DÉDICACES

***J**e dédie ce travail ...*



***À ma tendre Mère et mon cher Père**, aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail et le fruit de vos sacrifices que vous avez consentis pour mon éducation et ma formation le long de ces années.*

***À** mes adorables sœurs **Faiza** et **Meriem**, mes compagnantes fidèles, pour leurs encouragements, les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous.*

***À** mes chèrs frères, **Mohamed**, **Djamel** et **Sid Ahmed**, qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.*

***À** mon petit adorable neveu que j'aime de tous mon cœur **Iyed**,*

Puisse Dieu vous protège et vous garde toujours prés de moi,

***A**ux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagnaient durant mon chemin d'études supérieures, collègues d'étude de promotion 2017,*

***À** tous ceux qui me sont chères..*

Zineb

REMERCIEMENTS

***A**vant tous je remiercie le tout puissant **ALLAH** de me monterer la voie, de ma donner la force, le courage et de m'avoir guidé en bonne santé afin de mener à bien ce projet de fin d'étude.*

***j**e tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements en premier lieu à mon promoteur **Mr. KECHIDI Ziane**, pour ses précieux conseils, ses encouragements, et ses orientations le long de mon travail.*

***j**e tiens à remercier **Mr. HOUATIS Djamel** Maître de Conférences à l'université de Médéa pour avoir accepté de présider les jurys de ce mémoire.*

***M**es vifs remerciements vont également aux **Mr.SEBAR Djamel** et **Mr.MEDIA EL Mahdi** qui m'ont fait l'honneur et le plaisir d'accepter de juger mon travail.*

***I**l me serai impossible de ne pas remercier mes proches surtout ma famille, mes parents, mes frères, mes sœurs, pour leurs aides, leurs confiances et leurs encouragements.*

***F**inalement, j'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs actions, leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté à répondre à mes questions durant mes recherches.*

الملخـص

,\الهدف من العمل المعروض، هو تطوير أداة رقمية قادرة على وصف نوعي لسلوك التفريغ المستمر المغنطروني عن طريق استخدام مفاعل ثنائي الأبعاد. هذه الدراسة تساهم في فهم دينامك و كمية انتاج الجسيمات المشحونة داخل المفاعل .بالاضافة الى مختلف الآليات الفيزيائية والكهربائية التي تحكم هذا النوع من التفريغ. يستند الكود الرقمي الثنائي الأبعاد في هذا العمل على حل المعادلات من نموذج الموائع، العزوم الثلاثة الأولى من معادلة بولتزمانذات اتساق ذاتي مع معادلة بواسون.

هذه النمذجة تسمح بتحديد واستخراج خصائص البلازما الأرجون (كثافة الإلكترونات، كثافة الايونات، اكمون كهربائي، درجة حرارة الإلكترونات، ...)، والمغناطيس الدائم (كثافة التدفق المغناطيسي، كمون مغناطيسي سلمي) للمفاعل.

الكلمات المفتاحية : بلازما، الرش المهبطي ، التفريغ المستمر المغنطروني ، نموذج الموائع، ،طريقة العناصر المتهية، كومسول

Résumé

L'objectif de ce travail est de développer un modèle numérique capable de décrire le comportement qualitatif d'une décharge magnétron à courant continu par l'utilisation d'une configuration géométrique bidimensionnelle. Cet étude constitue une contribution à la compréhension de la dynamique et de taux de production des espèces chargées à l'intérieur de l'enceinte, et permet de mettre en évidence les différents mécanismes physique et électrique gouvernant ce type de décharge. Le code numérique 2D élaboré dans le cadre de ce travail est basé sur la résolution d'un système d'équation auto cohérent formé par les équations du modèle fluide (les trois premiers moments de l'équation de Boltzmann) couplées avec l'équation de Poisson. Les résultats obtenus nous permettent de déterminer les caractéristiques du plasma d'argon (densité des électrons, du champ et potentiel électriques, température des électrons,..) ainsi que les profils de densité de flux et potentiel magnétique au sein du réacteur.

Mots clés : Plasma, décharge magnétron à courant continu, pulvérisation cathodique, modèle fluide, méthode des éléments finis, COMSOL MULTIPHYSIQUE.

