

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou

FACULTÉ DES SCIENCES

DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE

LABORATOIRE DE PHYSIQUE ET CHIMIE QUANTIQUE



MÉMOIRE DE MASTER

Filière : Physique

Spécialité : Nanophysique

Présenté par :

AIT BELKACEM MOUNA

Thème

Étude des conditions optimales pour le contrôle des décharges plasma double fréquence à couplage capacitif

Devant le jury d'examen composé :

LAMROUS	Omar	Professeur	U.M.M.T.O.	Président
MEZEGHRANE	Abdelaziz	Professeur	U.M.M.T.O.	Examineur
BOUDGHENE STAMBOULI	Arslane	MCB	U.M.M.T.O.	Rapporteur
BENALLAL	Rafik	Professeur	E.S.S.A.T.	Co-rapporteur

Soutenu le : 02/10/2021

Table des matières

Table des figures	3
Liste des tableaux	5
Introduction Générale	9
1 Généralité Sur Les Plasmas	11
1.1 Les Plasmas	11
1.1.1 Densité électronique	11
1.1.2 Température Électronique	12
1.1.3 La Fréquence d'oscillation	12
1.1.4 Libre Parcours Moyen	13
1.1.5 Longueur De Debye	13
1.1.6 Fréquence Plasma	13
1.2 Les différents types de décharges plasmas	13
1.2.1 Les décharges micro-ondes	13
1.2.2 Les décharges à courant continu	14
1.2.3 Les décharges radio fréquence(RF)	14
1.2.3.1 Décharge RF inductif (ICP)	15
1.2.3.2 Décharge RF capacitif (CCP)	16
1.3 Les décharges plasmas RF à couplage capacitif	16
1.3.1 Mode de fonctionnement	16
1.3.2 Potentiel plasma	17
1.3.3 Formation des gaines	17
1.3.4 Tension d'auto polarisation	18
1.4 Conclusion	19
2 Méthode PIC-MCC et Modélisation	20
2.1 Schéma d'une simulation PIC-MCC	20
2.2 Description du code xpdp2	21
2.3 Condition de stabilité	23
2.4 Modélisation physique	23

3 Résultats et Discussions	27
3.1 Conditions de Simulation	27
3.2 Effet de déphasage	28
3.3 Effet de la capacité de blocage	32
3.4 Effet de la pression	33
3.5 Effet de la tension appliquée et du potentiel d'auto-polarisation . . .	35
Conclusion Générale	37
Bibliographie	38

Table des figures

1.1	présentation d'une décharges micro-onde[7]	14
1.2	décharges à courant continu[8]	14
1.3	Représentation d'une décharge radiofréquence [9].	15
1.4	Réacteur radiofréquence à couplage inductif [12].	15
1.5	Décharge Radiofréquence à couplage capacitif [13].	16
1.6	Schéma simplifié d'une décharge Radiofréquence à couplage capacitif [3].	17
1.7	Potentiel plasma	17
1.8	Distribution du potentiel plasma pour une décharge RF-CCP [3].	18
2.1	Organigramme d'une simulation PIC-MCC.	21
2.2	Fichier d'entrée.	22
2.3	Interface graphique du programme xpdp2.	22
2.4	Schéma de la décharge DF-CCP [3].	24
2.5	$V(t) = 250 \cos(2\pi ft + \theta) + 250 \cos(4\pi ft)$ pour différentes valeurs de l'angle de phase θ pour 1 périodes RF ($2T_{RF}$)[3].	25
3.1	Fonction de distribution ioniques à l'électrode de puissance pour différent angle de phase calculée par PIC pour ($V_0 = 500V, C_B = 500pF$).	28
3.2	Fonction de distribution ioniques à l'électrode de masse pour différent angle de phase calculée par PIC pour ($V_0 = 500V, C_B = 500pF$).	29
3.3	Fonction de distribution ioniques des électrodes de puissance et de masse à différents déphasage.	30
3.4	Distribution spatiale des densités d'argon au centre de la décharge calculée par la simulation PIC.	31
3.5	Profil de potentiel pour différents déphasages ($V_0 = 500V, C_b = 75pF$).	31
3.6	Fonction de distribution ioniques sur l'électrode de puissance pour différentes capacités ($V_0 = 500V, \theta = 0^\circ$).	32
3.7	Fonction de distribution ioniques sur l'électrode de masse pour différentes capacités ($V_0 = 500V, \theta = 0^\circ$).	32
3.8	Profil de potentiel en fonction de la distance inter électrode pour différentes capacités.	33
3.9	Fonction de distribution des énergies ioniques sur l'électrode de puissance à différentes pressions.	33

3.10	Fonction de distribution des énergies ioniques sur l'électrode de masse à différentes pressions.	34
3.11	Le profil de la densité d'Argon en fonction de la distance inter électrode pour différentes pressions.	34
3.12	Fonction de distribution des énergies ioniques à différentes tensions d'entrées.	35
3.13	Tension d'auto polarisation en fonction de la capacité de blocage. . .	36
3.14	Tension d'auto polarisation en fonction de déphasage.	36

Liste des tableaux

3.1 Paramètres de la décharge du gaz Ar	28
---	----

Remerciements

Tout d'abord et avant tout je remercie Dieu notre créateur le tout puissant qui m'a donné la force, la patience et le courage pour réaliser ce modeste travail.

Ce travail a été réalisé au Laboratoire de Physique et Chimie Quantique (LPCQ) de l'Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.

J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur Hamid BOUZAR, directeur de laboratoire de Physique et Chimie Quantique LPCQ et Professeur à l'université Mouloud MAMMERRI de Tizi-Ouzou, qui m'a offert tous les moyens et les conditions nécessaires pour élaborer ce travail.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à mon encadreur Monsieur Arslane BOUDGHENE STAMBOULI, Maître de conférences "B" à l'université de Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, d'avoir encadré et bien dirigé mon travail, et pour son encouragement, tout au long de mon stage, ses conseils avisés et son temps qu'il m'a offert, et surtout pour sa grande gentillesse.

Mes remerciements chaleureux aussi pour les membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'évaluer mon travail.

Un grand merci à l'ensemble de ma famille et plus particulièrement à mes parents et mes frères pour leur amour, leur confiance, leurs conseils ainsi que leur soutien inconditionnel qui m'a permis de réaliser les études pour les quelles je me destine et par conséquent ce mémoire.

Dédicaces

Avec l'aide de bon DIEU j'ai pu réaliser ce modeste travail que je dédie :

A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui ne cesse jamais de sacrifier pour me voir réussir, que dieu vous garde pour moi, à toi Mon Très Cher Père.

A la lumière de mes jours, qui a souffert sans me laisser souffrir, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur : Maman que j'adore.

A mes très cher petits frères HOCINE et AHCEN : En témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse et reconnaissance, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde.

A tous les membres de ma famille. A mes camarades et ma deuxième famille avec qui j'ai partagé mes années et des moments inoubliables avec beaucoup de joie, que Dieu les protège et leur offre la chance et réalise leurs rêves.

Resumé

La fabrication assistée par plasma englobe une vaste gamme d'applications industrielles et de traitement de surface (gravure, dépôt, ...). Elle a un impact direct sur l'économie mondiale dans différents aspects de l'industrie des hautes technologies. L'utilisation de ces procédés nécessite un contrôle au niveau des paramètres du plasma, tels que le déphasage (θ), la capacité de blocage (C_b), les amplitudes de voltages (V) ...etc. L'avantage de la décharge plasma double fréquence à couplage capacitif est qu'il peut permettre le contrôle de l'énergie ionique pendant le processus de dépôt en couche mince sous certaines conditions entraînant l'effet de l'asymétrie électrique.

On présente dans ce travail une étude paramétrique dans une décharge double fréquence par la méthode PIC-MCC. Les résultats obtenus sont présentés et discutés.

Mots-clés : Décharge RF à couplage capacitive, asymétrie électrique, Particule In Cell

Abstract

Radiofrequency (RF) plasma discharges are very involved in many industrial and surface treatment applications (engraving, deposition, etc.), the use of processes requires control at the level of plasma parameters, such as phase shift (θ), blocking capacity (c_b), voltage amplitudes (V)...etc. The advantage of capacitively coupled dual frequency plasma discharge is that it can allow the control of ionic energy during the thin film desposition process under certain conditions causing the effect of electrical asymmetry. We present in this work a parametric study in a parametric study in a double frequency discharge by the PIC-MCC method. The results obtained are presented and discussed.

Keywords : Capacitively coupled RF discharge, electrical asymmetry, particle In cell .

Introduction Générale

En physique, le plasma est un gaz électriquement conducteur, on l'appelle parfois quatrième état de la matière, il a été utilisé pour la première fois par le physicien Irving Langmuir en 1928[1]. Un plasma est un ensemble de particules neutres (atomes, molécules, radicaux), des ions, des électrons, photons émis et absorbés. En réalité, plus de 99% de l'univers est sous forme de plasma. Il existe deux grandes catégories de plasma ; les plasmas dits naturels, peuvent exister dans le voisinage de la terre, on cite les éclairs, les aurores boréales ou l'ionosphère ou dans l'espace comme le soleil, et l'autre catégorie sont les plasmas de laboratoire générés par l'homme (Les décharges électriques dans les tubes fluorescents...), ils sont utilisés dans un nombre très divers d'applications industrielles et constituent un sujet de recherche très dynamique et pluridisciplinaire qui a un effet majeur sur l'économie mondiale. Le développement de la physique des plasmas, a fait l'objet à de nombreuses applications technologiques telles que les composants électroniques nécessitant un traitement de surface par un plasma (dépot, gravure, implantation . . .) [2].

