LE MODEL.....	31
II.5.1. Approximation de Boltzmann.....	31
II.5.2. Approximations stationnaire.....	31
II.5.3. Approximation unidimensionnelle.....	32
II.5.4. Approximation de la gaine collisionnelle.....	32
II.6. MODELE THEORIQUE.....	33
II.6.1. Equations de mouvement des électrons et des ions Les électrons.....	34
II.6.2. Les ions.....	34
II.7. Dynamique des graines de poussière.....	35
II.7.1. Charge des graines de poussières.....	35
II.7.2. Potentiel électrostatique.....	35
II.8. Equations du modèle.....	36
II.9. RESULTATS ET INTERPRETATIONS.....	37
II.10. Conclusion.....	43
CONCLUSION GENERALE.....	44

INTRODUCTION GENERALE

Le plasma est un milieu matériel et découvrant à travers des nombreux travaux expérimentales, Il se compose d'un grand nombre d'espèces chimiques. C'est un milieu très réactif. Est d'après la révolution des réactions chimique le plasma est définie comme le quatrième état de la matière dans l'ordre croissant des températures après les états solide, liquide et gazeux ,cette quatrième état a été étudié pour la première fois par les physiciens Langmuir et Tonks [1]. Pour expliquer le comportement d'un gaz ionisé à partir d'arc électrique dans un tube à décharge. Il permet l'obtention de produit totalement ionisé et sable à haut température supérieure à 3000°C à la pression atmosphérique.

Le plasma présenté plus 99.99 % de la matière découvrant dans l'univers.

Le plasma est un milieu très compliquée, pratiquement appel à tous les phénomènes physique engendrés à près de l'interaction entre les différentes particules contenues dans ce milieu, pour éviter la complexité de comprendre de ces phénomènes dans ce milieu. Le plasma est classé en deux classes [2].

Plasma chaud :Le milieu du plasma chaud complètement ionisés à des températures de particules chargées électrons et ions supérieure ou égale à 10^6 K°, les ions et les électrons même énergie ,dans ce cas le milieu se trouve à l'état d'équilibre thermodynamique. Le plasma chaud il existe dans la nature (inter des étoiles, vent solaire) et artificiel d'après les études dans laboratoire comme : (fusion nucléaire, projet ITER)

Plasma froid : le milieu du plasma froid caractériser par une température des particules et différents de l'ordre 10^4 k pour les électrons et de l'ordre 10^3 k° pour les particules lourd comme les ions et les neutres, dont le degré d'ionisation proportion d'atomes et des molécules ionisées est inférieure de 10^{-4} .(Plasma hors équilibre).

Cette deuxième classe de plasma (plasmas froids) est d'une importance considérable artificiellement ou dans le domaine d'industriel, comme la métallurgie, le découpage, le soudage, est dans le domaine de l'électronique, comme la technologie de semi-conducteurs, la fabrication des écrans plasma, gravure, les dépôts des couches minces.

Le plasma étudié dans ce mémoire caractérisé comme la dissociation des molécules dans le milieu haute fréquence d'un gaz réactif utilisé dans les dépôts des couches minces[3].

Pour comprendre la correspondance entre les paramètres contrôlés le plasma avec la structure des surfaces solides déposées, il faut que l'on étudie l'induction des paramètres, tel que le mode d'excitation électronique, la tension d'auto polarisation, et la nature du gaz sur la composition ionique et neutre du plasma et en particulier l'effet des impuretés ou grains de poussières sur la qualité des dépôts des couches minces [4].

En général les impuretés ou les grains de poussières pose même problème ou des obstacles dans les plasmas chauds, comme l'utilisation dans les Tokamaks pour réaliser les réactions de fusion contrôlée. En effet les ions et les électrons interagissent sur les parois des Tokamaks très énergétiques et les poussières de carbone constituent un frein à la réaction de fusion dans les Tokamaks[5].

Dans ce mémoire de master, nous nous intéressons à l'étude de la dynamique des grains de poussières ou les impuretés dans les gaines électrostatiques d'un plasma de décharge électrique. Il contient deux chapitres.

Le premier chapitre on donne des définitions sur les paramètres et les longueurs caractéristiques du milieu plasma, et nous discutons sur l'interaction d'un plasma avec la surface solide. La décharge électrique, et la réaction des particules chargées constituent le milieu plasma avec la surface solide. Et en particulier les phénomènes physiques liés par la formation des différents types de gaines électrostatiques formées, selon le potentiel de la surface solide par rapport au potentiel plasma a été aussi discutée. Et on termine ce chapitre par le modèle de la formation des grains de poussières [6].

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des forces agissant sur le grain de poussière. On étudie en particulier l'effet de la force de résistance ionique sur la formation de gaine électrostatique ionique d'un plasma d'Argon. Un modèle théorique unidimensionnel et stationnaire et en l'absence d'un champ magnétique. On considère les électrons et on établit l'équilibre thermodynamique locale à la distribution de Boltzmann.

Les ions positifs et les grains de poussières et décrite par le modèle fluide. Les paramètres contrôlent la force ont été déterminés.

CHAPITRE I
GENERALITES SUR LE PLASMA ET
L'INTERACTION AVEC LA SURFACE SOLIDE.

I.1. INTRODUCTION

Plusieurs phénomènes engendrent d'après l'interaction d'un plasma produite artificiellement dans laboratoire (Tokamaks, réacteurs...) avec la surface solide, ces interactions très complexes, pour limiter est comprendre les phénomènes engendrés, on ne peut que mesurer sa densité et sa température. Au voisinage de l'interface plasma solide va apparaître une région non neutre qui tend à masquer le solide. Cette région appelée gaine électrostatique, dans cette région le plasma reste globalement neutre. Nombreux travaux théoriques et expérimentaux ont été consacrés en absence et en présence d'un champ magnétique [7] [8]. Il existe une zone de transition à l'interface plasma solide appelé pré-gaine [9], le rôle de cette zone est d'accélérer les ions vers le solide avec une vitesse même ordre que la vitesse acoustique appelé vitesse de Böhm [9].

Dans ce chapitre nous commencerons par les différents paramètres physiques (la température, la densité, degré d'ionisation) pour limiter les conditions de l'état plasma étudié, et les longueurs caractéristiques (le libre parcours moyen, la longueur de Debye). Et nous donnerons une description sur la décharge électrique, ensuite, nous présentons l'interaction d'un plasma avec la surface solide. Ensuite, la notion de la formation de la gaine électrostatique, en particulier les caractéristiques de l'interaction des espèces chimiques constituent le plasma, selon le potentiel du plasma par rapport à la surface solide. La formation des grains de poussières dans le plasma froid produit dans laboratoire. Nous terminons ce chapitre par une conclusion.

I.2. PARAMÈTRES ET GRANDEURS CARACTÉRISTIQUES DU PLASMA

I.2.1. La densité

La densité est représentée le nombre des espèces contenues dans un milieu par unité de volume à l'instant donné. La densité est souvent mesurée par cm^{-3} ou m^{-3} . Pour un plasma, la densité électronique, ionique et du gaz neutre respectivement n_e , n_i et n_n . Les électrons et les ions sont supposés en équilibre thermodynamique, sont données par la distribution de Boltzmann,

$$n_{e,i} = n_{e0,i0} \exp\left(-\frac{E_p}{K_B T_{e,i}}\right), \quad (1.1)$$

T_e, T_i Sont les températures des électrons et des ions exprimées en unité d'énergie (électron volt).

I.2.2. La température

La température du milieu plasma à l'équilibre thermodynamique et donnée par la moyenne des énergies de translation des espèces dans la décharge, dans ce cas les collisions sont suffisamment fréquentées, pour que la loi de la mécanique statistique soit applicable, pour calculer la moyenne de l'énergie en utilise la distribution de vitesse des espèces à une température donnée par la distribution Maxwellien.

Mais dans un plasma froid à la pression atmosphérique seront abordées, les espèces contenues dans ce dernier et de masses différentes, il existe des particules légères et des particules lourdes donc la population présente des systèmes différents chacun dans leur équilibre thermodynamique, lorsque on parle de plasma si il existe plusieurs températures (électronique, ionique et des neutre), $T_e \gg T_i \gg T_n$.

I.2.3. Degrés d'ionisation

La variation de paramètre d'ionisation α_i dans un milieu plasma et lié par à sa température T et sa densité n . Dans ce milieu les collisions ionisantes et de type : $e + A \rightarrow +A^+ + e$.

L'état d'équilibre d'un plasma globalement neutre, contient n_e électrons, n_i ions et n_0 des neutres par unité de volume : $n_e = n_i$. (1.2)

La production de tous les types du plasma, et caractérisées par son paramètre de degré d'ionisation. Donné par[10] :

$$\alpha_i = \frac{n_i}{n_n + n_i}. \quad (1.3)$$

- Lorsque $\alpha_i \leq 10^{-4}$ le plasma froid.

- Lorsque $\alpha_i = 1$ le plasma chaud.

I.2.4. La longueur de Debye

La longueur de Debye est une échelle spatiale qui caractérise l'hypothèse de quasi-neutralité et le phénomène d'écrantage des charges positives par des charges négatives. Dans un plasma, les électrons et les ions suivent des trajectoires aléatoires et se déplacent à grande vitesse. Lorsqu'une charge positive est présente, elle attire les électrons et repousse les ions, ce qui crée un nuage électronique autour de la charge. C'est ce qu'on appelle l'écrantage de Debye est la longueur de Debye ionique respectivement données par les expressions suivantes :

$$\lambda_{De,Di} = \left(\frac{\epsilon_0 T_{e,i}}{n_{e0,i0} e^2} \right)^{1/2} ; \quad (1.4)$$

I.3. DECHARGE ELECTRIQUE DANS UN GAZ :

Dans la nature il existe trois milieux matériels, solide, liquide et gaz, ces milieux. Ce trouve dans deux systèmes isolons ou conducteurs. La décharge électrique dans le troisième milieu si la transition du milieu d'un état isolé à un état conducteur,

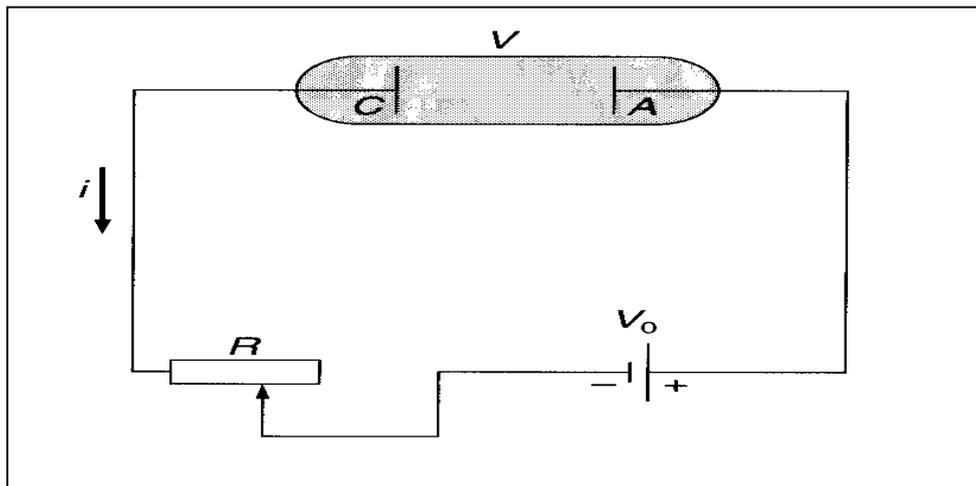


Figure 1.1 : Schéma d'une décharge électrique en courant continu.

L'application d'une tension accélère les électrons libres dans le gaz, ces électrons d'exciter et ioniser les atomes du gaz neutre. Les ions produisant attirée vers la cathode et peuvent en enlever des électrons secondaires. L'amorçage de décharge se produit quand chaque électron atteignant l'anode est remplacé par un électron émis par la cathode sous l'effet du bombardement ionique ou photonique. Dans ce cas la tension de l'amorçage de décharge dépend des différents paramètres du réacteur et du gaz utilisé.

La variation de courant de la décharge électrique de l'ordre de 10 A jusqu'à 10^{18} A . c'est variation de courant et traduit par la variation de décharge électrique entre l'anode et la cathode et qui correspond aux différents régimes de fonctionnement selon les besoins [11]-[12].