Abstract

The aim of this work is to develop a numerical model capable of describing the qualitative behavior of a DC magnetron discharge by using a two-dimensional geometric configuration. This study constitutes a contribution to the understanding of the dynamics and production rates of the charged species inside the chamber, and makes it possible to demonstrate the different physical and electrical mechanisms governing this type of discharge. The 2D numerical code developed in this work is based on the resolution of a set of self-coherent equations derived from the fluid model (the three first moments of the Boltzmann equation) coupled with the poison's equation. The obtained results allow us to

determine the characteristics of the argon plasma (density of electrons, electric field and potential, the electrons temperature...) as well as the flux density and magnetic potential profiles within the reactor.
Key words : Plasma, Magnetron direct current discharge, sputtering, fluid model ,finite element method, COMSOL MULITPHYSICS.

TABLE DES MATIÈRES

Dédicaces **i**

Remerciements **ii**

Résumé **iv**

Table des matières **vii**

Liste des abréviations **viii**

Liste des notations **x**

Table des figures **xi**

Liste des tableaux **xiii**

Introduction générale **1**

1 Définition et applications des plasmas **4**
1.1 Généralités sur les plasmas 5
1.1.1 Introduction 5
1.1.2 Définition d'un plasma 5
1.1.3 Constituants d'un Plasma 6
1.1.4 Grandeurs caractéristiques du plasma 7
1.1.4.1 Densité électronique 7
1.1.4.2 Degré d'ionisation 7
1.1.4.3 Température du plasma 8
1.1.4.4 Libre parcouru moyen 8
1.1.4.5 Neutralité 8
1.1.4.6 Longueur de Debye 9
1.1.4.7 Fonction de distribution 9
1.1.5 Collisions dans les plasmas 10
1.1.5.1 Collisions élastiques 10
1.1.5.2 Collisions inélastiques 10
1.1.5.3 Différents processus collisionnels dans le plasma 10

1.1.5.4 Sections efficaces des collisions . . . 11
1.1.6 Modèles d'équilibre dans les plasmas . . . 12
1.1.6.1 Equilibre Thermodynamique Comple ou Total (ETC) ou (ETT) . . . 12
1.1.6.2 Equilibre thermodynamique local (ETL) . . . 12
1.1.6.3 Equilibre thermodynamique local partiel (ETLP) . . . 12
1.1.6.4 Hors équilibre . . . 12
1.1.7 Génération des plasmas . . . 12
1.1.7.1 Décharges électriques . . . 13
1.1.8 Classification des Plasmas . . . 16
1.1.8.1 Plasmas chauds . . . 16
1.1.8.2 Plasmas froids . . . 17
1.1.9 Applications des plasmas . . . 18
1.2 Dépôt physique des couches minces . . . 19
1.2.1 Introduction . . . 19
1.2.2 Définition d'une couches minces . . . 19
1.2.3 Principe de formation et mécanisme de croissance des couches minces 19
1.2.4 Dépôt physique en phase vapeur (PVD) . . . 20
1.2.5 Pulvérisation cathodique . . . 21
1.2.5.1 Principe de pulvérisation cathodique . . . 21
1.2.5.2 Pulvérisation cathodique diode . . . 23
1.2.5.3 Pulvérisation cathodique triode . . . 24
1.2.5.4 Pulvérisation cathodique magnétron . . . 25
1.2.5.5 Types des configurations magnétrons . . . 27
1.2.6 Phénomènes d'interaction ion-matière . . . 28
1.2.6.1 phénomènes au parois . . . 28
1.2.6.2 Phénomènes à la cathode . . . 30
1.2.7 Transport des espèces pulvérisées dans la phase gazeuse et formation de la couche mince . . . 31
1.2.7.1 Rendement de pulvérisation . . . 32
1.2.8 Avantage de cette technique . . . 33