Les types de décharge plasma sont nombreuse. Ils diffèrent par le mode de couplage de l'énergie au gaz, ainsi que par la fréquence d'excitation qui varie du continu au domaine micro-onde. La majorité des systèmes utilisés pour le dépôt ou la gravure en micro-électronique fonctionnent à 13.56 MHz (RF) ou 2.45 GHz (micro-onde). Les décharges plasmas à couplage capacitif sont très utilisées dans l'industrie de la micro-électronique et de traitement de surface. Ces procédés exigent une bonne maîtrise des propriétés physiques du plasma afin de contrôler l'énergie cinétique ionique pendant le processus [3]. Dans ce travail les effets de l'angle de phase, de la capacité de blocage, de la pression et de la tension d'auto polarisation sont étudiés dans une décharge plasma de type capacitif double fréquence(13,56Mhz et sa première harmonique) par la simulation PIC-MCC, le plasma est simulé dans une enceinte entre deux électrodes distant de 3cm pour une géométrie asymétrique. Ce mémoire est constitué de trois chapitres :

Dans le premier chapitre nous présentons des généralités sur le plasma, les grandeurs caractéristiques associées, les types de plasma de décharge électrique ainsi que les décharges plasmas RF de type capacitif sont définies par la suite.

Le deuxième chapitre est consacré en premier lieu à la présentation de la méthode de calcul numérique (PIC-MCC) ainsi que le code (Xpdp2) utilisé pour notre décharge RF-CCP , nous décrivons par la suite la modélisation physique du problème

à savoir le modèle de l'effet de l'asymétrie électrique (EAE).

Dans le dernier chapitre nous abordons les conditions de simulation qui ont été pris en compte dans la calcul, et les discussions sur les résultats obtenus, nous nous focalisons en particulier sur (l'effet de déphasage, capacité de blocage, pression et les deux tension d'entrée et d'auto polarisation). Nous terminons notre mémoire par une conclusion générale.

Chapitre 1

Généralité Sur Les Plasmas

Introduction

Le terme "plasma", introduit en physique en 1928 par le physicien Langmuir[4], désigne un gaz ionisé électriquement neutre. Le plasma est un milieu constitué d'un ensemble de particules neutres, d'ions et d'électrons. Il constitue plus de 99 % de la matière de l'univers. Ce chapitre est dédié à la présentation de quelques notations fondamentales de la physique des plasmas. Nous expliquerons les différentes grandeurs caractéristiques et les types de décharges.

1.1 Les Plasmas

Le plasma est un gaz partiellement ou totalement ionisé, suffisamment dense pour être quasi-neutre. Ce type de milieu constitue le quatrième état de la matière après l'état solide, l'état liquide et l'état gazeux. Un plasma est constitué de particules neutres comme atomes, molécules, radicaux libres et d'ions positifs ou négatifs (particules ayant respectivement perdu ou capté des électrons). Il existe aussi dans un plasma des atomes ou molécules dits "excités" qui peuvent se désexciter en émettant de la lumière. Cela permet à ce gaz d'être émetteur de lumière visible ou invisible (rayons X, ultraviolet[UV], infrarouge[IR]...)[5]. On distingue deux types de plasmas :

- Les plasmas chauds qui sont fortement ionisés.
- Les plasmas froids caractérisés par des degrés d'ionisation beaucoup plus faibles (inférieur à 10^{-2})[3].

1.1.1 Densité électronique

Tout gaz ayant une équation thermodynamique à un temps présente une certaine densité d'électrons libres, qu'on peut le considérer comme plasma, La densité du plasma est le nombre de particules (électrons, ions, ou neutres) par unité de volume.

La neutralité du plasma impose l'égalité suivante [6] :

$$n_{i+} = n_e + n_{i-} \quad (1.1)$$

avec n_{i+} densité d'ions positifs, n_e densité électronique et n_{i-} densité d'ions négatifs. Le degré d'ionisation d'un plasma est un paramètre qui relie les densités électronique, ionique et neutres par la relation suivante :

$$\alpha = \frac{n_e}{n_e + n_0} \quad (1.2)$$

avec :

n_e : c'est la densité des électrons

n_0 : c'est la densité des neutres

1.1.2 Température Électronique

La Température électronique à basse pression est très différente de celle des neutres et des ions ; puisque du fait de leur faible masse relativement aux ions et neutres. Les plasmas froids sont caractérisés par un degré d'ionisation extrêmement faible, les électrons ont une Température très élevée, tandis que les autres espèces ont une température proche de la température ambiante. Ces plasmas ne sont pas à l'équilibre thermodynamique[7].

$$\frac{1}{2}m_j v_{qj}^2 = \frac{3}{2}k_B T_j \quad (1.3)$$

où l'indice j désigne la particule considérée, v_{qj} désigne la vitesse quadratique moyenne de la particule j , m_j la masse, k_B la constante de Boltzmann et T_j la température en Kelvin.

1.1.3 La Fréquence d'oscillation

Les oscillations des charges électriques peuvent être comprises grâce au raisonnement suivant : dans un plasma initialement neutre, si les électrons d'une zone du plasma sont déplacés sous l'effet d'un champ électrique, alors les ions de cette zone, n'ayant que peu bougé du fait de leur masse importante, vont exercer sur ces électrons une force de Coulomb attractive. Ceux-ci vont donc revenir vers leur position initiale, on peut montrer que ces oscillations se produisent à une pulsation sinusoidal de pulsation ω_{pe} à faible Température électronique (modèle classique), à la pulsation plasma suivante[5].

$$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{n_e q_e^2}{m_e \epsilon_0}} \quad (1.4)$$

1.1.4 Libre Parcours Moyen

Le libre parcours moyen est la distance moyenne parcourue par une particule sans faire de collision. Il est donné par l'équation suivante [6] :

$$\lambda_{ij} = \frac{1}{n_j \sigma_{ij}} \quad (1.5)$$

λ_{ij} libre parcours moyen parcourue par la particule. n_j densité de particules. σ_{ij} section efficace de collision entre des particule i et j.

1.1.5 Longueur De Debye

La longueur de Debye donne l'échelle de longueur sur laquelle les électrons écrantent le champ électrostatique dans un plasma ou un autres conducteur[8].

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 K_B T_e}{n_e e^2}} \quad (1.6)$$

1.1.6 Fréquence Plasma

Si un volume élémentaire du plasma est écarté de sa neutralité électrique local (par exemple déplacement des électrons d'un volume élémentaire à un autre), ce volume élémentaire revient à son neutralité en oscillant au voisinage de la fréquence plasma[8].

$$f_p = \frac{\omega_p}{2\pi} \quad (1.7)$$

1.2 Les différents types de décharges plasmas

Il existe de deux types de plasmas : **naturels** (étoiles, les éclaires), et **artificiel** le réacteur ITER (plasma chaud)ou disjoncteurs, l'éclairage, les décharges dans les gaz (plasma froids), . Les réacteurs plasmas doivent répondre à des exigences sans cesse accrues , il existe plusieurs types de sources plasmas comme : ICP , CCP , RIE ,.... pour toutes ces machines, on retrouve des élément communs tels que le pompage, l'injection de gaz.

1.2.1 Les décharges micro-ondes

Les techniques plasmas micro-ondes ont recours à des générateurs délivrant l'énergie sous la forme de pulses haute tension hyperfréquence (généralement 2.46 GHz). La puissance impulsinnelle peut aller de quelques watts à quelques kilowatts dans le cas d'un générateur micro-onde de laboratoire, Les plasmas micro-ondes peuvent être obtenus à des pressions allant du mTorr à la pression atmosphérique[9].

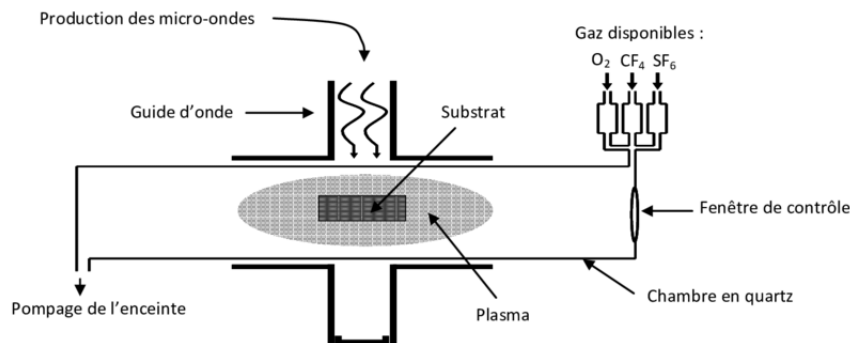


FIGURE 1.1 – présentation d'une décharges micro-onde[7]

1.2.2 Les décharges à courant continu

L'application d'une tension continue entre deux électrodes d'un tube à gaz reste une méthode classique pour réaliser une décharge[10]. On utilise, par exemple, un tube de verre de quelques centimètres de diamètre, on connecte le une source de tension continue V muni d'électrodes à ses deux extrémités, la distance entre les électrodes est notée « d ». On considère le cas où les électrodes sont des plaques métalliques parallèles et on le remplit d'un gaz sous une pression moyenne, de l'ordre de 1 Torr.

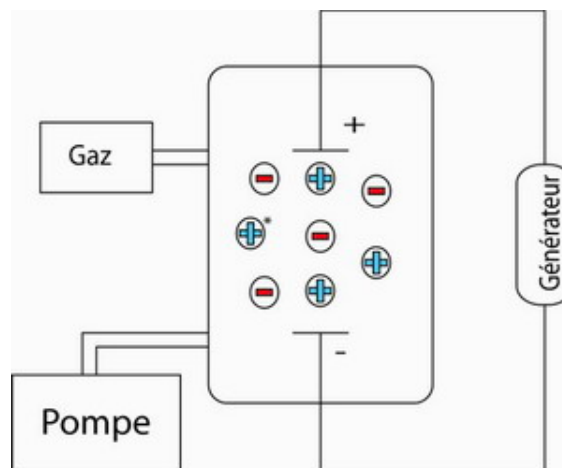


FIGURE 1.2 – décharges à courant continu[8]

1.2.3 Les décharges radio fréquence(RF)

Les décharges plasmas radiofréquences (figure1.3)[11], sont massivement employées dans la micro et nanotechnologie. Ces décharges RF fonctionnent avec une alimentation électrique sinusoïdale dont la fréquence d'excitation est typiquement comprise entre [1- 200 MHz], en particulier à 13,56MHz ou ses harmoniques, c'est la fréquence autorisées par les autorités internationales des télécommunications qui est utilisé pour des applications industrielles et médicales [12],[13]. Le domaine radiofréquence est intéressant car il se situe entre les deux fréquences propres du plasma

à savoir la fréquence plasma ionique et la fréquence plasma électronique, de sorte que :

- Les électrons suivent le champ instantané.
- Les ions ne suivent que le champ électrique moyen.