I.4. INTERACTION D'UN PLASMA AVEC LA SURFACE SOLIDE

I.4.1. Introduction

L'analyse des phénomènes physiques engendrés d'après l'étude de l'interaction d'un plasma avec la surface solide donnée des solutions considérables, pour comprendre le comportement énergétique des différentes espèces chimique contenu dans le milieu plasma, comme les électrons, les ions, les atomes et molécules. Et aussi les effets photoniques secondaires émis dans les réactions du plasma.

Dans notre travail, les ions si des particules lourd par rapport à les électrons, donc les ions d'une énergie faible après l'interaction avec la surface solide, subissent un reculement ou une absorption. Les ions accepte une grand accélération à travers la pré-gaine et la gaine, pour arrive à cette valeur les ions qui ont une énergie plus grand pour l'utilisation dans le traitement et la caractérisation de la surface solide [13].

D'autre part l'interaction des espèces neutres atomes et molécules et différente par rapport à celle des ions chargés négativement ou positivement, donc l'interaction des neutres et suivant directement la direction du champ électrique, donc cette interaction des neutres est isotrope permet de modifier les caractéristiques de la surface solide et contrôlée suivante les propriétés du gaz utilisé. De plus, la densité des neutres variés par rapport à particules chargées aux taux d'ionisation est

inférieure à 10^{-4} , donc l'interaction d'un plasma froid avec la surface solide et réactif par l'existence des neutres.

La décharge électrique crée un potentiel est supérieur à la surface solide en contact avec le plasma, c'est décharge produit des forces électrostatiques recule les ions négatifs et les électrons de direction inverse par rapport à la surface, par contre les ions positifs et atteindre la surface solide et interagie avec les grains de poussières dans la gaine.

L'interaction entre les particules dans un plasma produit des effets photoniques sans effet sur la surface solide, mais les polymères se produire des ondes photoniques qui interagissent avec la surface solide [14].

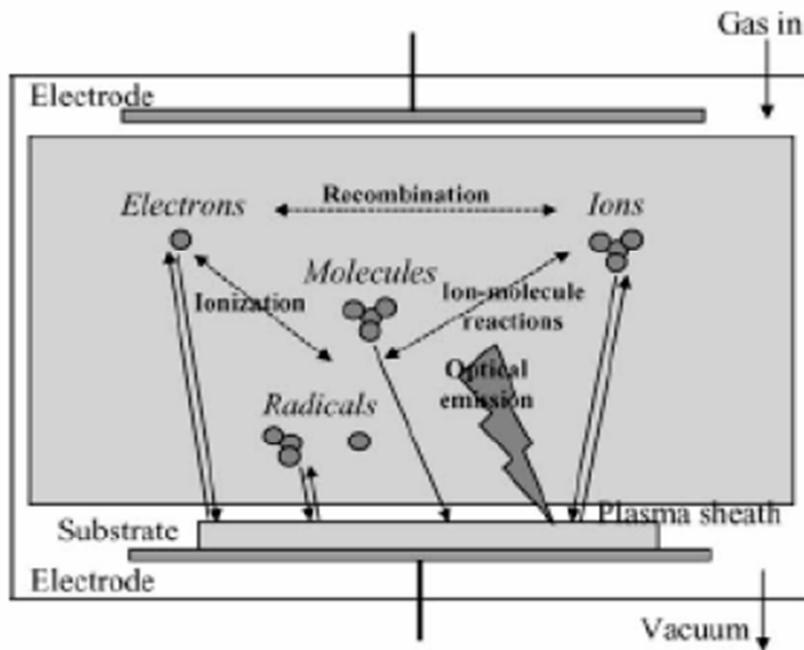


Figure 1.2 : Schéma des interactions plasma-surface solide [15]

I.4.2. Les gaines électrostatiques

Tout corps plonge dans un plasma et considéré comme un charge de test (substrat, électrode, graine de poussière, une sonde...) crée spontanément des charges libres de signe différents, des charges sont attirées et des charges sont repoussées par rapport à l'excès de charge d'un signe donné ainsi crée et collecté autour de cette charge de test, et formé une région appelé gaine (figure 1.3), cette gaine couvre l'effet de la charge de test par rapport le reste du plasma .La charge de test crée un potentiel est donne par l'expression suivant [16] :

$$\phi_T = k \frac{q_T}{r} \exp\left(-\frac{r}{\lambda_D}\right); \quad (1.5)$$

Où ϵ_0 est la permittivité du vide, λ_D est la longueur de Debye. Et le terme exponentiel présent la décroissance du potentiel de la charge de test dans le vide.

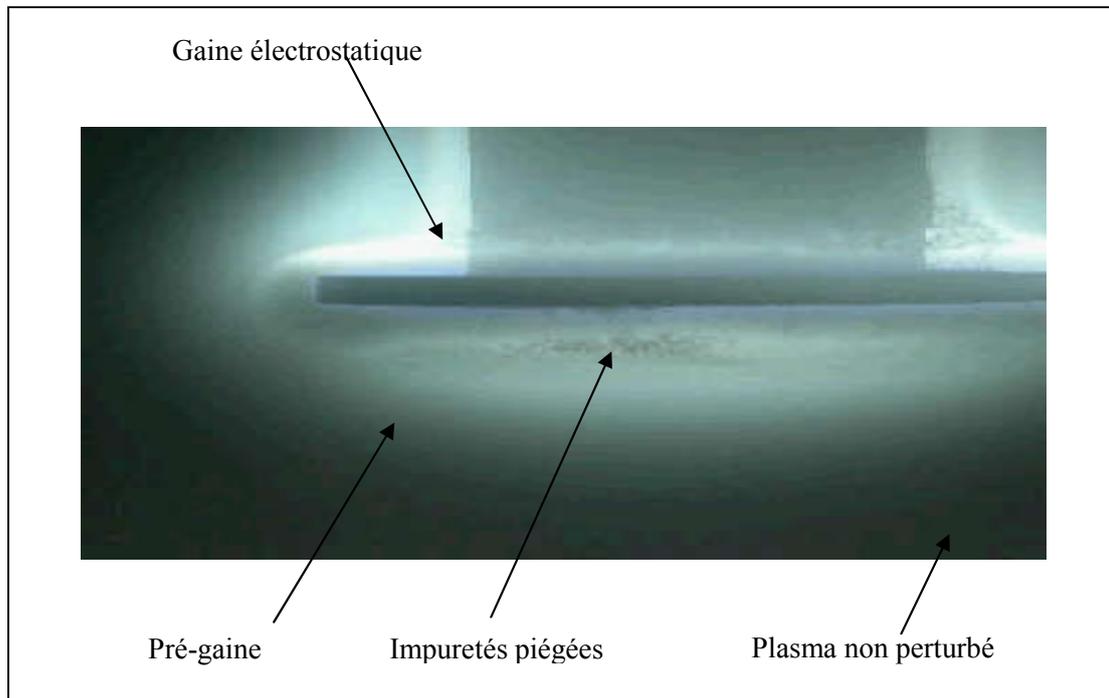


Figure 1.3 : Formation d'une gaine électrostatique autour d'une électrode [17].

I.4.3. Types de gaines électrostatiques

Nous imposent une surface solide dans un plasma électriquement neutre est de potentiel est nul ($\phi_p = 0$), le mouvement des charges liées au potentiel du surface solide par rapport à celle potentiel du plasma c'est-à-dire la surface polarisée par un potentiel ϕ_0 , c'est potentiel soit positif ou négatif. Donc on trouve deux types des gaines électrostatiques, électroniques ou ioniques.

I.4.3.1. Gaine électronique

Dits que la gaine est ionique dans le cas où le potentiel de la surface solide est positif par rapport au potentiel plasma, les électrons d'énergie fort et attirées vers la surface mais les ions d'énergie faible ($kT_i \ll kT_e$), sont totalement repoussées vers le plasma autour de lisières de la gaines électronique formé autour de la surface par le potentiel répulsif (figure 1.4).

Peut être calculée l'épaisseur de la gaine dans le cas où la densité des ions immobiles plane, par l'utilisation de la loi de Child Langmuir, donnée par [10]:

$$l_{GI} = \frac{2\sqrt{2}\pi^{1/4}}{3} \lambda_{De} \left(\frac{e(\phi_0 - \phi_p)}{T_e} \right)^{3/4}. \quad (1.6)$$

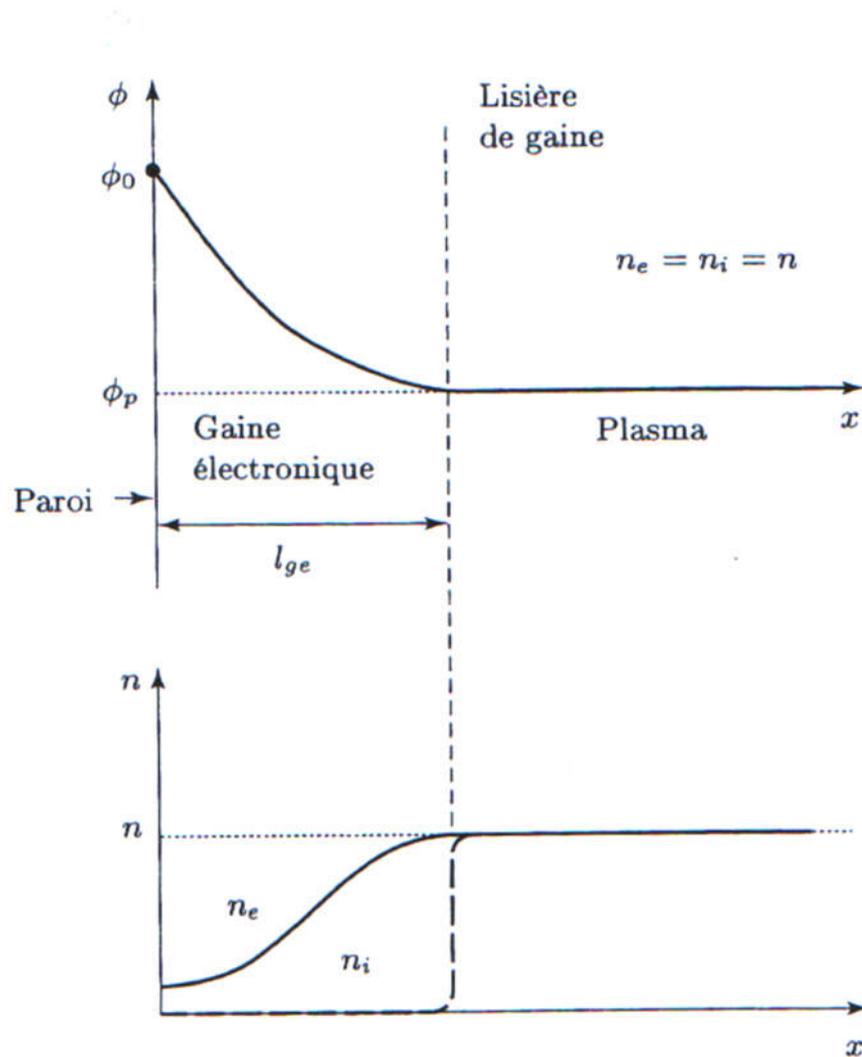


Figure 1.4 : Evolution du potentiel $\phi(x)$ et des densités ionique n_i et électronique n_e à l'interface plasma-paroi dans le cas d'une gaine électronique.

I.4.3.2. Gaine ionique

Dits que la gaine électrostatique est ionique dans le cas où le potentiel de la surface solide est négatif par rapport au potentiel plasma électriquement neutre, les ions positifs plus lourds ont une énergie faible, attirés vers la surface solide par le potentiel négatif, mais les électrons sont repoussés partiellement contre les ions avec une énergie forte. Dans ce cas le mouvement des électrons est plus rapide que celui des ions, cette différence de mouvement crée une zone entre la gaine ionique et le plasma appelée pré-gaine (ou zone de transition), les ions sont accélérés à l'entrée de cette zone par le champ de charge de l'espace.