2 Simulation sous COMSOL MULTIOHYSICS 34
2.1 Introduction . . . 35
2.2 Description mathématique du plasma . . . 36
2.2.1 Le modèle fluide : . . . 36
2.2.1.1 Équations utilisés dans le modèle : . . . 36
2.2.1.2 Équations des champs magnétiques et électriques . . . 38
2.2.2 Méthode des éléments finis . . . 39
2.2.2.1 Types des éléments finis . . . 39
2.2.3 Introduction à Comsol Multiphysiques . . . 40
2.2.4 Module de COMSOL . . . 41
2.2.5 Bibliographies du module Plasma . . . 41
2.2.6 Principe d'utilisation . . . 42
2.2.7 Utilisation COMSOL . . . 42
2.2.7.1 Définition du modèle . . . 43
2.2.7.2 Définition des paramètres . . . 43
2.2.7.3 Géométrie de la structure . . . 43

2.2.7.4 Physique du modèle 46

3 Résultats et discussions **51**
3.1 Introduction 52
3.1.1 Création du plasma d'argon 52
3.1.1.1 Densité électronique 52
3.1.1.2 Température électronique 53
3.1.1.3 Potentiel électrique 54
3.1.1.4 Densité ionique 55
3.1.1.5 Densité de l'argon excité 56
3.1.2 Création du champ magnétique 57
3.1.2.1 Potentiel scalaire magnétique 57
3.1.2.2 Densité de flux magnétique 58
3.1.3 Effet de la géométrie du réacteur sur les paramètres de décharge . . 59
3.1.3.1 Effet de la distance inter-électrodes sur la température électronique 61
3.1.3.2 Effet de la distance inter-électrodes sur la densité du flux magnétique 62
3.1.3.3 Effet de la distance inter-électrodes sur le potentiel scalaire magnétique 63

Conclusion générale **66**

Bibliographie **67**

LISTE DES ABRÉVIATIONS

Abréviation	Signification
CCP	Capacitively Coupled Plasma (Plasma à Couplage Capacitif)
CVD	Chemical vapor deposition (Dépôt Chimique en phase Vapeur)
DC	Courant Continu (Direct cuttent)
ET	Équilibre thermodynamique
ETC	Équilibre thermodynamique complet
ETL	Équilibre thermodynamique local
ETLP	Équilibre thermodynamique local partiel
ETT	Équilibre thermodynamique total
FEM	Méthodes des éléments finis
HET	Hors Équilibre thermodynamique
ICP	Inductively Coupled Plasma (Plasma à Couplage Inductif)
RF	Radio-frequence
PDE	Équations différentielles partielles
PVD	Physical vapor deposition (Dépôt Physique en phase Vapeur)

LISTE DES NOTATIONS

α : Degré d'ionisation d'un milieu (sans unité)

α_T : Premier coefficient de Townsend (sans unité)

σ : Section efficace (en cm^2)

ϵ_0 : Constante diélectrique du vide ($\epsilon_0 = 8.854 * 10^{-12} en$ F/m)

θ_i : Angle d'incidence des ions (en degré)

λ : Libre parcours moyen (en cm)

λ_{De} : Longueur de Debye (en m)

a_0 : Rayon de Bohr ($5.29 * 10^{-11}$m)

$\vec{B}$: Induction magnétique (en T)

c : Vitesse de la lumière dans le vide ($c = 3 * 10^8$m/s)

E : Energie (en eV)

E_{Ar^+} : Energie des ions d'Ar (en eV)

$\vec{E}$: Champ électrique (en V/m)

f : Fréquence d'excitation (en Hz)

$F_{L_{elec}}$: Force de Lorentz (en N)

$\vec{H}$: Champ magnétique (en A/m)

k_B : Constante de Boltzmann (en j/K)

M_a : Masse atomique de l'atome cible (en g/mol)

M_i : Masse atomique de l'ion incident (en g/mol)

m_e : Masse de l'électron (en Kg)

N_i : Densité des différentes particules chargées par unité de volume (en cm^{-3})

n_e : Densité électronique (en cm^{-3})

n_n : Densité des neutres (en cm^{-3})

q_i : Charge électrique (en C)

r : Rayon de particule en collision (en m)

$S_n(\varepsilon)$: Pouvoir d'arrêt normalisé (en Mev/mg/cm^2)

T_e : Température de l'électron (en eV)

T_g : Température de neutre (en eV)

T_i : Température de l'ion (en eV)

U : énergie de liaison de d'un atome à la surface de la cible (en eV)

v_e : Vitesse de l'électron (en m/s)