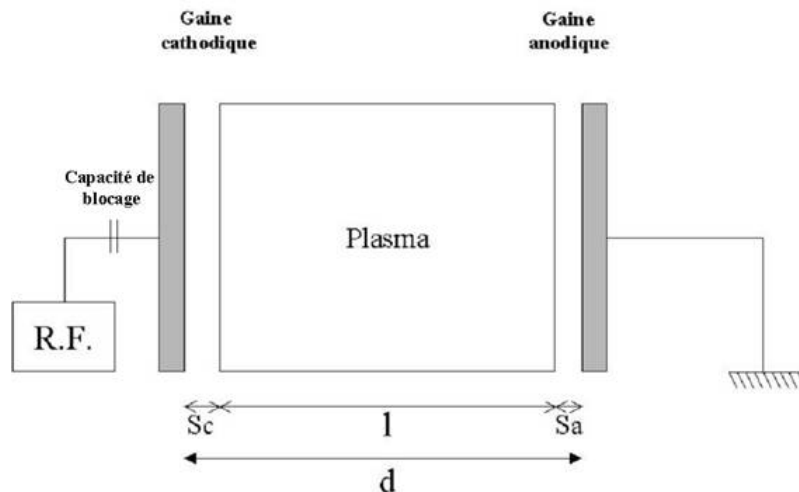


FIGURE 1.3 – Représentation d'une décharge radiofréquence [9].

Il existe 2 types de décharge plasma radio fréquence, Ils diffèrent par le mode de couplage de l'énergie au gaz, ainsi que par la fréquence d'excitation qui varie du continu au domaine micro-onde :

1.2.3.1 Décharge RF inductif (ICP)

Un réacteur inductif (ICP) où plasma couplé par transformateur (TCP) dans lequel l'énergie est alimentée par des courants électrique produits par induction électromagnétique, permet de découpler le flux et l'énergie des ions. le plasma est obtenu par l'excitation d'une onde évanescente par l'intermédiaire d'une antenne séparée du plasma, l'énergie est transmise aux électrons, de la décharge à travers une électrode à partir d'un champ électromagnétique RF [14].

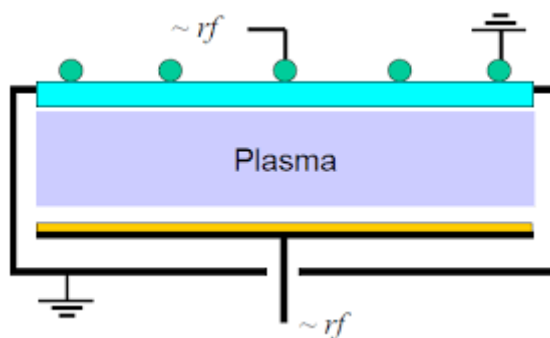


FIGURE 1.4 – Réacteur radiofréquence à couplage inductif [12].

1.2.3.2 Décharge RF capacitif (CCP)

Les réacteurs de type capacitif sont les plus utilisés comme sources de plasma industriel, ils sont constitués de deux électrodes conductrices et parallèles séparées par distance en (cm)[15]. Disposées dans une enceinte à vide, le substrat placé sur l'électrode de puissance est alimenté par une source de tension RF (en général 13.56Mhz) sera bombardé par les ions énergétiques provenant du plasma.

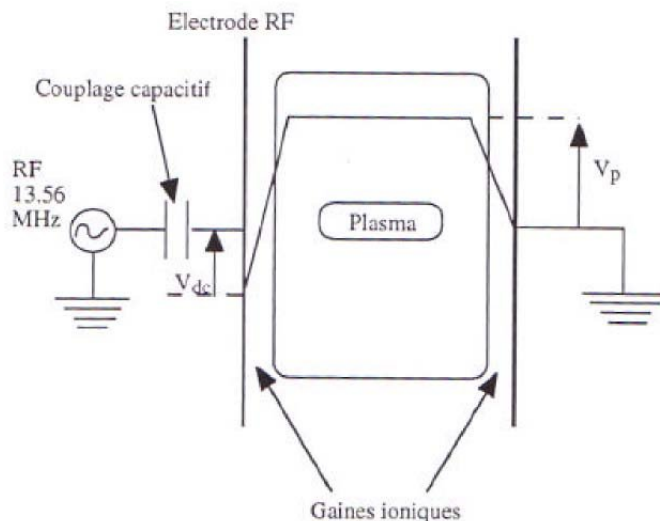


FIGURE 1.5 – Décharge Radiofréquence à couplage capacitif [13].

1.3 Les décharges plasmas RF à couplage capacitif

1.3.1 Mode de fonctionnement

Les décharges plasma de type capacitif sont généralement constituées de deux plaques parallèles, où on injecte un gaz d'argon dans une enceinte à vide. Si on alimente l'une des électrodes (de puissance) à une source RF qui est placée en série avec une capacité de blocage, tandis que l'autre électrode est reliée à la masse on génère un champ électrique. Les régions qui composent la décharge capacitif est le plasma et les gaines de charge d'espace positive. Ces gaines sont créées par la perte des électrons très rapides qui vont être perdus sur les parois du réacteur. Le plasma étant globalement neutre, son potentiel moyen doit être supérieur au potentiel des gaines afin de retenir les électrons, à l'intérieur de la gaine, il se développe un champ électrique qui est dirigé vers l'électrode, cela va conduire à un confinement des électrons dans le plasma et à une accélération des ions positifs vers les surfaces, Les ions vont alors bombarder les électrodes d'une énergie qui va dépendre de la valeur du champ électrique, cela est une des conséquences de la chute de potentiel dite d'auto polarisation[3].

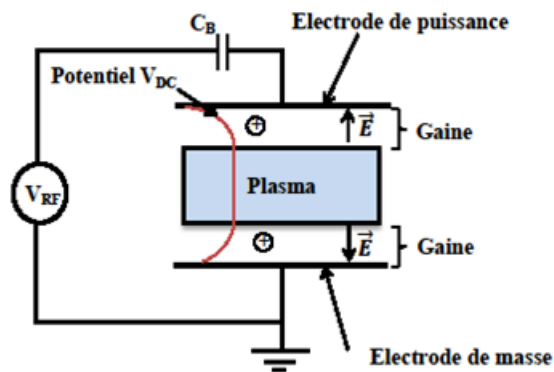


FIGURE 1.6 – Schéma simplifié d'une décharge Radiofréquence à couplage capacitif [3].

1.3.2 Potentiel plasma

La distribution des charges dans l'ensemble du plasma donne lieu à une évolution spatiale du potentiel, la figure ci-dessous représente l'évolution spatiale du potentiel dans un espace inter-électrode. Cet espace se divise en trois parties ou "Bulk" et les deux gaines électrostatiques. Dans les gaines, il y a une chute du potentiel qui va varier dans le temps. Dans la région plasma règne un potentiel stationnaire dit potentiel plasma [6].

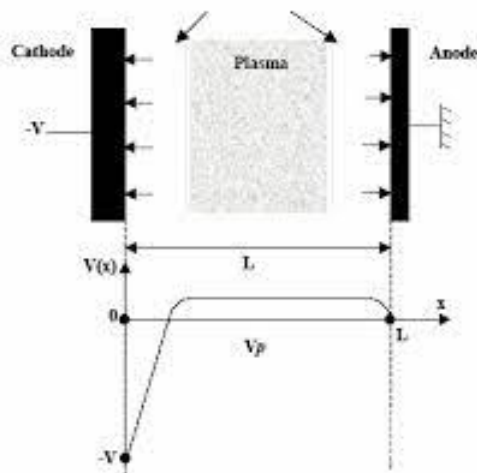


FIGURE 1.7 – Potentiel plasma

1.3.3 Formation des gaines

Ces gaines correspondent à des régions où la charge d'espace est nettement positive. Elles sont situées entre la plus grande partie de décharge (le plasma et les électrodes). Les oscillations du nuage électronique déterminent l'épaisseur de la gaine

instantanément à proximité de chaque électrode. Les gaines se forment autour d'un plasma en effet les électrons vont frapper plus souvent les murs de la chambre ou les électrodes et par conséquent seront retirées du plasma. Les ions laissés derrière vont donc créer une accumulation de charges positives autour du plasma qui va résister à la perte de plus d'électrons, une zone de charge d'espace est ainsi créée, elle introduit un champ électrique qui forme une barrière de potentiel [8].

1.3.4 Tension d'auto polarisation

Considérons le schéma de la figure 1.8 qui décrit la distribution du potentiel d'auto polarisation entre les électrodes pour une décharge RF à couplage capacitif. La surface de l'électrode de puissance alimentée par le potentiel RF est plus petite par rapport à celle de l'électrode reliée à la masse. Une capacité de blocage est placée en série avec un générateur RF de sorte qu'aucun courant de conduction ne s'écoule de l'électrode vers le plasma et vice versa. Lorsque la chute de potentiel de gaine est importante, des électrons suffisamment énergétiques sortent du plasma, ils sont accélérés vers l'électrode et s'accumulent sur la capacité de blocage. Lorsque la chute de potentiel dans la gaine diminue, les électrons sont repoussés dans le plasma alors que les ions affluent sur l'électrode. La mobilité entre électrons et ions étant très différente, la charge accumulée sur la capacité croît jusqu'à l'égalité des flux d'espèces chargées à travers les gaines. Ainsi un potentiel continu et négatif dite "tension d'auto polarisation", V_{DC} , apparaît à la l'électrode de puissance et s'ajoute à la tension radio fréquence[16].

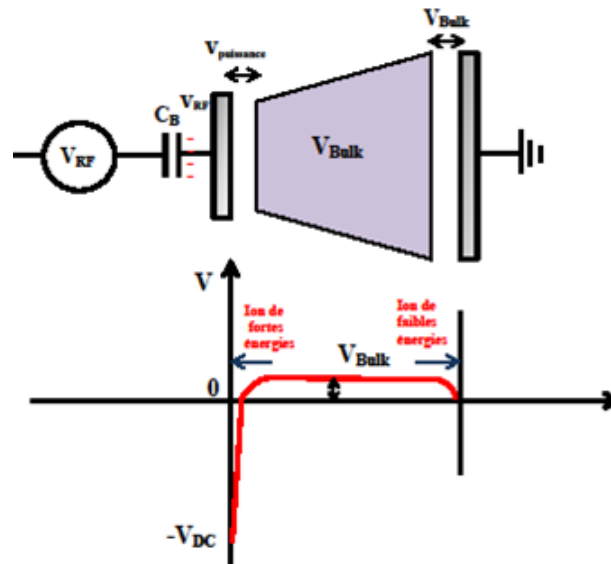


FIGURE 1.8 – Distribution du potentiel plasma pour une décharge RF-CCP [3].