Dans ce cas le plasma est électropositif, le potentiel et la densité électronique et ionique sont donnés par les expressions :

$$\phi_{g(e,i)} = \phi_p - \frac{T_e}{2e}; \quad (1.7)$$

$$n_{g(e,i)} = n_{0(e,i)} \exp\left(-\frac{1}{2}\right); \quad (1.8)$$

Peut être calculée l'épaisseur de la gaine dans le cas où la densité des ions immobiles plane, par l'utilisation de la loi de Child Langmuir, donnée par [10]:

$$l_{gi} = \frac{2^{5/4}}{3 \exp\left(-\frac{1}{4}\right)} \lambda_{De} \left(\frac{e(\phi_p - \phi_0)}{T_e} \right)^{3/4}; \quad (1.9)$$

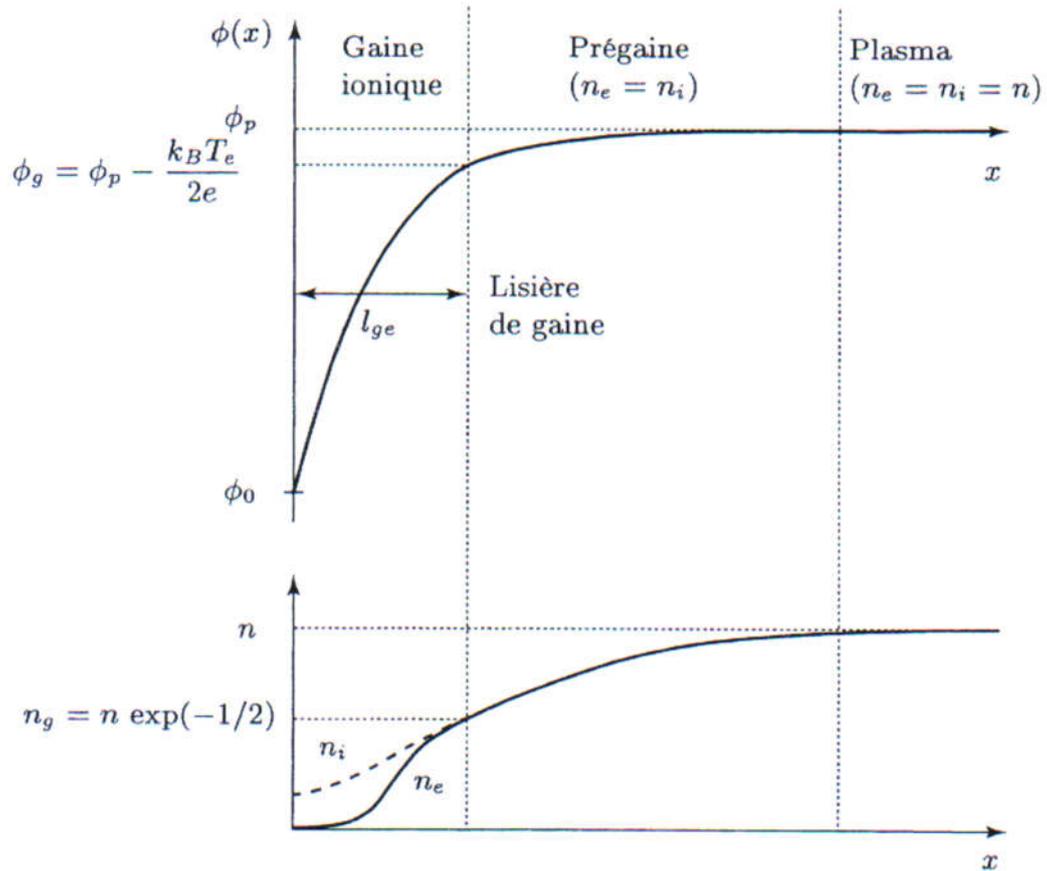


Figure 1.5 : Evolution du potentiel $\phi(x)$ et des densités ionique n_i et électronique n_e à l'interface plasma-paroi dans le cas d'une gaine ionique.

I.4.4. Critère et vitesse de Böhm

Les ions avant l'entrée dans la gaine ionique, est accélère avec une vitesse critique, appelée vitesse de Böhm, pour calculer cette vitesse, nous allons faire des approximations :

- a) le plasma est supposé à basse pression non collisionnel.
- b) le plasma est globalement neutre dans la gaine.
- c) les électrons et les ions négatifs est en équilibre thermodynamique. Avec des densités Boltzmaniens donnée par[18] :

$$n_e = n_{e0} \exp\left(\frac{e\phi}{T_e}\right); \quad (1.10)$$

$$n_j = n_{j0} \exp\left(\gamma_j \frac{e\phi}{T_e}\right); \quad (1.11)$$

Ou n_{e0} et n_{j0} sont les densité non perturbées et $\gamma_j = \frac{T_e}{T_i}$, l'indice (-) désigne les ions négatifs.

Pour calculer la vitesse des ions positifs à l'entrer dans la gaine ionique, nous utilisent le critère de Riemann.

$$\frac{e}{m_i} \int_0^{\infty} f(u) du \leq \frac{d(n_e + n_i)}{d\phi} \text{ avec } \phi = 0; \quad (1.12)$$

Ou m_i la masse des ions positifs, $f(u)$ la fonction de distribution des vitesses des ions positifs avant l'entrée de la gaine[19] :

$$f(u) = n_{0+} \delta(u - v_g); \quad (1.13)$$

v_g La vitesse des ions positifs à la lisière de la gaine. Pour calcule cette vitesse en remplacent les équations (1.10), (1.11) et (1.13) dans (1.12), et nous obtient la relation suivant :

$$v_g \geq v_B = c_{is} \left(\frac{\delta_e + \delta_j}{\delta_e + \gamma_j \delta_j} \right)^{1/2}; \quad (1.13)$$

Où $c_{is} = \left(\frac{T_e}{m_i} \right)^{1/2}$; est la vitesse acoustique ionique, $\delta_e = \frac{n_{e0}}{n_{i0}}$ et $\delta_j = \frac{n_{j0}}{n_{i0}}$ sont les

rapports des ions négatifs et positifs. Donc dans le cas au le plasma électropositif, v_B et la vitesse de Böhm, elle est égale la vitesse acoustique ionique.

I.5.DEFINITION DU PLASMA POUSSIÉREUX

Plasma poussiéroux est un type de plasma qui contient des espèces chimique et des particules dont la taille est en nanométrie ou micromètre, ces particules produit dans le milieu plasma d'après des interactions dans les traitements industriels (microélectronique, nanotechnologies...) [16], ou naturellement dans l'univers (des comètes, atmosphère et anneaux planétaires...) [40], ces particules présentés comme des impuretés ou graines de poussière qui contaminer le milieu plasma[41]. Par conséquent les scientifiques donnent une importance considérable de ce type du plasma, en raison les particules en équilibres altérées les particules chargée, ce qui conduit à divers phénomènes dans la recherche actuelle, comme le couplage électrostatique entre ces particules, ou pour passer d'une liaison faible à une liaison cristalline puisque la température des impuretés peut être quelque peu différente de la température de l'environnement.

I.5.1. Description de la formation des grains de poussières dans les plasmas

En 1924, Irving Langmuir a réalisé la première observation de la présence de grains de poussière dans un plasma en utilisant la diffusion de la lumière focalisée[1]. Suite à cette découverte, Langmuir a émis l'hypothèse que ces poussières chargées négativement par accumulation d'électrons et entourées des régions chargées positivement appelées gaines ioniques[20]. Depuis les années 1990, les chercheurs se sont beaucoup intéressés à la formation de ces grains de poussière et à leurs impacts sur le plasma, et de nombreuses études ont été menées pour comprendre leur formation, leur développement et leurs effets sur le plasma. Les

grains de poussière peuvent avoir plusieurs origines, notamment l'utilisation de gaz réactifs tels que le silane ou la pulvérisation de matériaux.

I.5.2. Formation des grains de poussière à partir d'un gaz réactif

Dans un plasma contenant un gaz réactif tel que le silane, la formation d'un grain de poussière se produit par le biais d'une série de réactions chimiques[21]. Les anions primaires impliqués sont les ions moléculaires SiH_3^- et SiH_2^- , qui sont générés par une réaction d'attachement dissociatif d'un électron e^- à une molécule de silane SiH_4 .

La figure(1.6) présente un résumé des différentes étapes impliquées dans la formation des grains de poussière et illustre également l'évolution de leur taille.

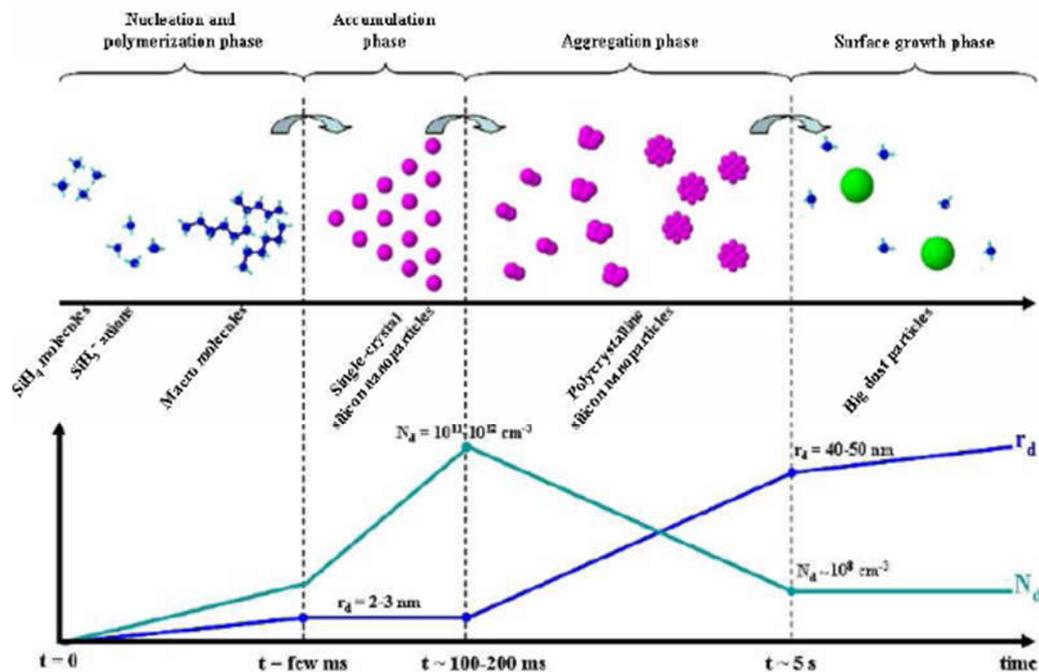


Figure1.6:Etapes de formation des grains de poussière à partir d'un gaz réactif[22].

I.5.3. Formation des grains de poussière par pulvérisation

- **Formation des clusters primaires**

Lorsqu'un plasma interagit avec une surface solide, une zone non neutre se forme, connue sous le nom de gaine électrostatique. Dans cette zone, les ions positifs sont accélérés vers l'électrode par le champ électrique ambipolaire. Les collisions entre les ions positifs provoquent la dissociation d'un monomère, qui se recombina ensuite avec l'ion incident. Ce processus conduit à la formation d'agrégats primaires à l'échelle atomique, appelés clusters primaires[6], comme illustré dans la figure (1.7).

- **Croissance des clusters et nucléation**

Les clusters primaires formés sont de charges positives, négatives et neutres. Ils interagissent entre eux pour former des particules de tailles nanométriques. La chimie du plasma impose leur formation.

- **Coagulation**

Une fois que les particules primaires ont atteint une concentration critique, des processus de croissance et d'agglomération très rapides se déclenchent. Les particules atteignent une taille de l'ordre de quelques dizaines de nanomètres. Après coagulation, cela conduit à la formation de macro-particules chargées négativement.

- **Croissance**

Dans cette dernière phase, les particules macroscopiques piégées dans le plasma croissent de manière indépendante pour former des particules micrométriques qui sont bien appelées grains de poussière. Le plasma est ainsi appelé plasma poussiéreux ou plasma complexe.

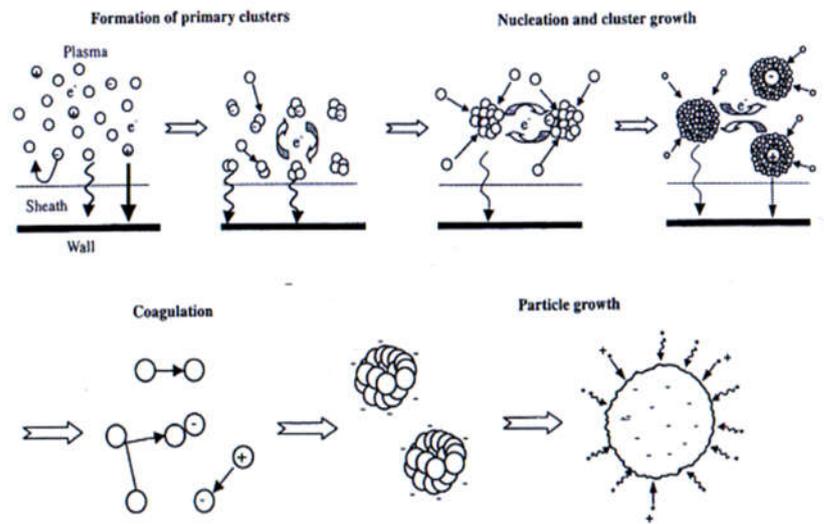


Figure1.7 : Etapes de formation d'un grain de poussière par pulvérisation d'une surface solide[6].