V_m : Potentiel scalaire magnétique (en A)

w : Pulsation (en rad/sec)

Z_i : Numéros atomiques de l'ion incident (sans unité)

TABLE DES FIGURES

1.1 Les quatres états de la matière 5
1.2 La différence entre un gaz neutre et un gaz ionisé 6
1.3 Section efficace de collision 11
1.4 Décharge à courant continu (DC) 13
1.5 Régimes de décharge à courant continu (DC) 14
1.6 Principe de couplage capacitif 15
1.7 Principe de couplage inductif 16
1.8 l'élaboration d'une couche mince par dépôt physique en phase vapeur . . . 20
1.9 Principe de la pulvérisation 22
1.10 Polarisation en à courant continu(DC) 23
1.11 Polarisation radio fréquence (RF) 24
1.12 Système de pulvérisation triode 25
1.13 Trajectoires électroniques 26
1.14 Configuration d'une cathode magnétron 26
1.15 Représentation de l'évolution de la microstructure selon l'angle d'incidence θ_i et l'énergie incidente E_i des particules 27
1.16 Configurations possibles des magnétrons. (a) Equilibré, (b) et (c) Déséquilibrés 28
1.17 Phénomènes d'interaction ion-matière 29
1.18 Les régimes de pulvérisation par collision simple (a) et cascade linéaire (b) 30
1.19 Étapes de formation des couches minces 32

2.1 éléments classiques en une et deux dimensions 39
2.2 éléments classiques en trois dimensions 40
2.3 Choix de la dimension 43
2.4 Paramètres de la géométrie du réacteur 44
2.5 Paramètres de la géométrie de la cathode 44
2.6 Paramètres de la géométrie de l'anode 45
2.7 Paramètres de la géométrie de l'aimant 45
2.8 Géométrie finale du réacteur 45
2.9 Matériaux utilisés 46
2.10 Sélection du matériau dans le réacteur 46
2.11 Sélection du matériau pour l'aimant 47

2.12 Sélection du matériau pour la cathode et l'anode 47
2.13 Choix de la physique-module plasma- 48
2.14 Conditions aux limites 48
2.15 Choix de la physique -module AC/DC- 49
2.16 Paramètres et représentation du maillage 50

3.1 Densité des éléctrons 52
3.2 Distribution spatiale de la densité électronique 53
3.3 Température des électrons le long de la longueur axiale 53
3.4 Distribution spatiale de la température électronique 54
3.5 Potentiel électrique le long de la longueur axiale 54
3.6 Distribution spatiale du potentiel électrique 55
3.7 Distribution spatiale de la densité ionique Ar^+ 55
3.8 Distribution spatiale de la densité de l'argon excité 56
3.9 Représentation du potentiel scalaire magnétique 57
3.10 Représentation de la densité du flux magnétique 58
3.11 Représentation du potentiel électrique(a) (b) (c) 59
3.12 Représentation du potentiel électrique(d) (e) 59
3.13 Représentation de la densité électronique(a) (b) (c) 60
3.14 Représentation de la densité électronique(d) (e) 60
3.15 Représentation de la température électronique(a) (b) (c) 61
3.16 Représentation de température électronique(d) (e) 61
3.17 Représentation de la densité du flux magnétique (a) (b) (c) 62
3.18 Représentation de la densité du flux magnétique(d) (e) 62
3.19 Représentation du potentiel scalaire magnétique(a) (b) (c) 63
3.20 Représentation du potentiel scalaire magnétique(d) (e) 63

LISTE DES TABLEAUX

2.1 Paramètres du modèle 43
2.2 Tableau des processus chimiques 48
2.3 Tableau réactions de surface 49

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les tendances actuelles en procédés plasma portent sur la mise en œuvre de réacteurs modulaires avec plusieurs décharges qui agissent simultanément ou successivement sur la matière en interaction avec le plasma. L'ajout d'un champ magnétique permet généralement de confiner le plasma et d'abaisser la pression de travail [1].

Le procédé magnétron de dépôt de couches minces par voie physique est très largement utilisé dans l'industrie. Il est encore sujet à de nombreuses études visant l'amélioration de la compréhension des phénomènes physiques qui s'y produisent lors une élaboration d'une couche mince.
L'élaboration de matériaux sous la forme de couches minces présente un intérêt majeur dans des domaines d'applications très variés [2], tels que l'optique , l'électronique , la mécanique, la chimie et la décoration (les lunettes, bijoutries..) [3].