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions simples de la physique des plasmas en général, et les différents types de décharges.

Chapitre 2

Méthode PIC-MCC et Modélisation

Introduction

La simulation particle-in-cell (PIC) est un outil d'étude majeur pour les plasmas, il possède un certain nombre d'avantages comme la description cinétique d'un plasma de grande dimension, la capacité d'intégrer les interactions plasma-surface.

Les simulations PIC sont utilisées pratiquement dans toutes les branches des laboratoires des physiques des plasmas. Les premières approches particulières se développèrent dans les années 1950 par *Buneman* [17] et *Dawson* [18], ils simulèrent le mouvement de 100-1000 particules, y compris les interactions entre elles. La méthode PIC consiste à représenter le plasma sous la forme d'un grand nombre de particules numérique dite (super-particule), chacune représente une collection des milliers de particules réelles, ces macro particules sont placées et simulé dans les différentes cellules du maillage. À présent les codes PIC peuvent procéder à la simulation de plus de 10^{10} particules, les codes PIC dites "auto-cohérents", pour lesquels à chaque instant champs et distributions de particules sont en équilibre, ont été standardisés par *Birdsall* et *Langdon*[19], *Hockney* et *Eastwood*[20].

2.1 Schéma d'une simulation PIC-MCC

Les méthodes PIC permettent de décrire l'évolution de particules chargées dans un champ électromagnétique qui sont déplacés selon les équations du mouvement de Newton dues à la force de Lorentz :

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{v} \tag{2.1}$$

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{q}{m}(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \tag{2.2}$$

où \vec{E} est le champ électrique et \vec{B} le champ magnétique, ils sont calculés sur la maille à l'aide des équations de Maxwell.

Le champ électrostatique est calculé à partir de la résolution de l'équation de Poisson :

$$\nabla^2 \phi = -\frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (2.3)$$

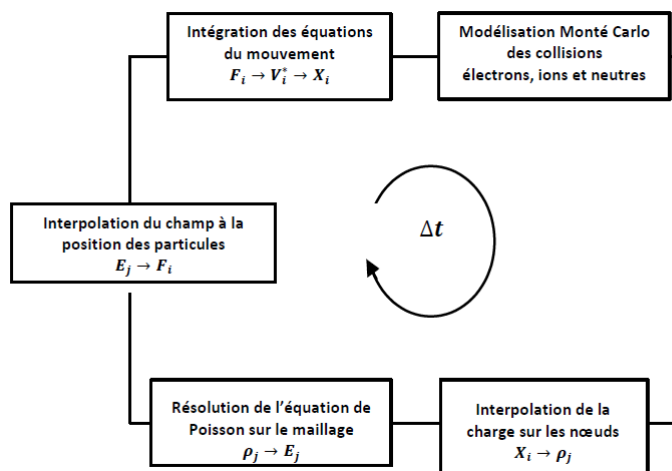


FIGURE 2.1 – Organigramme d'une simulation PIC-MCC.

Les différentes étapes d'une itération PIC-MCC sont représentées dans la figure (3.2), elle se compose de la succession des opérations suivantes :

1. Initialisation des particules, des densités de charge ρ_j .
2. Les champs électriques sont calculés à partir des équations de Maxwell sur le maillage.
3. Après interpolation de ces champs sur les positions des particules, on en déduit la force appliquée. Et on obtient leurs nouvelles vitesses et leurs nouvelles positions.
4. La densité de charge, sont obtenues par projection à partir de la connaissance des positions et des vitesses de toutes les particules. On revient ensuite au calcul des champs.

2.2 Description du code xpdp2

xpdp2 (*2 dimensional planar electrostatic device*), est un code en langage C++ qui simule le plasma couplé avec un circuit externe, ce code opère en deux dimensions de coordonnées spatiales (x, y) et de vitesses (v_x, v_y, v_z) , dont les caractéristiques tels que les super particules et le champ électrostatique sont spécifiés par l'utilisateur en utilisant un fichier d'entrée (figure 2.2)

```

argon.inp: Argon RF discharge

-nsp---ncx---ncy---nc2p---dt[s]---xlength[m]---ylength[m]---zlength[m]---epsilon-r-
  2      200   600   5e4  3.60089e-11 0.03      0.1      0.1      1.0

-lhs---length[m]---dc[V|Amp]---ac[V|Amp]---f0[Hz]---theta0[D]---extC[F]---gapsize[nc]-
  1      0.1      0.0      500      13.56e6      0.0      1.e-10      0

-rhs---length[m]---dc[V|Amp]---ac[V|Amp]---f0[Hz]---theta0[D]---extC[F]---gapsize[nc]-
  1      0.1      0.0      0.0      0.0      0.0      10.0      0

-rhocback[C/m^3]---bmag[T]---btheta[D]---bphi[D]---nfft---sflag---tol_pois---strc_max-
  0.0      0.0      0.0      0.0      2048      1      1e-6      0

-e_collisional--i_collisional--ion species--Gpressure[Torr]--GTemp[eV]--.....
  1          2          2          0.005      0.03
    
```

FIGURE 2.2 – Fichier d’entrée.

La simulation procède en temps réel et on visualise les divers diagnostics spécifiés à chaque pas de temps (voir figure 2.3) :

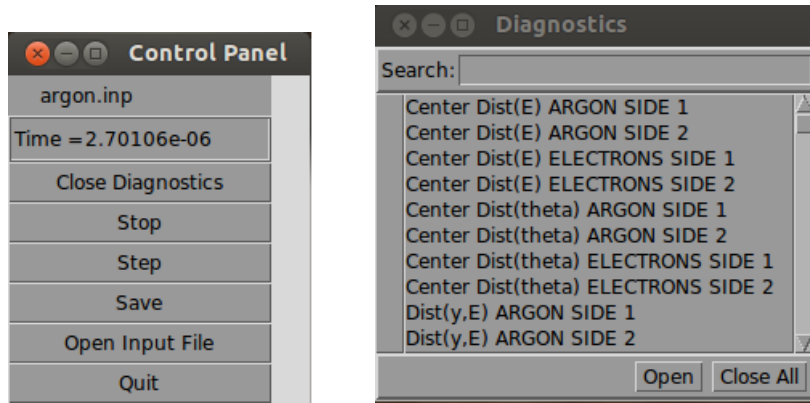


FIGURE 2.3 – Interface graphique du programme xpdp2.

On définit parmi les paramètres les plus important :

nsp : nombre des espèces.

ncx : nombre des cellules suivant la direction x, la largeur de la cellule est calculée par :

$$\Delta x = \frac{\text{longueur}(x)}{ncx}$$

$nc2p$: la proportion entre les particules simulées sur les particules réelles. elle est définie par la relation suivante :

$$N = \frac{N_{initn. aire. Longueur}(x)}{nc2p}$$

dt : le pas de temps(s).

$x\ length, y\ length$: la longueur suivant l’axe (x) et (y) respectivement en (m).

ac : source de courant alternatif (V ou A).

$theta0$: la phase de la source (Degré).

$extc$: capacité de blocage (F).

$G_{pressure}$: pression du gaz (Torr).

G_{temp} : température du gaz (eV).

q : charge de l'espèce (C).

m : masse de l'espèce (kg).

N_{init} : Densité initiale (m^{-3}).

2.3 Condition de stabilité

Le code utilisé dans la simulation PIC demande un choix dans la taille des mailles, que l'on note Δx et Δy , ainsi que le pas de temps Δt de la simulation ; ces paramètres jouent sur la stabilité ainsi que sur la vitesse de convergence du code numérique, plus les valeurs sont petites et plus le temps de calcul augmente. On peut montrer, en raisonnant sur un simple oscillateur harmonique de pulsation ω_0 [21], que le schéma classique d'avancement des superparticules dit de "saute mouton" est stable lorsque :

$$\omega_0 \Delta t < 2$$

Une condition assurant d'une part la stabilité du schéma pour des oscillations simples telles que les oscillations plasmas est :

$$\Delta t < 0.2\omega_p^{-1} \quad (2.4)$$

Où ω_p est la pulsation plasma :

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n e^2}{\varepsilon_0 m}}$$

D'autre part pour le critère spatial, la taille des mailles Δx (et Δy) doit vérifier la relation :

$$\Delta x < 3.4\lambda_D \quad (2.5)$$

Où λ_D est la longueur de Debye.

2.4 Modélisation physique

L'effet de l'asymétrie électrique ou le modèle (EAE) est proposée par Heil et Czarnecki [22, 23], pour l'étude d'une décharge capacitive à double fréquence (DF-CCP) dotée d'une géométrie asymétrique ou symétrique, en appliquant sur les gaines une fréquence fondamentale et son harmonique ce qui provoque un potentiel d'auto-polarisation entre les deux électrodes (figure 2.4). On ajoutant dans ce modèle l'effet de la capacité de blocage C_B via son potentiel v_c [24]

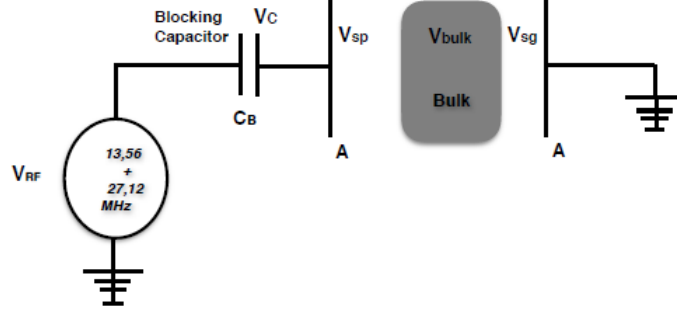


FIGURE 2.4 – Schéma de la décharge DF-CCP [3].