I.5.4.Processus de charge des grains de poussière

Les grains de poussière acquièrent une charge importante principalement grâce à la collecte d'électrons et d'ions par leurs surfaces. Cependant, il existe d'autres processus de charge des grains tels que l'émission secondaire, l'émission photoélectrique, et d'autres encore. Le calcul de la charge des grains de poussière dans un plasma dépend de leur isolation ou non. Par conséquent, plusieurs modèles théoriques ont été développés pour décrire la charge des grains dans les plasmas[23]-[24] Cependant, le modèle le plus couramment utilisé est le modèle du mouvement de l'orbite limitée (OML), basé sur la sonde de Langmuir. En raison de sa simplicité. Dans ce modèle, les grains de poussière sont considérés comme des sphères de rayon constant et de faible densité n_d , permettant de supposer qu'ils sont isolés les uns des autres. Cette approximation nous permet de considérer la validité du modèle (OML) lorsque la condition $r_d \ll \lambda_D \langle l_{en,jn} \rangle$, ou $l_{en,jn}$ est le libre parcours moyen des collisions entre les électrons ou les ions avec le gaz neutre[20]-[25]-[26].

I.6.Conclusion

Ce chapitre traite de l'interaction entre un plasma et une surface solide. Nous avons examiné en détail cette interaction. Nous avons commencé par une brève description de la décharge électrique et de son fonctionnement. Ensuite, nous avons donné un aperçu succinct de l'interaction entre les différentes espèces constituant le plasma froid et une surface solide. Ensuite, nous avons abordé la formation des gaines électrostatiques lorsque le potentiel de la surface solide est supérieur à celui du plasma, supposé globalement neutre (formation d'une gaine électronique), et lorsque le potentiel est inférieur (formation d'une gaine ionique). Nous avons présenté et discuté le critère de Böhm ainsi que l'épaisseur de la gaine électrostatique. Et en terminant ce chapitre par une discussion sur la formation et la charge d'un grain de poussières.

CHAPITRE II

***EFFET DE LA FORCE DE RESISTANCE
IONIQUE SUR LA FORMATION DES
GAINES ELECTROSTATIQUES DANS
UN PLASMA D'ARGON***

II.1. INTRODUCTION

Le plasma est un gaz ionisé constitué de diverses espèces chimiques, notamment des ions positifs et négatifs atomiques ou moléculaires, ainsi que des électrons. Cette description a suscité de nombreux phénomènes physiques qui ont permis aux chercheurs travaillant dans le domaine de la physique des milieux ionisés[27]. Ou la physique des plasmas de réaliser des progrès significatifs. En effet, plusieurs modèles théoriques ont été élaborés, se basant soit sur une description microscopique ou cinétique, soit sur une description macroscopique ou fluide[28].

En 1989, Selwyn et ses collègues ont réalisé une découverte révolutionnaire dans le domaine de la physique des plasmas en détectant des impuretés dans un réacteur industriel de la compagnie IBM grâce à la diffusion laser[29]. Cette découverte a ouvert un nouveau champ de recherche appelé "Physique des Plasmas Poussiéreux" ou "Physique des Plasmas Complexes". Les impuretés détectées étaient des grains de poussière mono-taille (de constante de rayon), sphériques et composés de matériaux métalliques ou diélectriques. Ces impuretés ont une influence complexe sur les paramètres qui définissent l'état du plasma, tels que la condition de neutralité, la longueur de Debye, la fréquence plasma...[30].

Ce chapitre présente un modèle théorique unidimensionnel et stationnaire qui décrit la dynamique des grains de poussière et l'effet de la force de résistance ionique sur la formation des gaines électrostatiques dans un plasma de décharge en absence de champ magnétique. Ce chapitre commence par une introduction aux forces agissant sur un grain de poussière, suivi par la présentation des équations de notre modèle. Les résultats numériques sont ensuite présentés et interprétés, suivis d'une conclusion.

II.2.FORCES AGISSANT SUR UN GRAIN DE POUSSIÈRE

Les grains de poussière dans un plasma sont soumis à diverses forces qui peuvent les piéger ou les éjecter vers les électrodes ou les parois dans le cas d'un plasma de décharge électrique comme dans les Tokamaks, les grains de poussière de grande taille sont généralement attirés par la force de gravité et tombent sur les parois, tandis que les plus petits peuvent pénétrer jusqu'au cœur du Tokamak,

constituant un obstacle à la réaction de fusion thermonucléaire, car leur température est inférieure à celle du combustible à fusionner. Ainsi, la compréhension et la maîtrise des forces agissant sur les grains de poussière sont nécessaires pour les éliminer du cœur du Tokamak. Ce paragraphe présente les forces les plus importantes et leur ordre de grandeur.

II.2.1. Force de la gravité

Les grains de poussière sont soumis à la force de la gravité terrestre, qui est régie par l'attraction universelle et décrite par l'expression suivante.

$$\vec{f}_g = m_d \vec{g} = \frac{4}{3} \pi r_d^3 \rho_d \vec{g} \quad (2.1)$$

Où \vec{g} désigne l'accélération gravitationnelle, tandis que m_d , r_d , et ρ_d représentent respectivement la masse, le rayon et la masse volumique des grains de poussière.

La contribution de la force à la taille des grains de poussière est proportionnelle à celle-ci. En conséquence, la contribution de la force est considérable pour les microparticules, mais elle devient négligeable pour les nano-particules. Pour isoler les interactions électriques entre les grains de poussière de différentes tailles de l'effet de la gravité, des expériences[31]-[32]. Ont été menées dans la Station Spatiale Internationale (ISS) dans des conditions appelées microgravité. Ces expériences, telles que le Projet PKE (Plasma Kristall Experiment) et le Projet IMPF (International Microgravité Plasma Facility), ont clairement montré que l'effet de la force de gravité est négligeable dans ces conditions.

II.2.2. Force électrique:

Les gaines électrostatiques correspondant à des zones qui ne sont pas électriquement neutres. En conséquence, les grains de poussière présents dans ces zones subissent une force électrique qui peut être exprimée par :

$$\vec{f}_e = q_d \vec{E} \quad (2.2)$$

La force électrique subie par les grains de poussière dans les gaines électrostatiques est déterminée par le champ électrique \vec{E} présent à l'intérieur de ces zones, qui

résulte de la séparation de charges. Ce champ électrique est lié au potentiel électrostatique ϕ par une relation:

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} \phi \quad (2.3)$$

II.2.3. Force de résistance ionique

Une gaine électrostatique est une zone anisotrope caractérisée par un champ électrique E qui est dirigé depuis le plasma, globalement neutre, vers la surface solide de potentiel négatif. Les ions, lors de leur déplacement, entrent en collision avec les grains de poussière présents dans la gaine électrostatique. Ces collisions entraînent un transfert d'impulsion ion-grain, qui est modélisé par une force appelée force de résistance ionique, exercée sur les grains de poussière. Cette force est composée de deux parties distinctes :

$$\vec{f}_{id} = \vec{f}_{id}^{coll} + \vec{f}_{id}^{coul} \quad (2.4)$$

Les termes \vec{f}_{id}^{coll} et \vec{f}_{id}^{coul} désignent respectivement la force de résistance ionique de collection (lorsque les ions sont collectés par le grain de poussière) et la force de résistance ionique de diffusion coulombienne (lorsque les ions sont diffusés par le grain de poussière).

Les ions ayant un paramètre d'impact b inférieur au paramètre d'impact de collection b_c [30] tel que défini ci-dessous :

$$b_c = r_d \left(1 - \frac{2e\phi_d}{m_i v_s^2} \right)^{1/2} \quad (2.5)$$

Une fois que les ions ont un paramètre d'impact b inférieur au paramètre d'impact de collection b_c , ils sont collectés par les grains de poussière. Dans ce cas, il y a un transfert total de l'énergie cinétique des ions aux grains de poussière, comme illustré dans la figure (2.1). Le potentiel à la surface du grain de poussière (potentiel flottant) est représenté par d_ϕ , tandis que la vitesse totale des ions est:

$$v_s = \left(v_i^2 + \frac{8t_i}{\pi m_i} \right)^{1/2}$$

Les ions qui ont un paramètre d'impact supérieur à b_c subissent une diffusion coulombienne.

Les expressions suivantes représentent les deux contributions calculées par Barnes et al[28]. En prenant en compte l'interaction du grain de poussière avec les ions se trouvant dans une sphère de Debye jusqu'à une longueur d'impact égale à la longueur de Debye λ_D :

$$\vec{f}_{id}^{coll} = n_i m_i v_s \pi b_c^2 \vec{v}_i \quad (2.6)$$

$$\vec{f}_{id}^{coul} = n_i m_i v_s 4\pi b_{\pi/2}^2 \Gamma \vec{v}_i \quad (2.7)$$

Où

le logarithme de Coulomb est donné par l'expression suivante: $\Gamma = \ln \left(\frac{\lambda_d^2 + b_{\pi/2}^2}{b_c^2 + b_{\pi/2}^2} \right)^{1/2}$

et le paramètre d'impact pour une diffusion coulombienne de $\pi/2$ est représenté par

l'équation: $b_{\pi/2} = \frac{eq_d}{m_i v_i^2}$;

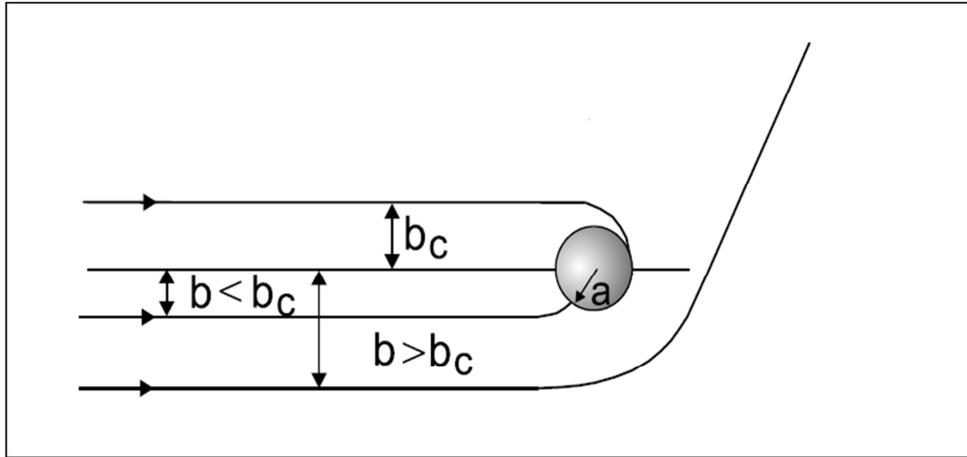


Figure 2.1 : Interaction d'union avec un grain de poussière

II.2.4. La force de résistance des neutres

Cette force présente le transfert d'énergie produit par d'une collision entre les grains de poussières et des neutres (atome, molécule), avec une pression faible, et le libre parcours moyen plus grande par rapport le rayon des grains de poussières, cette force est donnée par [33] :

$$\vec{f}_n = -\frac{4}{3}\pi\left(1 + \beta\frac{\pi}{8}\right)r_d^2 m_n n_n v_m (\vec{v}_d - \vec{v}_n) \quad (2.8)$$

Où $v_m = \left(\frac{8T_n}{\pi m_n}\right)^{1/2}$ la vitesse thermique des neutres.