Divers procédés de dépôt de couches minces sont availables afin d'assurer le dépôt de tous types de matériaux, parmi ces techniques on s'intéresse à la pulvérisation cathodique magnétron qui est très utilisée depuis plusieurs dizaines d'années dans différents domaines d'applications en nanosciences, en traitement de surfaces (métallurgie, automobile...), en optique [4]. Elle occupe une place importante grâce au grand nombre de ces avantages.

Le phénomène de pulvérisation, qui à l'origine était décrit comme « désintégration cathodique » par William Robert Grove en 1852, a été renommé par John Thompson en 1921 par « pulvérisation cathodique » [5].
La pulvérisation magnétron à courant continu (**DC**) a été largement utilisée dans le dépôt en couche mince. Au cours de la dernière décennie au point où il est devenu établi comme le processus de choix pour le dépôt d'une large gamme de revêtements industriels importants [6].

La multitude des phénomènes concernés, tous interdépendants (maintien de la décharge, confinement du plasma, réactivité chimique dans le plasma, interaction plasma/parois, transport de la matière pulvérisée, interaction matière pulvérisée/parois etc. . .) rend la compréhension globale du procédé particulièrement difficile, notamment lorsqu'on tente d'y accéder par l'approche expérimentale seule [6]. De très nombreuses études ont été effectuées et ont permis de pousser très loin la compréhension de la physique de base du processus.

Vu la complexité des phénomènes physico-chimiques des milieux plasmas, et en lien avec les expériences, les outils de modélisation peuvent amener un certain nombre d'éléments de réponse, elle nous permet de mieux comprendre les mécanismes fondamentaux de croissance des couches minces en fonction des propriétés du milieu et leurs composition lors de dépôts par pulvérisation plasma. Elle permet Ainsi d'évaluer les performances des réacteurs existants pour améliorer les propriétés des films car la croissance de couches minces dépend des conditions de dépôt ainsi que la nature du substrat.

Il existe de nombreux modèles mathématiques adaptés aux différents types de réacteurs plasmas. Dans ce travail, un modèle fluide est utilisé pour décrire la décharge de plasma d'Argon à basse pression pour pulvérisation magnétron. Les modèles fluides font appel à un couplage entre les équations de transport des particules et du champ électromagnétique [7]. Le grand nombre d'équations classe les problèmes de la physique des

plasmas parmi les plus difficiles à résoudre numériquement.

L'objectif de cette recherche est de mieux comprendre les phénomènes physico-chimiques des plasmas froids qui interviennent dans un réacteur magnétron lors de la déposition des couches minces par pulvérisation plasma à l'aide d'un logiciel commercial COMSOL Multiphysics. C'est un logiciel de simulation qui permet de coupler plusieurs processus physiques et de résoudre ce système d'équations aux dérivées partielles par la méthode des éléments finis [8].

Notre modélisation nous a permis la détermination des caractéristiques du plasma (densité des électrons n_e, du champ et potentiel électriques, température des électrons T_e,..).

Ce mémoire est constitué de quatre chapitres principaux, après la présente introduction :

- **Le premier chapitre** : sera consacré à une étude bibliographique dans laquelle nous ferons un rappel de certaines notions essentielles concernant le plasma et leurs propriétés physiques. Par la suite, nous présenterons ses classifications, les types des décharges permettant la création d'un plasma. ainsi que les interactions possibles dans le plasma.
- **Le deuxième chapitre** : présentera le principe de la technique mise en œuvre pour l'élaboration des couches minces par la pulvérisation cathodique magnétron et les configurations des magnétrons possibles dans un réacteur de dépôt.
- **Le troisième chapitre** : sera consacré à la simulation d'une décharge à courant continu (DC) dans l'Argon sous le logiciel COMSOL Multiphysique.
- **Le quatrième chapitre** : dans ce chapitre nous exposons les résultats du calcul obtenus par le logiciel, ainsi que interprétations.