Le modèle est basé sur la résolution d'un circuit électrique équivalent typique à une décharge DF-CCP. Le circuit est constitué d'une source de tension (générateur RF) en série avec la capacité de blocage C_B . La décharge se compose de deux condensateurs non linéaires représentant les gaines adjacentes aux deux électrodes et d'une inductance (inertie d'électron) en série avec une résistance (collisions électron-neutre) représentant le plasma (ou Bulk, Le bilan des tensions normalisées décrivant la décharge RF sera :

$$\bar{V}_{RF}(t) = \bar{V}_c(t) + \bar{V}_{sp}(t) + \bar{V}_{Bulk}(t) + \bar{V}_{sg}(t) \quad (2.6)$$

Où $\bar{V}_c(t)$ est la chute tension de la capacité de blocage (C_B); $\bar{V}_{sp}(t)$ et $\bar{V}_{sg}(t)$ sont les chutes de tensions des deux électrodes de puissance et de masse respectivement. $\bar{V}_{RF}(t)$ la tension RF appliquée tel que $\bar{V}_{RF}(t) = \frac{\tilde{V}_{RF}(t)}{V_0}$ et V_0 la somme des amplitudes des harmoniques appliquées.

Quant à, $\bar{V}_{Bulk}(t)$, la chute de tension au centre du plasma est supposée négligeable par rapport aux différentes tensions impliquées dans l'équation (2.6).

La forme du signal RF appliqué sur l'électrode de puissance est présentée dans l'équation (2.7) où $f = 13.56\text{MHz}$ est la fréquence fondamentale, V_L et V_H sont les amplitudes associées à f (basse fréquence) et $2f$ (haute fréquence) respectivement. θ est l'angle de phase entre les deux formes du signal RF.

$$\tilde{V}_{RF}(t) = V_L \cos(2\pi ft + \theta) + V_H \cos(4\pi ft) \quad (2.7)$$

La figure 2.5 nous renseigne sur le comportement de la tension RF appliquée à la décharge pour une périodes RF en fonction du déphasage θ . On remarque que le profil de la courbe s'inverse de $\theta = 0^\circ$ à $\theta = 90^\circ$.

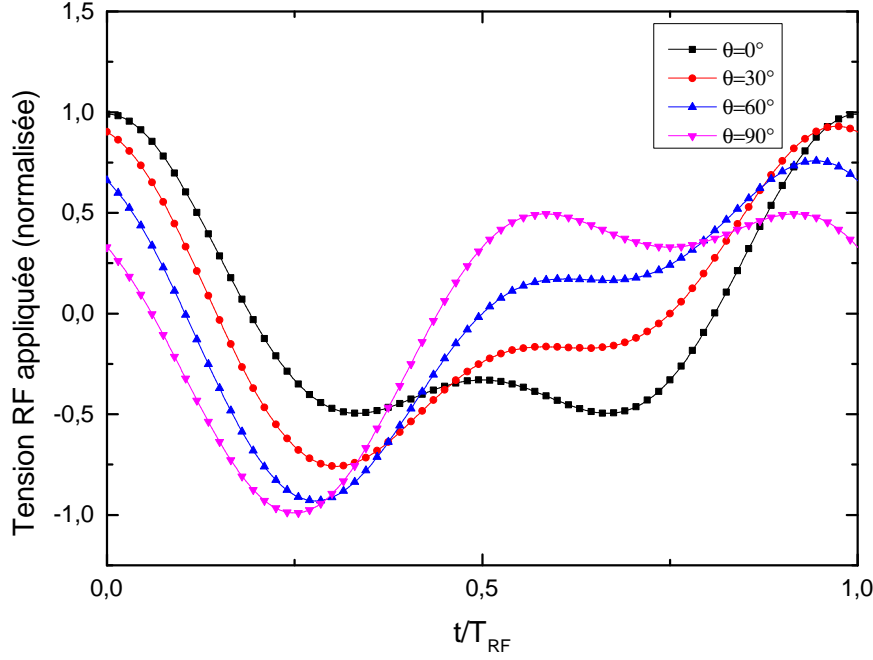


FIGURE 2.5 – $V(t) = 250 \cos(2\pi ft + \theta) + 250 \cos(4\pi ft)$ pour différentes valeurs de l'angle de phase θ pour 1 périodes RF ($2T_{RF}$)[3].

on suppose que les amplitudes V_L et V_H sont égales telles que $V_0 = V_L + V_H$, l'équation (2.7) devient :

$$\tilde{V}_{RF}(t) = \frac{V_0}{2} [\cos(2\pi ft + \theta) + \cos(4\pi ft)] \quad (2.8)$$

La résolution analytique de l'équation (2.8) a été proposée par *Heil*[22]. On définit $\varphi = 2\pi ft$ et on normalise par V_0 la tension appliquée V_{RF} , on a alors :

$$\bar{V}(\varphi) = \frac{1}{2} \cos(\varphi + \theta) + \frac{1}{2} \cos(2\varphi) \quad (2.9)$$

La tension totale à travers la décharge sera :

$$\bar{V} = \bar{\eta} + \frac{1}{2} \cos(\varphi + \theta) + \frac{1}{2} \cos(2\varphi) \quad (2.10)$$

$\bar{\eta}$ représente physiquement la tension d'auto polarisation.

Les extremums de l'équation (2.10) sont calculés en dérivant par rapport à φ :

$$\sin(\varphi_m + \theta) + 2 \sin(2\varphi_m) = 0 \quad (2.11)$$

Le résultat de l'équation (2.11) est de la forme :

$$\theta = \begin{cases} -\varphi_m + \arcsin(-2 \sin(2\varphi_m)) \\ -\varphi_m - \arcsin(-2 \sin(2\varphi_m)) \pm \pi \end{cases} \quad (2.12)$$

La tension maximale est :

$$\phi_{m1} = \begin{cases} \frac{1}{2}(1 + \cos \theta), & -\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (2.13)$$

Et la tension minimale est :

$$\phi_{m2} = \begin{cases} \frac{1}{2}(-1 - \sin \theta), & 0 \leq \theta \leq \pi \end{cases} \quad (2.14)$$

Chapitre 3

Résultats et Discussions

Introduction

On décrit dans ce chapitre les conditions de simulation d'une décharge plasma d'argon double fréquence à couplage capacitive confiné entre deux électrodes plates et parallèles, on présente par la suite les différents résultats obtenus par la simulation Particle In Cell (PIC) et cela pour différents paramètres physiques.

3.1 Conditions de Simulation

La figure(2.4) représente le schéma de la simulation de notre décharge DF-CCP, où le plasma est généré dans un gaz d'argon placé entre deux électrodes plates et parallèles distant de $3cm$, l'électrode de puissance est situé à $x = 0cm$, relié en série avec la capacité de blocage et la source de tension double fréquence ($13.56MHz$ et $27.12MHz$), alors que celui de masse est à $x = 3cm$.

Notre simulation est réalisée par le code électrostatique XPDP2 opéré en coordonnées spatiale $2D$ développé par Vahedi[25] et Verboncoeur [26], en prenant en considération le module collisionnel de Monté Carlo, le Domaine de simulation est calculé sur des cellules 180×600 cellules, tel que la distance entre deux nœuds successifs c'est à dire Δx et Δy est inférieur à $0.8\lambda_D$, le cycle RF est résolu pour un pas de temps $dt = 3.610^{-11}s$.

Les résultats obtenus sont moyennés sur un cycle RF pour un état stationnaire ($t \sim 80\mu s$).

Le tableau (3.1) résume les paramètres d'entrés appliqués au code de la simulation :

gaz	Argon
Température du gaz	0.03 (eV)
Pression	[10,20] (mTorr)
Fréquence RF	[13.56, 27.12] (Mhz)
Distance inter électrode	3 (cm)
Tension d'entrée	[500, 1000] (Volt)
Angle de phase (θ)	[0,90] ($^\circ$)
Capacité	[75,500] (pF)
Nombres de cellules	28×10^3
Macro particules	85 (par cellule)

TABLEAU 3.1 – Paramètres de la décharge du gaz Ar

3.2 Effet de déphasage

Les figures (3.1) et (3.2) représentent les fonctions de distributions des énergies ioniques à l'électrode de puissance et celle à la masse respectivement en fonction de l'angle de phase, on remarque que l'effet de déphasage (θ°) sur les énergies de bombardement est très significatif, ces énergies traversant les gaines vont triplées de valeurs pour $\theta = 0^\circ$ à $\theta = 90^\circ$. On remarque aussi que le flux ionique augmente dans le pic d'énergie maximale est cela par un facteur de 3, on constate par ailleurs un inversement des rôles des électrodes dans la gaine de masse qui s'explique par la tension d'auto polarisation, qui dépend de la tension d'entrée et par conséquent de l'angle de phase.

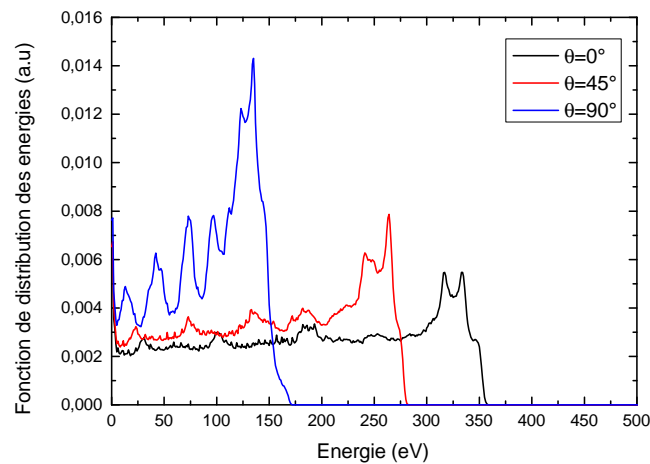


FIGURE 3.1 – Fonction de distribution ioniques à l'électrode de puissance pour différent angle de phase calculée par PIC pour ($V_0 = 500V$, $C_B = 500pF$).