II.2.5. La force thermo phorétique

Cette force présente la variation ou gradient de la température, d'une région à une énergie forte vers une région à une énergie faible. Les effets de cette force faisant varier la température des surfaces planage dans un plasma de décharge [42], cette force est donnée par [6] :

$$\vec{f}_T = -\frac{32}{15}\frac{r_d^2}{v_m}\left(1 + \frac{5\pi}{32}(1 - \alpha)\right)\kappa_T \nabla T_n \quad (2.9)$$

II.3. Paramètres et ordre de grandeurs des différentes forces

Pour comparer les modules de ces forces on considère un plasma d'Argon supposé dans le cas de décharge radiofréquence typique,

Les paramètres utilisés sont [34]:

- Pression : $P_n = 150 \text{ mTorr}$, ce qui correspond à une densité du gaz de
 $n_n = 4.8 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3}$
- $n_{e0} = n_{i0} = 5 \cdot 10^{15} \text{ m}^{-3}$
- $T_e = 3 \text{ eV}$
- $T_i \approx T_n = 0.03 \text{ eV}$
- $\rho_d = 1514 \text{ kg/m}^3$
- $r_d = 4.9 \text{ }\mu\text{m}$
- $v_n = 16 \text{ mm/s}$
- $v_i = v_B$
- $\nabla T_n = 2 \text{ K/cm}$

Les ordres de grandeur des différentes forces sont donnés sur le tableau suivant :

f_g	$7 \cdot 10^{-12} \text{ N}$
f_e	$9 \cdot 10^{-12} \text{ N}$
f_n	$2 \cdot 10^{-13} \text{ N}$
f_i	$2 \cdot 10^{-12} \text{ N}$
f_T	$5 \cdot 10^{-13} \text{ N}$

A partir de ces résultats, nous pouvons conclure que la force gradient de la température f_T et la force de résistance du gaz neutre f_n sont pratiquement négligeables devant les autres forces agissant sur le grain de poussière.

II.4. EQUATIONS UTILISES DANS LE MODELE

II.4.1. Equations fluides

Dans notre modèle nous utilisons les équations fluides, ces équations et en générale valable à condition pas de forts écart à l'équilibre thermodynamique local, cette condition moins que remplie, il est souvent la présence de la description cinétique et nécessaire, et on considère la distribution des particules dans l'espace des vitesses. Dans notre travail l'écart est faible par rapport à l'équilibre thermodynamique, dans ce cas la modélisation est suffisante pour décrire de plusieurs phénomènes physiques. Les équations pour les espèces 's' (les électrons, les ions) sont :

II.4.1.1. Equation de continuité :

$$\frac{\partial n_s}{\partial t} + \nabla \cdot n_s \vec{v}_s = 0. \quad (2.10)$$

II.4.1.2. Equation du mouvement :

$$\frac{\partial \vec{v}_s}{\partial t} + \vec{v}_s \cdot \nabla \vec{v}_s = \frac{q_s}{m_s} \vec{E} - \frac{\nabla P_s}{n_s m_s}. \quad (2.11)$$

Le champ électrique est donné par :

$$\vec{E} = -\nabla \phi. \quad (2.12)$$

Le potentiel électrique. Ils sont reliés par l'équation de Poisson :

$$\Delta \phi = -\frac{\rho}{\epsilon_0}. \quad (2.13)$$

Et la densité de charge $\rho = \sum n_s q_s$.

II.4.2. Equation de la charge d'une graine de poussière

La physique des plasmas poussiéreux est un phénomène qui concerne la charge des grains de poussière. Les particules ayant une grande capacité à acquérir des charges, les interactions entre elles sont de très courte portée, rendant ainsi la

description réelle et mathématique de la charge des grains de poussière pratiquement impossible. Pour remédier à cette difficulté, on utilise le modèle du grain de poussière isolé qui suppose une faible densité de ces grains. Plus précisément, le modèle considère que la longueur de Debye λ_D est beaucoup plus grande que le rayon d'un grain de poussière r_d , c'est-à-dire $r_d \ll \lambda_D$. Dans un plasma de décharge où la température des électrons est bien plus élevée que celle des ions ($T_e \gg T_i$), cette condition peut être simplifiée en $r_d \ll \lambda_d \ll \lambda_{Di}$,

$\lambda_{Di} = \left(\varepsilon_0 \frac{T_i}{n_{i0} e^2} \right)^{1/2}$, où λ représente la longueur de Debye ionique. Si nous ignorons

les phénomènes d'émission secondaire des électrons et de photon émis par les particules, la charge des grains de poussière est principalement causée par la collecte d'électrons et d'ions. Par conséquent, l'équation stationnaire de charge d'un grain de poussière peut être exprimée de la manière suivante :

$$v_d \frac{dq_d}{dz} = I_e + I_i, \quad (2.14)$$

Ou

$$I_e = -\pi r_d^2 e \left(\frac{8T_e}{\pi m_e} \right)^{1/2} n_e K_e(q_d), \quad (2.15)$$

$$I_i = \pi r_d^2 e n_i v_i \left(1 - \frac{2eq_d}{r_d m_i v_i^2} \right) \quad (2.16)$$

Ou

$$K_e(q_d) = \exp\left(\frac{eq_d}{r_d T_e}\right) \text{ pour } q_d < 0 \quad \text{et}$$

$$K_e(q_d) = 1 + \frac{eq_d}{r_d T_e} \text{ pour } q_d > 0.$$

Les courants électronique et ionique traversant les grains de poussière sont représentés respectivement par I_e et I_i . Si la dimension du grain de poussière est telle que $r_d < \lambda_{Di} < \frac{1}{n_i \sigma_{in}}$, où λ est le libre parcours moyen pour la collision ion-neutre et σ représente la section efficace de collision, alors la théorie de l'orbite limitée (OML) [35] basée sur la sonde de Langmuir peut être utilisée comme une approximation fiable du phénomène de charge des grains de poussière. Pour ce la nombreux modèle théorique étudier le phénomène de charge des grains de poussières [36].

II.5. APPROXIMATIONS DANS LE MODELE

II.5.1. Approximation de Boltzmann

Nous faisons l'hypothèse que les électrons se trouvent dans un état d'équilibre thermodynamique local, ce qui signifie qu'ils s'ajustent instantanément au potentiel environnant afin de maintenir cet équilibre. En pratique, La résolution de cette équation conduit à une densité électronique qui suit la distribution de Boltzmann, un résultat largement documenté dans la littérature.

$$N_e = \frac{n_e}{n_{e0}} = \exp\left(\frac{e\phi}{T_e}\right) \text{ avec } \Phi = -\frac{e\phi}{T_e}.$$

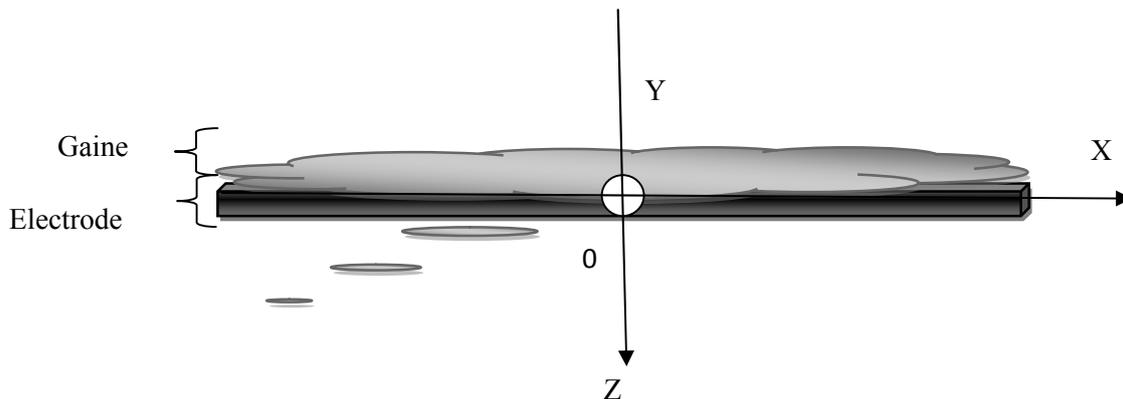
Dans cette formulation, la densité électronique du plasma non perturbé est représentée par n_{e0} , tandis que N_e est la densité électronique normalisée.

II.5.2. Approximation stationnaire

En supposant que la durée de l'expérience (temps de manipulation) est bien plus grande que le temps caractéristique associé aux variations des grandeurs physiques telles que la densité des particules n_s , la vitesse des particules v_s et le potentiel électrique ϕ , nous pouvons simplifier les équations de la charge des grains de poussière, l'équation de continuité et l'équation de conservation de la quantité de mouvement en négligeant les dérivées temporelles $\frac{\partial n_s}{\partial t}$, $\frac{\partial v_s}{\partial t}$ et $\frac{\partial \phi}{\partial t}$.

II.5.3. Approximation unidimensionnelle

Dans notre étude portant sur la dynamique des grains de poussière dans les gaines formées près des électrodes (voir figure 2.2), nous avons observé que les électrons suivent la distribution de Boltzmann.



**Figure 2.2 : Position d'un repère cartésien ($Oxyz$) par rapport à la gaine
Électrostatique formée au-dessus d'une électrode plane**

La vitesse des ions positifs à l'entrée de la gaine est perpendiculaire au plan de l'électrode, conformément au critère de Böhm. Le flux d'ions se déplace le long de l'axe de l'électrode (Oz). Au milieu de l'électrode, en négligeant les effets de bord, les effets transverses dans le plan (XOz) se compensent mutuellement. Par conséquent, les grandeurs physiques dépendent uniquement de la variable spatiale z .

II.5.4. Approximation de la gaine collisionnelle

La plupart des modèles théoriques qui étudient les gaines électrostatiques des plasmas de décharge à basse pression ($p \ll 1 \text{ Torr}$) font l'hypothèse de négliger les collisions entre les atomes ou molécules du gaz neutre et les ions. Cette approximation permet d'ignorer le transfert d'impulsion ion-neutre dans l'équation de conservation de l'impulsion des ions. Il est important de noter que ce transfert

d'impulsion est le plus significatif par rapport aux autres transferts. En pratique, cette approximation simplifie considérablement les calculs et permet d'obtenir des solutions analytiques.

II.6. MODELE THEORIQUE

Nous examinons un plasma unidimensionnel, non-magnétisé, qui est confiné entre deux électrodes planes et horizontales dans un réacteur plasma à courant continu (DC) ou à radiofréquence (RF). Le plasma est composé d'électron(e), d'ions positifs(i), de particules neutres atomiques ou moléculaires(n), ainsi que d'impuretés sous forme de grains de poussière sphériques et de taille uniforme (de rayon constant). Pour modéliser la gaine électrostatique qui se forme spontanément à côté de l'électrode, nous supposons que l'origine des abscisses se trouve à l'interface plasma-gaine électrostatique($z = 0$), où z représente la position le long de l'axe vertical oz , dans la direction de la gravité et que l'électrode est située à la position $z = L$, où la pré-gaine est négligée (voir figure 2.2). Nous supposons que le potentiel électrostatique ϕ est nul à l'interface plasma-gaine électrostatique($\phi = 0$), tandis que le potentiel de l'électrode ϕ_0 est négatif.

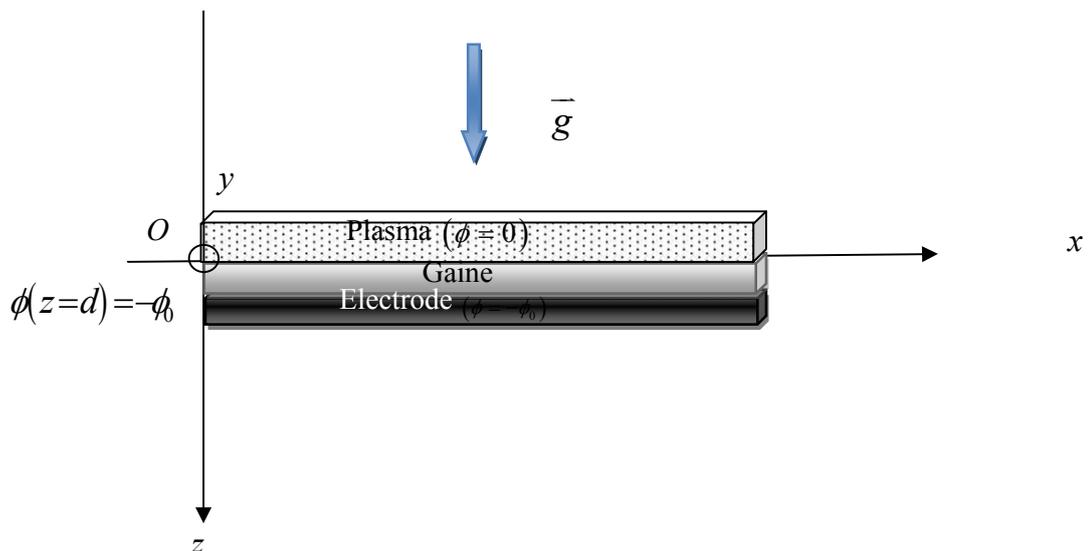


Figure 2.3 : modèle de gaine électrostatique

II.6.1. Equations de mouvement des électrons et des ions

II.6.1.1. Les électrons.

la densité électronique du plasma non perturbé est représentée par n_{e0} , tandis que N_e est la densité électronique normalisée est donné par la relation de distribution de Boltzmann :

$$N_e = \frac{n_e}{n_{e0}} = \exp(-\Phi); \quad (2.17)$$

II.6.1.2. les ions

La densité des ions est importante, le modèle fluide donne une bonne approximation pour la description d'un plasma. Les équations de continuité et de mouvement des ions sont donné par :

$$\frac{d(n_i v_i)}{dz} = k_i n_e n_n; \quad (2.18)$$

$$v_i \frac{dv_i}{dz} = -\frac{e}{m_i} \frac{d\phi}{dz} - \frac{1}{m_i n_i} \frac{dp_i}{dz} - n_n \sigma_{in} v_i^2; \quad (2.19)$$

Où $F_{in} = m_i n_n \sigma_{in} v_i^2$; et la force de transferts d'énergie des ions avec le gaz neutre, cette force est appelée la force de trainée due aux collisions. Où σ_{in} la section efficace des ions avec le gaz neutre à des températures de plasma froid, les valeurs des sections efficaces sont pratiquement constantes. [37]-[38]. Et n_i la densité des ions, v_i la vitesse fluide, p_i la pression des ions, n_n la densité des neutres, cette densité est considérée constante étant donné que le degré des ionisations $\alpha_i \leq 10^{-4}$.