CHAPITRE 1

DÉFINITION ET APPLICATIONS DES PLASMAS

Ce chapitre se divise en deux parties distinctes. La première partie se consacre au rappel de notions de base de l'environnement plasma. Le deuxième partie traite l'application de plasma dans la déposition des couches minces par la pulvérisation cathodique magnétron.

1.1 Généralités sur les plasmas

1.1.1 Introduction

L'objectif de cette première partie est d'effectuer une synthèse bibliographique sur les plasmas. Nous commençons dans un premier temps par une brève définition sur les plasmas, nous allons énumérer les différents caractéristiques physiques qui permettent de les décrire. Ainsi les différents types de plasmas existants [9].
Nous rappelons par la suite les différents procédés de génération du plasma (DC, RF).
Enfin, nous allons terminer le chapitre par leurs classification.

1.1.2 Définition d'un plasma

Le terme « plasma » apparait sous la plume de l'Américain I Langmuir en 1929 afin de décrire un gaz ionisé contenu dans un tube à décharge. Par ordre croissant sur l'échelle des températures, les plasmas représentent le quatrième état de la matière après les états solide, liquide et gazeux [9].

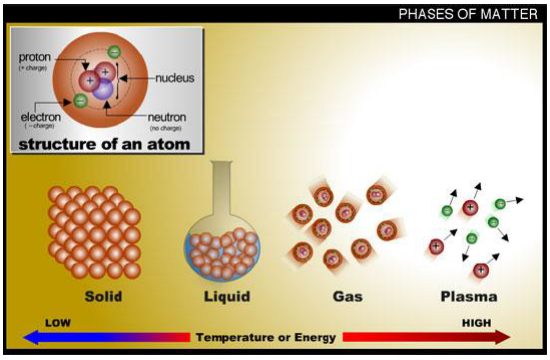


FIGURE 1.1 – Les quatres états de la matière [10].

Plus précisément un plasma est un gaz partiellement ou totalement ionisé. Constitué d'un ensemble de particules neutres (atomes, molécules, radicaux), d'ions et d'électrons.

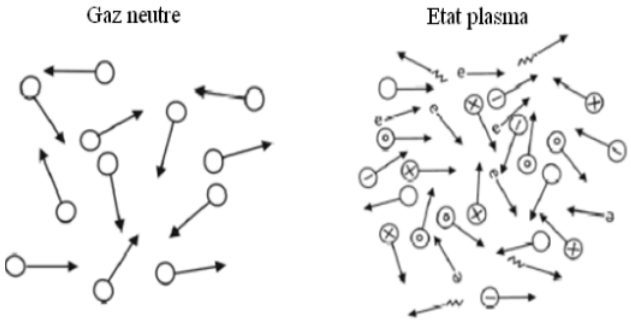


FIGURE 1.2 – La différence entre un gaz neutre et un gaz ionisé [11].

A l'état naturel, le plasma se retrouve sous différentes formes dans l'univers : les étoiles, le soleil, la matière interstellaire en font partie.
Il existe de nombreux plasmas qui sont produits artificiellement et développés au laboratoire car ils possèdent des propriétés spécifiques permettant des applications dans de très nombreux domaines, a titre d'exemple on cite : décharges dans un gaz, arcs électriques, plasma produit par laser, par onde de choc, plasmas de fusion thermonucléaire.

Les différences de la température entre les électrons et les ions du plasma vont définir la différence entre les plasmas chauds et les plasmas froids. Cette température va aussi définir le degré d'ionisation et les propriétés de cet ensemble de particules électriquement neutre [13].

1.1.3 Constituants d'un Plasma

Un plasma est constitué par des différents espèces chargées, ces derniers sont classer selon leurs masses et leurs charges, on distingue alors :

◦ **Électrons**

Les électrons sont les particules les plus énergétiques et rapides dans un plasma à cause de leur faible masse. C'est aussi du fait de leur grande mobilité, sont les premiers responsables de la conductivité électriques des plasma. Ils se déplacent beaucoup plus vite que les autres espèces et sont par conséquent les premiers à emmagasiner l'énergie du champ électrique. c'est pourquoi se sont les responsables des principales réactions produites dans le plasma (exciter, dissocier et ioniser le milieu gazeux).