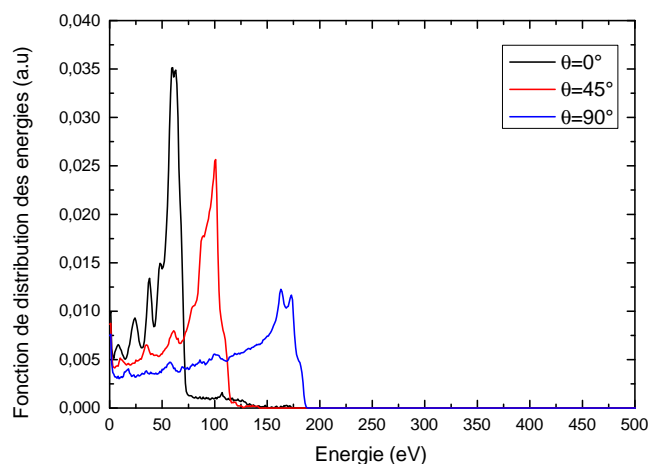
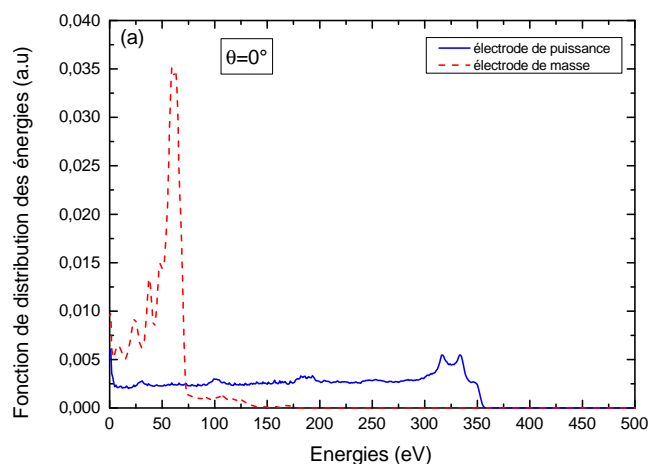


FIGURE 3.2 – Fonction de distribution ioniques à l'électrode de masse pour différent angle de phase calculée par PIC pour ($V_0 = 500V, C_B = 500pF$).

On définit sur les figures (3.3) de (a-c) les distributions des fonctions des énergies ioniques pour différents angle de phase sur les deux électrodes de puissance représenté (en bleu) et celui de masse (en rouge), on remarque qu'il y a un effet sur les énergies de bombardement ioniques dû à la variation de l'angle de phase, l'écart d'énergie entre les deux électrodes est plus important à $\theta = 0^\circ$ et diminue lorsque le déphasage augmente. cet écart n'est pas totalement inversé cela est dû à la géométrie du réacteur (géométrie asymétrique).



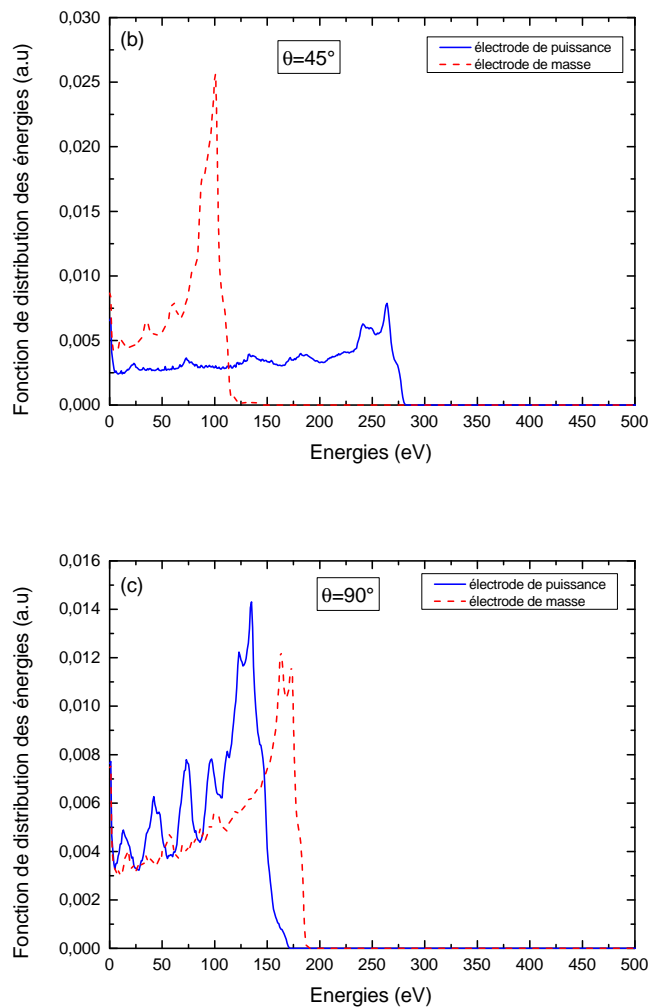


FIGURE 3.3 – Fonction de distribution ioniques des électrodes de puissance et de masse à différents déphasage.

On trace sur la figure (3.4) la distribution spatiale des densités d'argon au centre de la de la décharge pour deux déphasage ($\theta = 0^\circ$ et $\theta = 90^\circ$), on constate qu'à $\theta = 0^\circ$ la gaine de puissance est plus élargie traduisant une importante différence de potentielle par rapport celle de masse, cela s'explique par l'effet de l'asymétrie électrique par contre à $\theta = 90^\circ$ l'écart diminue par l'inversement des rôles des électrodes.

la figure (3.5) exprime le profil de potentiel calculé en fonction de la distance entre les deux électrodes (puissance et de masse) pour différents angle de phase, on remarque que la valeur de la tension d'auto-polarisation est de $-210V$ pour $\theta = 0^\circ$ à $+25V$ pour $\theta = 90^\circ$, on remarque aussi que la chute de potentiel est nulle au niveau du plasma (à cause de la neutralité électrique) et augmente avec l'angle de phase dans la gaine de masse.

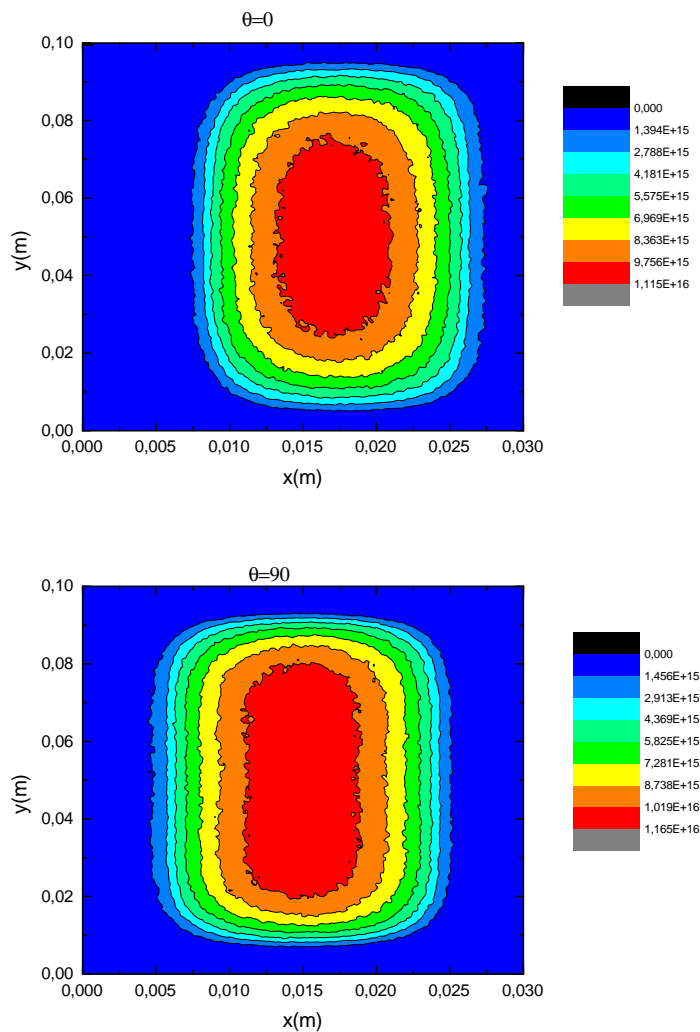


FIGURE 3.4 – Distribution spatiale des densités d’argon au centre de la décharge calculée par la simulation PIC.

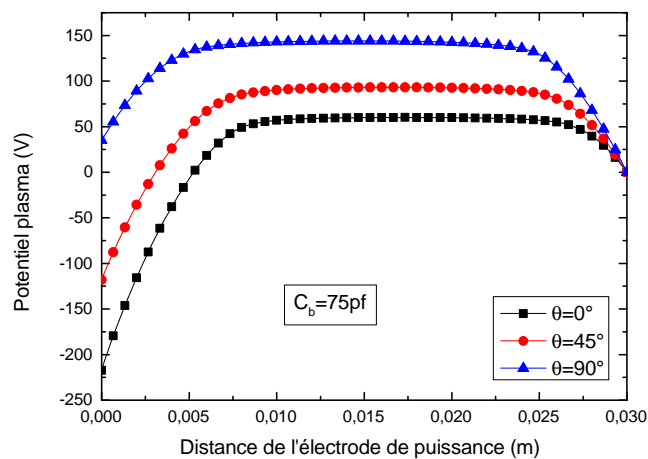


FIGURE 3.5 – Profil de potentiel pour différents déphasages ($V_0 = 500V$, $C_b = 75pF$).

3.3 Effet de la capacité de blocage

Les figures (3.6) et (3.7) représentent l'effet de la capacité de blocage sur la distribution des énergies de bombardement ioniques à l'électrode de puissance et de masse respectivement. Cette simulation est réalisée pour un angle de phase $\theta = 0^\circ$, on constate que les énergies ioniques croît avec la capacité dans la gaine de puissance qui s'explique par l'augmentation du potentiel d'auto-polarisation qui augmente avec la capacité, par contre la variation de la capacité de blocage n'a aucun effet sur l'autre électrode (de masse) qui est relié à la terre.