On considère le mouvement des ions comme un fluide adiabatique pour la validité de l'approximation de la gaine électrostatique, pour cela nous utilisons l'équation adiabatique [6] :

$$p_i = C n_i^\gamma; \quad (2.20)$$

Pour un modèle théorique unidimensionnel $\gamma = 3$, la constante $C = \frac{T_i}{n_{i0}^2}$ et calculer,

pour un plasma non perturbé donnée par :

$$p_i = \frac{T_i}{n_{i0}^2} n_i^3; \quad (2.21)$$

Le taux de l'ionisation par l'impact électronique d'un gaz d'Argon non réactif est donné par la relation [27] :

$$k_i = 1.75 \times 10^{-8} T_e^{0.5} (1 + 0.13 T_e) \exp\left(-\frac{15.76}{T_e}\right); \quad (2.22)$$

II.7. Dynamique des graines de poussière

On considère La dynamique des graines de poussière comme un fluide, et décrite par l'équation de continuité et l'équation de mouvement qui sont donné par :

$$\frac{d(n_d v_d)}{dz} = 0; \quad (2.23)$$

$$m_d v_d \frac{dv_d}{dz} = f_e + f_g + f_{id} + f_{nd}; \quad (2.24)$$

Dans ce cas on considère les graines de poussières de forme sphérique de rayon r_d est de masse m_d , les forces qui si exercée sur le graine de poussière sont la force de la gravité, la force électrique, la force de résistance ionique, la force de résistance du neutres, la force aux gradient de température relativement est faible donc est négligeable devant les autres forces exercée sur le graine de poussière [39].

II.7.1. Charge des graines de poussières

La charge des graines de poussières est lie par rapport à la variation de la charge ionique et électronique, cette charge et donné par :

$$v_d \frac{dq_d}{dz} = n_e q_e + n_i q_i; \quad (2.25)$$

II.7.2. Potentiel électrostatique

Le potentiel électrostatique donné par l'utilisation de l'équation de poisson :

$$\frac{d^2 \phi}{dz^2} = -\frac{(n_i e - n_e e + n_d q_d)}{\epsilon_0}; \quad (2.26)$$

II.8. Equations du modèle

Pour des résultats pratiques, nous utilisons les relations des grandeurs de normalisations aux paramètres physiques adimensionnelles suivantes ::

$$\Phi = -\frac{e\phi}{T_e}, N_i = \frac{n_i}{n_{i0}}, N_e = \frac{n_e}{n_{e0}}, \xi = \frac{z}{\lambda_{di}}, u_i = \frac{v_i}{c_{is}}, u_e = \frac{v_e}{v_{te}}, \Phi_d = \frac{e\phi_d}{T_e} \text{ ou } \phi_d = \frac{q_d}{r_d},$$

$$N_d = \frac{n_d}{n_{d0}}, u_{d0} = \frac{v_{d0}}{c_{is}}, \gamma_i = \frac{T_e}{T_i}, \delta_e = \frac{n_{e0}}{n_{i0}}, \delta_d = \frac{n_{d0}}{n_{i0}}, v_{te} = \left(\frac{T_e}{m_i}\right)^{1/2}, c_{is} = \left(\frac{T_e}{m_i}\right)^{1/2},$$

$$c_{ds} = \left(\frac{z_c T_e}{m_d}\right) \text{ ou } z_c = \left(\frac{r_d T_e}{e^2}\right);$$

ϕ_d le potentiel de la surface du graine de poussière, c_{is} la vitesse ionique acoustique, c_{ds} la vitesse acoustique du poussières,

Les forces $F_{(g,e,id,nd)} = \frac{f_{(g,e,id,nd)}}{f_0}$ est normalisés par $f_0 = \frac{z_c T_e}{\lambda_{Di}}$.

L'utilisation des grandeurs de la normalisation dans les équations (2.18)-(2.19), (2.25) et (2.26) donne le système d'équations :

$$\frac{d^2 \Phi}{d\xi^2} = \frac{1}{\gamma_i} (N_i - \delta_e + \delta_d z_c \Phi_d N_d); \quad (2.27)$$

$$\frac{dN_i}{d\xi} = \left\{ -\frac{1}{u_i^2} \frac{d\Phi}{d\xi} + \alpha_c N_i + A \delta_e \frac{N_e}{u_i} \right\} / \left\{ 1 - \frac{3}{\gamma_i} \frac{N_i^2}{u_i^2} \right\}; \quad (2.28)$$

$$\frac{du_i}{d\xi} = \left\{ \frac{1}{u_i} \frac{d\Phi}{d\xi} - \alpha_c u_i - \frac{3}{\gamma_i} A \delta_e \frac{N_e}{N_i} \right\} / \left\{ 1 - \frac{3}{\gamma_i} \frac{N_i^2}{u_i^2} \right\}; \quad (2.29)$$

La constante : $A = \frac{k_i \lambda_{Di} n_n}{c_{is}}$;

L'utilisation des grandeurs de la normalisation dans les équations (2.1) et (2.2), l'intégration des équations (2.23) et (2.24) donne le système d'équations :

$$N_d = \left\{ 1 + G + \frac{2\Psi(\Phi)}{u_{d0}^2} + \frac{2\Omega(\xi, r_d)}{u_{d0}^2} \right\}^{-1/2}; \quad (2.30)$$

$$u_d = u_{d0} \left\{ 1 + G + \frac{2\psi(\Phi)}{u_{d0}^2} + \frac{2\omega(\xi, r_d)}{u_{d0}^2} \right\}^{1/2}; \quad (2.31)$$

La constante : $G = \frac{2g\lambda_{Di}}{c_{ds}^2 u_{d0}^2} \xi$,

$$\frac{d\Psi(\Phi)}{d\xi} = \Phi_d \frac{d\Phi}{d\xi}, \quad (2.32)$$

Ou $\psi(\Phi) = \int_0^\xi \Phi_d d\Phi$; l'énergie de potentiel électrostatique d'une graine de poussière.

$$\frac{d\Omega(\xi, r_d)}{d\xi} = F_{id}(\xi, r_d) + F_{nd}(\xi, r_d), \quad (2.33)$$

$\Omega(\xi, r_d) = \int_0^\xi (F_{id} + F_{nd}) d\xi$; L'énergie de collision des ions et des neutres avec les grains de poussière.

II.9. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Dans notre simulation numérique nous avons traités l'effet de la force de résistance ionique appliquée sur le grain de poussière dans le cas de l'interaction d'un plasma d'Argon électropositif avec une surface solide. Par conséquent, nous avons considéré le gaz d'Argon est à basse pression et faible température ($T_e (eV), T_i \leq 0.05 eV$) c'est gaz est non réactif une seul fois ionisé (Ar^+), avec la présence des électrons (e), les atomes neutres (Ar) et les grains de poussières de rayon r_d constante.

Dans la figure (2.4)(Partie I) nous avons présentés l'effet de la force de résistance ionique sur les propriétés de la gaine électrostatique, comme le potentiel électrostatique, la densité ionique et électronique, la vitesse ionique en fonction de la distance normalisée ξ par rapport à l'interface gaine-plasma. Cette région quasi neutre ($n_i = n_e$) appelée pré-gaine, et une deuxième région non neutre et dans l'interface gaine-électrode. Dans cette région les ions positifs attirés vers l'électrode du potentiel négatif et les électrons répulsifs vers le plasma avec une vitesse plus grand que par rapport les ions tel que $T_e > T_i$.

Dans le cas où les mêmes paramètres physiques que nous avons cités, nous avons examiné l'effet de l'absence et la présence de la force de résistance ionique sur

les différents paramètres de la gaine électrostatique dans la figure (2.4). En tenant compte de la force de résistance ionique nous observons clairement que l'épaisseur de la gaine électrostatique est considérablement réduite. En effet, la force de résistance ionique contient une partie de diffusion coulombienne et une deuxième partie de collection. Cette deuxième partie de F_{id} réduite considérablement le nombre d'ions, et peu que l'effet de cette force réduit considérablement l'épaisseur conséquent la séparation de charge, dans la gaine électrostatique. par conséquent l'épaisseur est réduite comme le montre dans la figure (2.4.a). En effet, la prise en compte de cette force réduit les densités ionique et électronique comme le montre dans les figures (2.4.b) et (2.4.c). Ainsi que la séparation de charge, puisque la distribution des électrons est Boltzmanniens et la vitesse fluide des électrons est nul ces électrons uniquement en agitation thermique est leur mouvement devient directionnel, le mouvement est supposé à celui des ions.

La figure (2.4) (partie II) l'effet de la force de résistance ionique sur la densité des grains de poussières et la structure de la gaine électrostatique est leurs paramètres physiques. Nous n'observons que l'augmentation de la densité des grains de poussières réduit l'épaisseur de la gaine avec une perte des ions et des électrons comme le montre dans les figures précédentes (2.4.b) et (2.4.c). Dans ce cas la vitesse d'impact des ions sur la surface solide est diminuée.