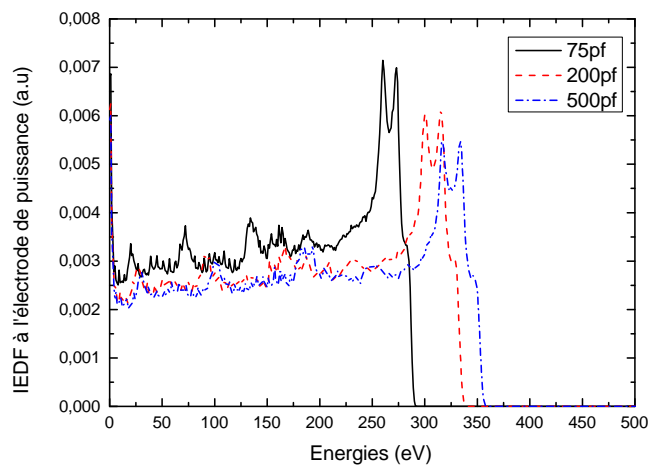


FIGURE 3.6 – Fonction de distribution ioniques sur l'électrode de puissance pour différentes capacités ($V_0 = 500V$, $\theta = 0^\circ$).

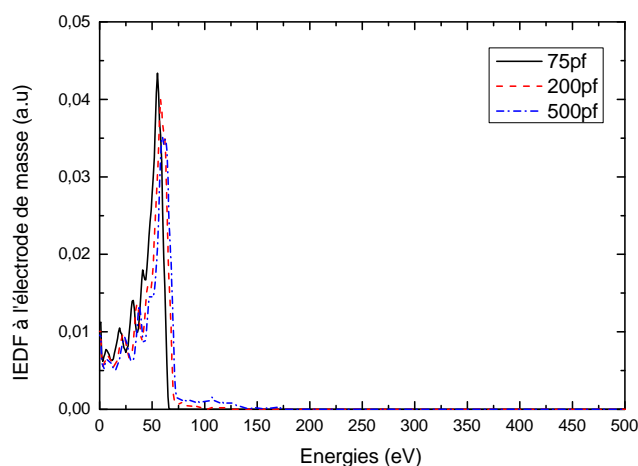


FIGURE 3.7 – Fonction de distribution ioniques sur l'électrode de masse pour différentes capacités ($V_0 = 500V$, $\theta = 0^\circ$).

La distribution spatiale du profil de potentiel en fonction de la distance inter élec-

trode obtenu par la simulation PIC est exprimé dans la figure (3.8) pour différentes capacités, on remarque une importante chute de potentiel sur la gaine de puissance pour des capacités plus grande, par contre la chute de potentiel est identique au niveau de la gaine adjacente à l'électrode de masse et nulle dans le bulk.

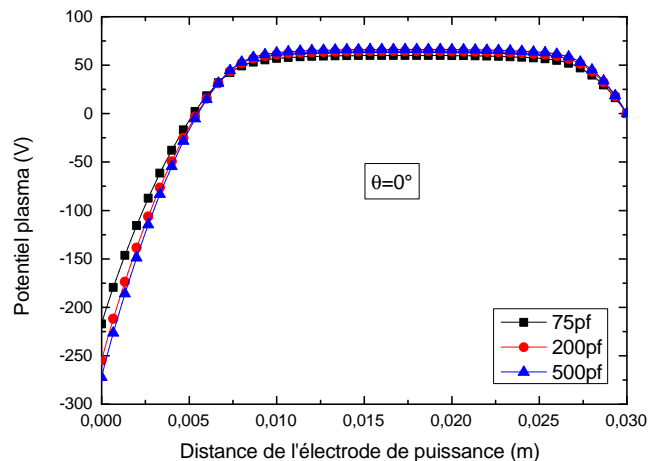


FIGURE 3.8 – Profil de potentiel en fonction de la distance inter électrode pour différentes capacités.

3.4 Effet de la pression

Les figures (3.9) et (3.10) illustrent la distribution des énergies de bombardement ioniques sur l'électrode de puissance et de masse respectivement en fonctions des pressions, on remarque que la variation de la pression à une effet sur les énergies ioniques, la population du pic d'énergie maximale dans la gaine de puissance est plus importante pour des pressions inférieures.

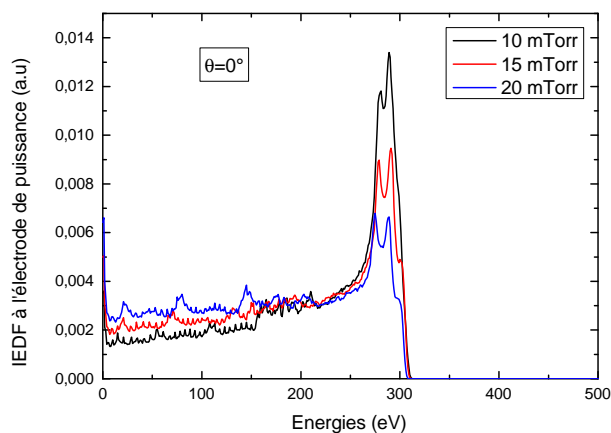


FIGURE 3.9 – Fonction de distribution des énergies ioniques sur l'électrode de puissance à différentes pressions.

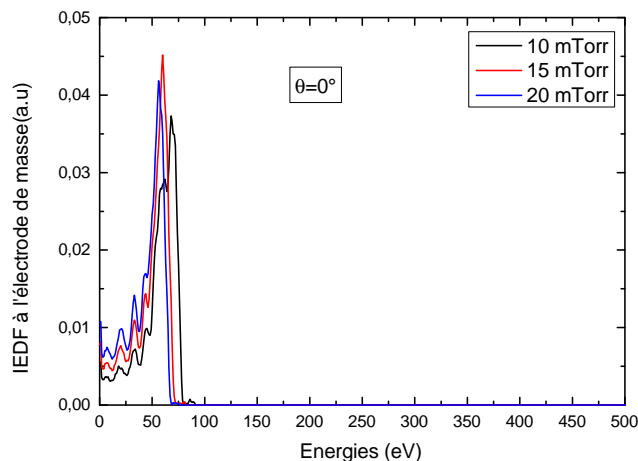


FIGURE 3.10 – Fonction de distribution des énergies ioniques sur l'électrode de masse à différentes pressions.

La figure (3.11) exprime le profil de densité des ions d'argon pour différentes pressions allant de (10 mTorr à 20 mTorr) au centre de la décharge calculé par la simulation PIC-MCC. On constate que l'augmentation de la pression conduit à une augmentation de la densité du plasma, elle est maximale au centre du plasma, en effet l'augmentation de la pression entraîne des collisions ionisantes plus importantes entre les particules dans le Bulk. On note aussi que l'expansion de la gaine varie en fonction de la pression, ceci s'explique par la variation du champ électrique dans les gaines de puissance et de masse avec la pression.

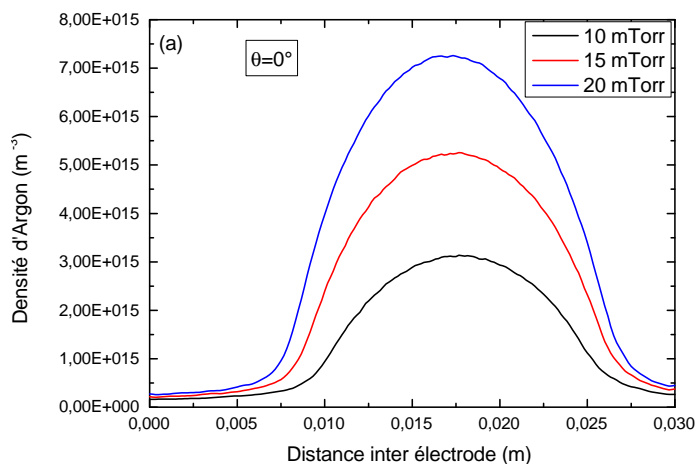


FIGURE 3.11 – Le profil de la densité d'Argon en fonction de la distance inter électrode pour différentes pressions.

3.5 Effet de la tension appliquée et du potentiel d'auto-polarisation

La figure (3.12) représente la fonction de distribution des énergies ioniques sur l'électrode de puissance et de masse pour trois tensions (500v, 650v et 1000v) respectivement. on remarque que le flux ionique et par conséquent les énergies bombardant les électrodes augmentent avec la tension RF, cela est dû a la tension d'auto polarisation qui augmente avec la tension V_{RF} .

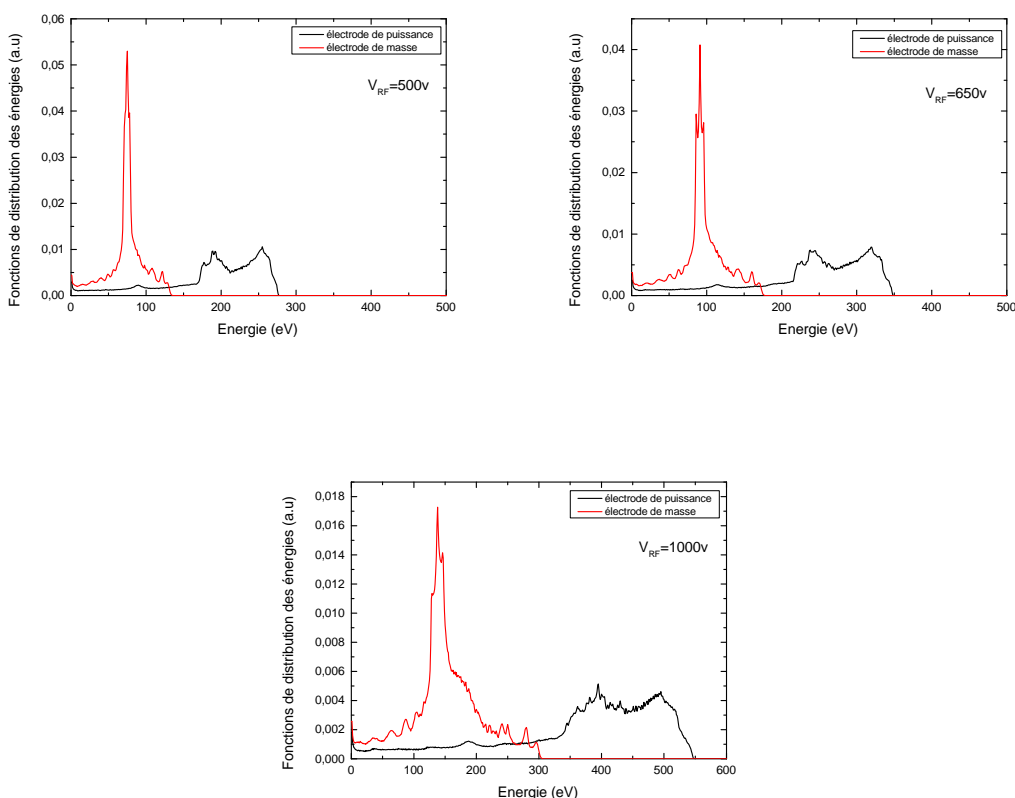


FIGURE 3.12 – Fonction de distribution des énergies ioniques à différentes tensions d'entrées.

Les figures (3.13) et (3.14) représentent le potentiel d'auto polarisation (V_{DC}) en fonction de la capacité (C_b) et de l'angle de phase (θ) respectivement. Ces figures montrent que C_b et θ contrôlent le paramètre du plasma (V_{DC})

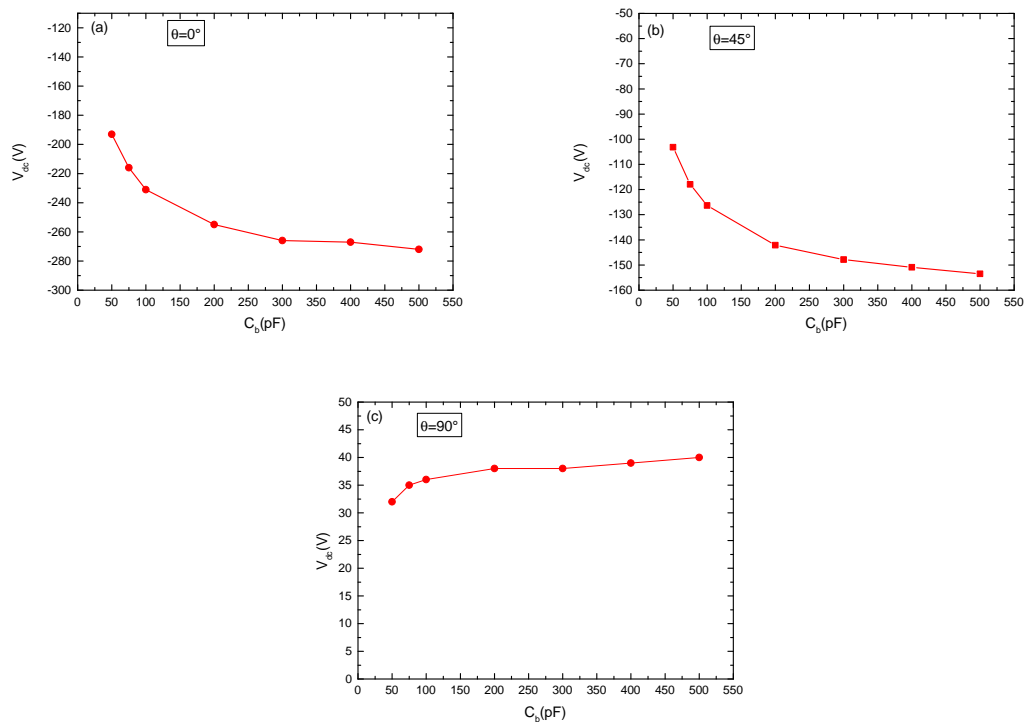


FIGURE 3.13 – Tension d’auto polarisation en fonction de la capacité de blocage.

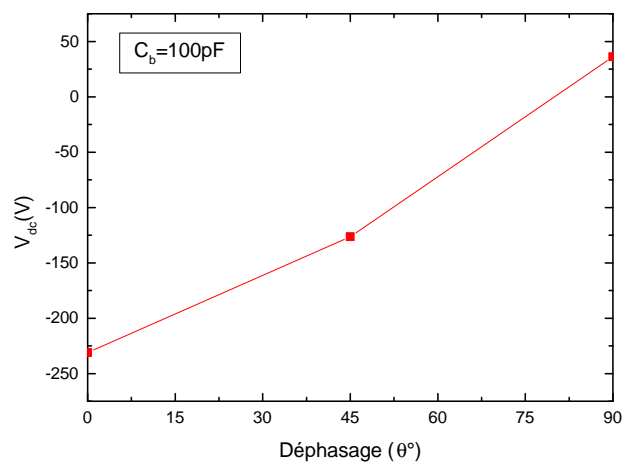


FIGURE 3.14 – Tension d’auto polarisation en fonction de déphasage.

Conclusion Générale

Les techniques plasma utilisées pour le traitement des surfaces deviennent de plus en plus utilisées comme alternative aux différents techniques classique jusqu'à présent. La décharge plasma à couplage capacitif est très utilisée en industrie pour la fabrication des composants semi conducteurs et des dépôts de couches minces. Les décharges plasmas RF à couplage capacitif (CCP), sont parmi les procédés les moins coûteux et les plus utilisées dans l'industrie de la micro-électronique[4], ces procédés exigent une bonne maîtrise sur les paramètres du plasma pour un contrôle optimale sur les énergies de bombardement ioniques.

Notre but dans ce mémoire à été de trouver un compromis qui pourrai nous permettre d'avoir un contrôle optimale sur l'énergie de bombardement des ions sur les électrodes. Ce travail a été consacré à l'étude de l'effet de la capacité de blocage, de l'angle de phase, la pression et la tension d'entrée, entre la fréquence fondamental 13,56 MHz et sa première harmonique 27,12 MHz pour une décharge plasma double fréquence à couplage capacitif.

Nos calculs montrent d'une part que la variation dans les paramètres du plasma ont un effet significatif sur la génération d'une tension d'auto-polarisation, et d'autre part sur la distribution des énergies de bombardement ioniques atteignant les surfaces des deux électrodes.

Bibliographie

- [1] Irving Langmuir. Oscillations in ionized gases. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 14(8) :627, 1928.
- [2] Michael A Lieberman and Alan J Lichtenberg. *Principles of plasma discharges and materials processing*. John Wiley & Sons, 2005.
- [3] Arslane.Boudghene Stambouli. *Étude des conditions physiques d'une décharge DF-CCP pour l'obtention de couches minces*. PhD thesis, 2018.
- [4] Lewi Tonks and Irving Langmuir. Note on" oscillations in ionized gases". *Physical Review*, 33(6) :990, 1929.
- [5] Mario Capitelli and J Norman Bardsley. *Nonequilibrium processes in partially ionized gases*, volume 220. Springer Science & Business Media, 2012.
- [6] Isabelle Savin de Larclause. *Dépôt organosilicic par plasma froid basse pression et pression atmosphérique sur substrats microstructurés*. PhD thesis, 2008.
- [7] Hanene Bahouh. *Modèle fluide d'une décharge plasma radiofréquence*. 2014.
- [8] Djilali Benyoucef. *Modélisation particulière et multidimensionnelle des décharges hors équilibre à basse pression excitées par champs électromagnétiques*. PhD thesis, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2011.
- [9] Abderrahmane Mraïhi. *Réalisation, caractérisation et bilan énergétique de réacteurs corona mono et multi-pointes dans l'air à la pression atmosphérique pour application à la décontamination*. PhD thesis, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2012.
- [10] Anne-Marie Pointu, Jérôme Perrin, and Jacques Jolly. Plasmas froids de décharge : Propriétés électriques. *Techniques de l'ingénieur. Génie électrique*, 4(D2830) :1–21, 1998.
- [11] Abdelkader BELFEDAL. *Etude des propriétés structurales et optoélectroniques des semiconducteurs amorphes (a-Ge : H, a-SiGe : H) déposés par PECVD et nanocristallins intrinsèques et dopés (nc-Si : H) préparés par pulvérisation cathodique magnétron radiofréquence (RFMS)*. PhD thesis, Université d'Oran1-Ahmed Ben Bella, 2008.
- [12] John Ernest Harry. *Introduction to Plasma Technology : Science, Engineering, and Applications*. John Wiley & Sons, 2013.
- [13] Alexander Fridman. *Plasma chemistry*. Cambridge university press, 2008.

- [14] Pierre Levif. *Excitation multifréquence dans les décharges capacitives utilisées pour la gravure en micro-électronique*. PhD thesis, Ecole Polytechnique X, 2007.
- [15] Pascal Chabert and Nicholas Braithwaite. *Physics of radio-frequency plasmas*. Cambridge University press, 2011.
- [16] Laurent Thérèse. *Plasmas Radiofréquence Pour L'analyse Des Matériaux. Etudes expérimentale, analytique et numérique*. PhD thesis, Citeseer, 2005.
- [17] Oscar Buneman. Dissipation of currents in ionized media. *Physical Review*, 115(3) :503, 1959.
- [18] John Dawson. One-dimensional plasma model. *Physics of Fluids (1958-1988)*, 5(4) :445–459, 1962.
- [19] Charles K Birdsall and A Bruce Langdon. *Plasma physics via computer simulation*. CRC Press, 2004.
- [20] Roger W Hockney and James W Eastwood. *Computer simulation using particles*. CRC Press, 1988.
- [21] E Jeckelmann. H. benthien in computational many particle physics, h. fehske, r. schneider and a. weiße. *Lecture Notes in Physics*, 739 :621.
- [22] Brian G Heil, Uwe Czarnetzki, Ralf Peter Brinkmann, and Thomas Mussenbrock. On the possibility of making a geometrically symmetric rf-ccp discharge electrically asymmetric. *Journal of Physics D : Applied Physics*, 41(16) :165202, 2008.
- [23] U Czarnetzki, J Schulze, E Schüngel, and Z Donkó. The electrical asymmetry effect in capacitively coupled radio-frequency discharges. *Plasma Sources Science and Technology*, 20(2) :024010, 2011.
- [24] Arslane Boudghene Stambouli, Rafik Benallal, Nourredine Oudini, Sidi Mohamed Mesli, and Rabah Tadjine. Control of dual frequency capacitively coupled plasma via blocking capacitor and phase angle. *The European Physical Journal Applied Physics*, 80(1) :10802, 2017.
- [25] Vahid Vahedi and G DiPeso. Simultaneous potential and circuit solution for two-dimensional bounded plasma simulation codes. *Journal of Computational Physics*, 131(1) :149–163, 1997.
- [26] John Paul Verboncoeur, Maria Virginia Alves, Vahid Vahedi, and Charles Kennedy Birdsall. Simultaneous potential and circuit solution for 1d bounded plasma particle simulation codes. *Journal of Computational Physics*, 104(2) :321–328, 1993.