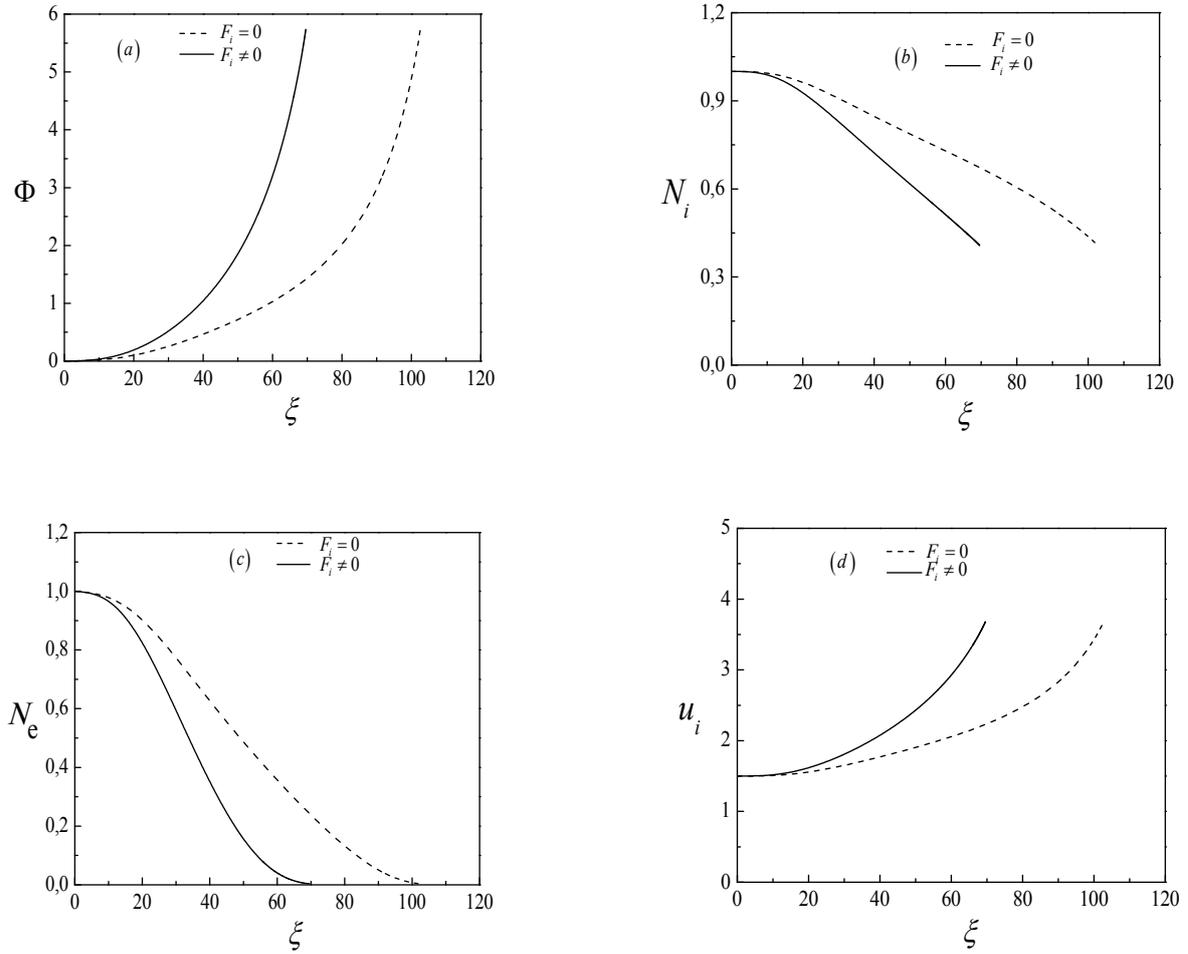


Figure (2.4) (Partie I): Potentiel électrostatique normalisé Φ (a), densité ionique normalisée N_i (b), vitesse fluide ionique normalisée u_i (c) et densité électronique normalisée N_e (d) en fonction de la variable spatiale normalisée ξ sans tenir compte de la force de résistance ionique sur les grains de poussière (courbes en tirets) et avec la force de résistance ionique (courbes en trait plein).

Les paramètres physiques utilisés sont : $T_e = 2eV$, $T_i = T_n = 0.05eV$, $n_{i0} = 10^{11} cm^{-3}$, $v_n = 0$, $P_n = 10mTorr$, $u_{i0} = 1.4$, $\sigma_{en} = 5.10^{-16} cm^2$, $\sigma_{in} = 5.10^{-15} cm^2$, $r_d = 3\mu m$, $\delta_d = 10^{-3}$, $\rho_d = 2g/cm^3$ et $u_{d0} = 3.5$.

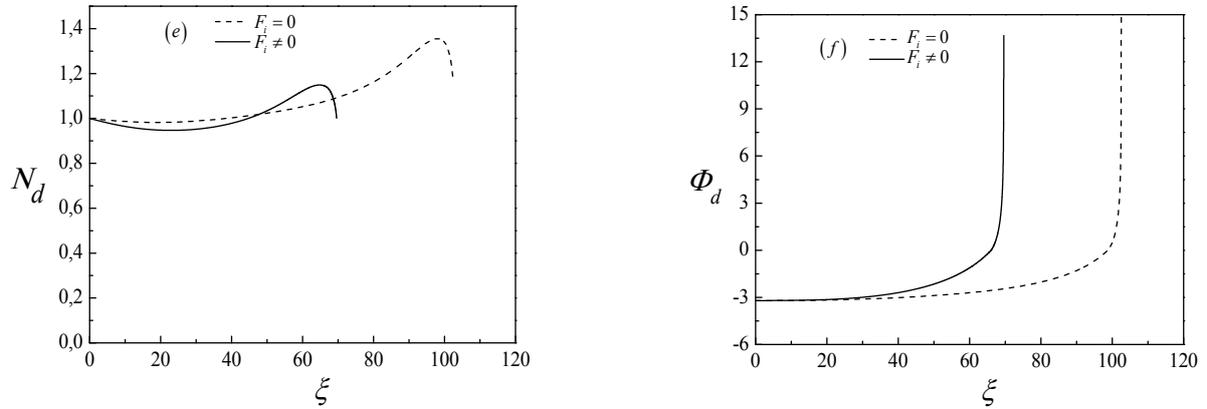


Figure (2.4) (Partie II) : la densité des grains de poussière normalisée N_d (e), et le potentiel de surface des grains de poussière normalisée Φ_d (f) en fonction de la variable spatiale normalisée ξ sans tenir compte de la force de résistance ionique sur les grains de poussière (courbes en tirets) et avec la force (courbes en trait plein).

Les paramètres physiques utilisés sont : $T_e = 2eV$, $T_i = T_n = 0.05eV$, $n_{i0} = 10^{11} cm^{-3}$, $v_n \ll 0$, $P_n = 10mTorr$, $u_{i0} = 1.4$, $\sigma_{en} = 5.10^{-16} cm^2$, $\sigma_{in} = 5.10^{-15} cm^2$, $r_d = 3\mu m$, $\delta_d = 10^{-3}$, $\rho_d = 2g/cm^3$ et $u_{d0} = 3.5$.

Dans la figure (2.5)(Partie I), dans cette figure nous avons présentés les différentes forces agissant sur la graine de poussière. Nous n'observant que la force de résistance ionique constante puis elle commence à augmenter. Alors que la densité des ions au voisinage de la surface est augment, la force électrique est dominante figure(2.5.h) et 2.5.j). La force de résistance des neutres pratiquement négligeable à une pression de 10 mTor , figure (2.6.i). La force de la gravité est dominante pour des grains de poussières de taille $r_d > 1\mu\text{m}$ que la force électrique est dominante figure (2.5.g) et (2.5.h),

Dans la figure (2.5)(Partie II), nous avons représenté la force totale agissant sur le grain de poussière es son énergie potentielle. Nous observons que la force totale s'annule en deux positions stables et instables. En remarque que la présence de la force de résistance ionique augmentée la stabilité du graine de poussière, puisque la force totale dominante à l'interface gaine-électrode, par contre l'absence de la force de résistance ionique est augmenté l'instabilité du graine de poussière puisque la force totale est diminué vers dans la région plasma-gaine. Dans ce cas-là les résultats numérique dans les figures(2.5.k) et (2.5.l) montrent clairement que les graines de poussière peuvent être piégés, particulier ceux qui ont une charge négative ce résultat est en bon accord avec les résultats de la littérature.

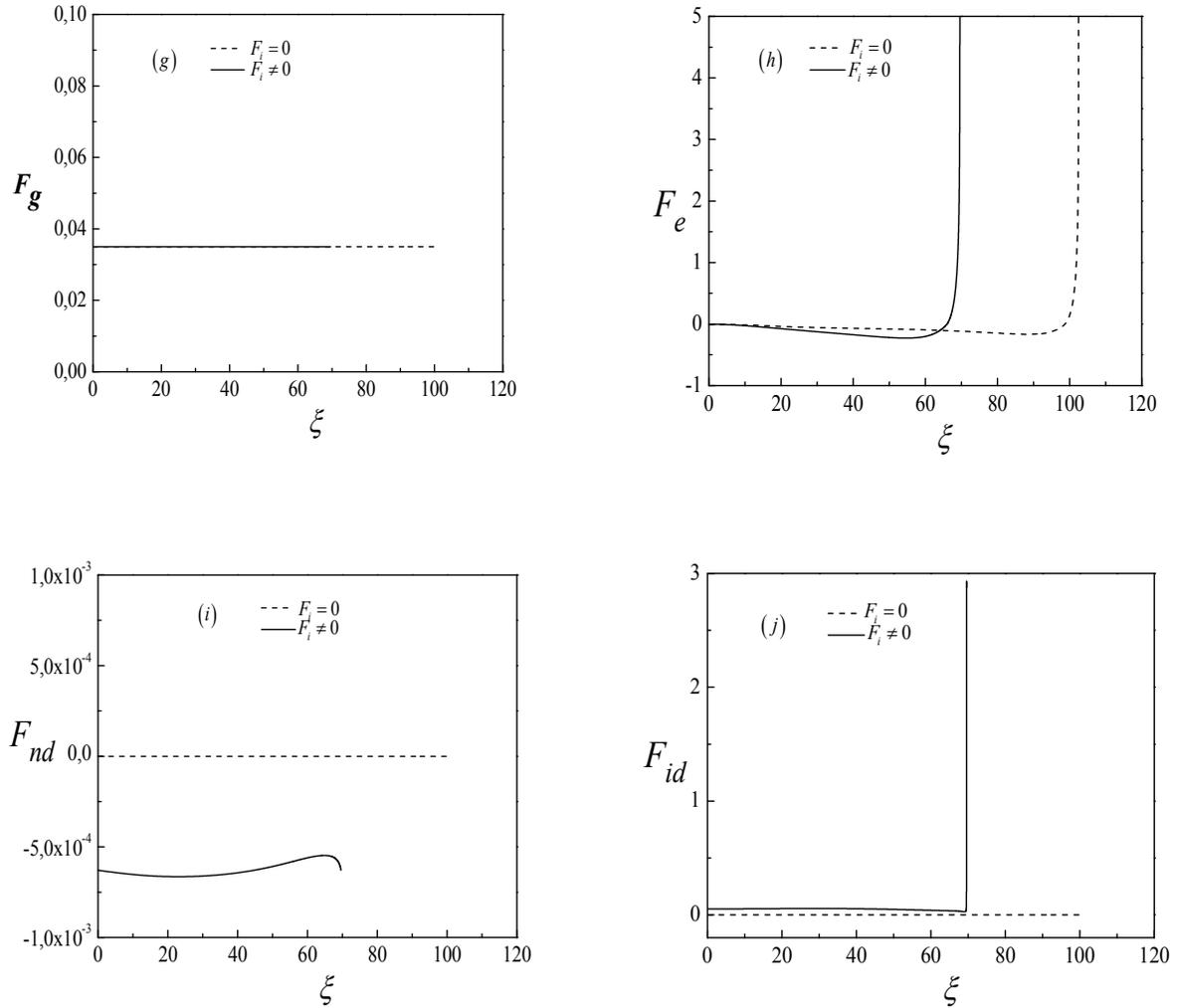


Figure (2.5)(Partie I) : Force de la gravité normalisée F_g (g), force électrique normalisée F_e (h) , forces de résistance des molécules neutres normalisée F_{nd} (i) , Force de résistance ionique normalisée F_{id} (j) , et en fonction de la variable spatiale normalisée ξ .

Les paramètres physiques utilisés sont : , $T_e = 2 eV$, $T_i = T_n = 0.05 eV$, , $v_n = 0 cm / s$,

$P_n = 10 mTorr$, $\rho_d = 2 g / cm^3$, $r_d = 3 \mu m$, $n_i = 10^{11} cm^{-3}$.

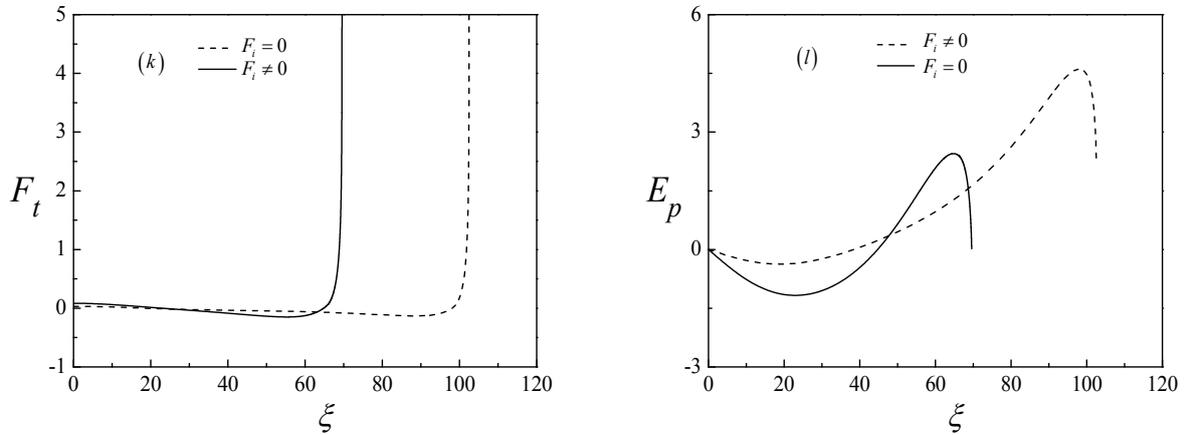


Figure (2.5)(Partie II) :Force de la totale normalisée F_t , énergie de potentiel normalisée E_p et en fonction de la variable spatiale normalisée ξ .

Les paramètres physiques utilisés sont : $T_e = 2 eV$, $T_i = T_n = 0.05 eV$, $v_n = 0 cm/s$, $P_n = 10 mTorr$, $\rho_d = 2 g/cm^3$, $r_d = 3 \mu m$, $n_{i_0} = 10^{11} cm^{-3}$.

II.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné l'effet de la force de résistance ionique sur les propriétés de la gaine électrostatique, et la dynamique du graine e poussière, pour cela nous avons établi un modèle théorique et unidimensionnel, stationnaire et le milieu plasma non magnétisé qui décrit l'interaction d'un plasma avec une surface solide .Dans ce modèle la distribution des électrons est Boltzmaniens, les ions positifs a été décrite par les équations fluides (considérés comme un fluide froid). Les graines de poussières sont considérées comme des sphères de rayon r_d constant (mono-taille), le mouvement de ces graines de poussières est décrit par les équations fluides, ou les différentes forces agissant sur ces graines, leur charge décrite par le modèle de l'orbite limitée (OML). Dans ce modèle en utilise les conditions initiales et un pas variable dans le système d'équations différentielles non linéaires.

Les résultats numériques montrent que l'effet de la force de résistance ionique sur les graines de poussières ou les propriétés de la gaine est plus dominant dans la région gaine-électrode est réduit considérablement l'épaisseur de la gaine électrostatique.

CONCLUSION GENERALE

Dans ce mémoire de master nous avons étudié l'interaction d'un plasma froide est électropositif de décharge électrique avec une surface solide à la présence des impuretés ou graine de poussières. Pour cela nous avons donné une introduction sur les définitions du milieu et des différents types du plasma avec les domaines de d'applications, et un aperçu sur les paramètres plasma. En suit la formation des gaines électrostatiques ainsi que la formation des graines de poussières. En particulier l'effet de la force de résistance ionique sur les propriétés de la gaine électrostatique est sur la dynamique des graines de poussières. Pour donner la modélisation de problème, nous avons établie un modèle théorique et unidimensionnel, stationnaire et le milieu plasma non magnétisé qui décrit l'interaction d'un plasma avec une surface solide. Dans ce modèle la distribution des électrons est Boltzmannienne est en équilibre thermodynamique, les ions positifs a été décrit par les équations fluides (considérés comme un fluide froid). Les graines de poussières sont considérées comme des sphères de rayon r_d constant (mono-taille), le mouvement de ces graines de poussières est décrit par les équations fluides, ou les différentes forces agissant sur ces graines, leur charge décrite par le modèle de l'orbite limitée(OML). Pour donner une résolution possible de ces équations en utilisant le critère de Böhm est la quasi-neutralité du plasma comme des conditions initiales.

Les résultats numériques montrent que l'effet de la force de résistance ionique sur la dynamique des graines de poussières. Est que la présence de la force de résistance ionique augmentée la stabilité du graine de poussière à l'interface gaine-électrode, par contre l'absence de la force de résistance ionique est augmenté l'instabilité du graine de poussière vers dans la région plasma-gaine. Même que sur les propriétés de la gaine cette force est plus dominante dans la région gaine-électrode est réduit considérablement l'épaisseur de la gaine électrostatique. Ces résultats sont particulièrement importants dans la mesure où nous pouvons les utiliser pour résoudre le problème des impuretés dans les Tokamaks. De plus la maîtrise de la physique des impuretés permet d'améliorer la qualité des couches minces dans le domaine de la technologie des semi-conducteurs.

REFERENCES

- [1] Langmuir, G. Found and A. F. Dittmer, Science, N. Y. 60, 392(1924).
- [2] B. Held, Physique des plasmas Froids, Masson Paris (1994).
- [3] M. O. Robbins, K. Kremer and G. S. Grest, J. Chem. Phys. 88,3286(1988).
- [4] K. G. T. J. Robinson and R. M. Roth, IEEE Trans. Plasma Sci. 14, 179 (1986).
- [5] P. C. Stangeby, The Plasma Boundary of Magnetic Fusion Devices, Institute of Physics Publishing, London (2000).
- [6] A. Bouchoul, Dusty plasma, Physics, Chemistry and Technological Impacts in Plasma Processing, Wiley Chichester, UK (1999).
- [7] T. E. Sheridan et J. Gorre, Phys. Fluids B 3, 2796(1991).
- [8] M. Sharifian et B. Shokri, Plasmas 14, 093503(2007).
- [9] J. M. Rax, Physique des plasmas, Dunod, Paris (2005).
- [10] Moisan et J. Pelletier, Physique des Plasmas Collisionnels, Application aux Décharges Haute Fréquence, EDP Sciences (2006).
- [11] Réactivité dans les plasmas, Ecole d'Eté, La Société Française de Physique (1983).
- [12] B. Chapman, Glow Discharge Process, John Wiley & Sons (1980).]
- [13] W. Coburn, IEEE Trans. Plasma Sci. 19, 1048 (1991).
- [14] Sheu M.-S., Hudson D. M., L. I.-H., Biomaterials Surface Modification Using Plasma Gas Discharge Process, in: Encyclopedia Handbook of Biomaterials and Bioengineering, D. L. Wise, Eds., New York, p. 865 (1995).
- [15] F. S. Denes, M. S., Progress in Polymer Science **29**, 816 (2004)
- [16] J. L. Delcroix et A. Bers, Physique des Plasmas, InterEditions et CNRS Editions (1994).
- [17] Expérience réalisée au Laboratoire de Physique des Milieux Ionisés et Applications (LPMIA), Université Henri Poincaré I Nancy, France.

- [18] Plasmas Froids, Cinétiques, Transports et Transferts, Publications de l'Université de Saint-Etienne (2005).
- [19] K-U. Riemann, *J. Phys. D : Appl. Phys.* **24**, 493 (1991).
- [20] H. M. Mott-Smith and I. Langmuir, *Phy. Rev.* **28**, 727 (1926).
- [21] K. D. Bleecker and A. Bogaerts, *Phys. Rev. E* **71**, 066405-1 (2005).
- [22] Marjorie Cavarroc. Nucléation, croissance et comportement de poussière dans les plasmas réctifs radiofréquence base pression : Des nanocristaux aux grains submicroniques polycristallins, Thèse Université d'Orléans (2007).
- [23] J. Allen, R. Boyd, and P. Reynolds, *Proc. Phys. Soc.* **70**, 297 (1957).
- [24] V. Fortov, I. Iakubov, A. Khrapak, *Physics of Strongly Coupled Plasma*; Clarendon Press, Oxford (2006).
- [25] Ya. L. Al'pert, A. V. Gurevich, and L. P. Pitaevskii, *Space Physics with Artificial Satellites*, Plenum Press, New York (1965).
- [26] J. E. Allen, *Phys. Scr.* **45**, 497 (1992).
- [27] M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg, *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*, Wiley, New York (1994).
- [28] J. L. Delcroix et A. Bers, *Physique des Plasmas*, InterEditions et CNRS Editions (1994).
- [29] G. S. Selwyn, J. Singh, R. S. Bennett, *J. Vac. Sci. Technol. A* **7**2758 (1989).
- [30] P. K. Shukla and A. A. Mamoun, *Introduction to dusty plasma physics*, Institute of Physics Publishing (2002).
- [31] A. P. Nefedov, G. E. Morfill, V. E. Fortov, H. M. Thomas, H. Rothermel, T. Hagl, A. V. Ivlev, M. Zuzic, B. A. Klumov, A. M. Lipaev, V. I. Molotkov, O. F. Petrov, Y. P. Gidzenko, S. K. Krikalev, W. Shepherd, A. I. Ivanov, M. Roth, H. Binnenbruck, J. A. Goree, Y. P. Semenov, *PKE-Nefedov : Plasma Crystal Experiments on the International Space Station*, *New J. Phys.* **5**, 33.1 (2003).
- [32] G. E. Morfill, H. M. Thomas, U. Konopka, H. Rothermel, M. Zuzic, A. Ivlev and J. Goree, *Phys. Rev. Lett.* **83**, 1598 (1999).
- [33] Expérience réalisée au Laboratoire de Physique des Milieux Ionisés et Applications (LPMIA), Université Henri Poincaré I Nancy, France.

- [34] B. Zaham, Etude théorique du piégeage des grains de poussière dans les gaines électrostatiques d'un plasma de décharge, Mémoire de Magister, USTHB (2008).
- [35] P. K Shukla, D. A. Mendis and T. Desai, editors, Proceedings of the International Conference on Physics of Dusty Plasmas, Advances in Dusty Plasmas Goa, World Scientific Singapore, 1996, S. Nunomura, M. Nakamura and Ohno and S. Takamura p. 485.
- [36] J. Goree, Plasma Source Sci. Technol. **3**, 400 (1994).
- [37] D. P. Resendes, G. Sorasio, and P. K. Shukla, Phys. Plasmas **9**, 2988 (2002).
- [38] B. M. Smirnov, Reference Data on Atomic Physics and Atomic Processes (Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2008).
- [39] Gabriela VeselinovaPaeva, "Sheath Phenomena in Dusty Plasmas", Ph.D dissertation (TechnischeUniversiteit Eindhoven, Netherlands, 2005).
- [40] C. K. Goertz, Dusty Plasmas in the Solar System, Reviews in Geophysics, **27**, 271(1989).
- [41] S. I. Krasheninnikov, R. D. Smirnov and D. L. Rudakov, Dust in Magnetic Fusion Devices, PlasmaPhysics and Controlled Fusion, **53**, 083001 (2011).
- [42] G. M. Jellum and D. B. Graves, Appl. Phys. Lett. **61**, 2077 (1990).

Résumé

Ce mémoire de master se concentre sur l'étude de l'interaction entre un plasma froid et électropositif généré par une décharge électrique et une surface solide en présence d'impuretés ou de grains de poussières.

Pour modéliser ce problème, un modèle théorique unidimensionnel, stationnaire et non magnétisé est établi pour décrire l'interaction entre le plasma et la surface solide. Dans ce modèle, la distribution des électrons est considérée comme une distribution de Boltzmann en équilibre thermodynamique, tandis que les ions positifs sont décrits par des équations fluides en tant que fluide froid. Les résultats numériques montrent que la force de résistance ionique a un impact sur la dynamique des grains de poussières. En présence de la force de résistance ionique, la stabilité des grains de poussières à l'interface entre la gaine et l'électrode est augmentée, tandis que son absence augmente l'instabilité des grains de poussières vers la région plasma-gaine.

ملخص

تركز أطروحة الماجستير هذه على دراسة التفاعل بين البلازما الباردة والحساسية الكهربائية الناتجة عن التفريغ الكهربائي والسطح الصلب في وجود الشوائب أو حبيبات الغبار.

لنمذجة هذه المشكلة ، تم إنشاء نموذج نظري أحادي البعد وثابت وغير ممغنط لوصف التفاعل بين البلازما والسطح الصلب. في هذا النموذج ، يعتبر توزيع الإلكترونات بمثابة توزيع بولتزمان في التوازن الديناميكي الحراري ، بينما يتم وصف الأيونات الموجبة بواسطة معادلات السوائل على أنها سائل بارد. تظهر النتائج العددية أن قوة المقاومة الأيونية لها تأثير على ديناميكيات بذور الغبار. في ظل وجود قوة مقاومة الأيونات ، يزداد ثبات بذور الغبار عند السطح الفاصل بين الغلاف والقطب ، بينما يؤدي غيابها إلى زيادة عدم استقرار بذور الغبار في اتجاه منطقة غمد البلازما.

Abstract

This master's thesis focuses on the study of the interaction between cold plasma, electro sensitivity induced by electrostatic discharge, and a solid surface in the presence of impurities or dust grains. To model this problem, a one-dimensional, static and non-magnetic theoretical model was constructed to describe the interaction between the plasma and the solid surface. In this model, the distribution of electrons is a Boltzmann distribution in thermodynamic equilibrium, while the positive ions are described by the fluid equations as a cold liquid. The numerical results show that the strength of ionic resistance has an effect on the dynamics of dust seeds. In the presence of the ion resistance force, the stability of the dust seeds at the interface between the shell and the electrode increases, while its absence increases the instability of the dust seeds towards the plasma sheath region.