A haute fréquence les électrons répandent aux perturbations électriques sur des échelles de temps beaucoup plus courtes, contrairement aux ions.

◦ **Ions (positifs et négatifs)**

Quand un ou plusieurs électrons sont arrachés d'un atome, l'atome restant devient chargé positivement, c'est un ion positif. Les ions positifs portent la plupart de l'énergie et du

courant dans la magnétosphère. Ils sont la composante principale des ceintures de radiations interne et externe [14] (Une région de la magnétosphère de certaines planètes dans laquelle le champ magnétique de ces planètes piège les particules chargées qui ont une haute énergie.)

A l'inverse des électrons qui sont tous identiques, la nature des espèces ioniques dans une décharge hors équilibre peut être très variée.
Dans les décharges électriques qui nous intéressent, les ions généralement formés par ionisation sont mono-chargés mais peuvent être mono ou polyatomiques.
En présence de gaz électronégatifs, on trouve aussi des ions négatifs.

Ces ions se forment généralement par attachement, dissociatif ou non, d'un électron libre sur une molécule électronégative [15].

◦ **Neutres**

Ils se définissent comme les atomes ou molécules qui ne se dissocient pas spontanément, ne réagissent ni avec eux-mêmes, ni avec d'autres neutres stables, ni avec les parois. Il convient de distinguer entre les neutres stables condensables (atomes de métal dans une métallisation par pulvérisation, molécules diverses sur des parois fortement refroidies) et les neutres stables gazeux ne sont détruits que par collisions avec une particule porteuse d'énergie [15].

1.1.4 Grandeurs caractéristiques du plasma

1.1.4.1 Densité électronique

La densité électronique n_e est le nombre d'électrons libres par unités de volume (cm^{-3}).

1.1.4.2 Degré d'ionisation

Dans leur état normal, les gaz sont des isolants électriques. En effet, ils ne contiennent que des molécules neutres. Cependant, lorsqu'il leur est appliqué un champ électrique assez fort, ils deviennent conducteurs. Il se produit des décharges électriques, avec apparition d'électrons et d'ions libres. Le résultat de telles décharges est la production d'un gaz ionisé contenant n_0 électrons (ou des ions positifs), et n neutres par unité de volume.

Le degré d'ionisation est un paramètre qui permet de faire une première classification des plasmas. Il est défini par le rapport du nombre d'électrons libres n_0 et le nombre de particules totales $n_0 + n$:

$$\alpha = \frac{n}{n_0 + n} \tag{1.1}$$

Ou n est la densité des neutres et n_0 celle des électrons (ou des ions positifs). Lorsque ce rapport est inférieur à 10^{-4} ($\alpha \ll 1$) , on dit que le gaz est faiblement ionisé. C'est le domaine des plasmas froids.
Dans ce cas l'équation (1.1) peut aussi s'écrire :

$$\alpha = \frac{n}{n_0} \tag{1.2}$$

Au-dessus de cette limite ($\alpha \leq 1$), le gaz est considéré comme fortement ionisé. C'est le domaine des plasmas chauds.

Quand le degré d'ionisation est égal à l'unité ($\alpha = 1$), la densité des molécules est nulle. On dit que le gaz est totalement ionisé [16].

1.1.4.3 Température du plasma

La température de chaque espèce est définie à partir de l'énergie cinétique moyenne des particules de cette espèce. Par exemple, pour les électrons on définit une température Te à partir de la relation :

$$\frac{1}{2}m_e {v_e}^2 = \frac{3}{2}K_B T_e, \tag{1.3}$$

Où : K_B, m_e et v_e représentent respectivement la constante de Boltzmann, la masse et la vitesse de l'électron.

1.1.4.4 Libre parcouru moyen

Le libre parcours moyen λ correspond à la distance moyenne parcourue par une particule (électron, ion ou neutre) entre deux collisions. Ce paramètre dépend de la vitesse des particules ainsi que de la probabilité de collisions. Il peut généralement être exprimé par l'équation suivante :

$$\lambda = \frac{1}{\pi(r_1 + r_2)^2.N_i} \tag{1.4}$$

Avec :

$$\sigma = \pi(r_1 + r_2)^2$$

Où :
r_1 et r_2 sont les rayons de particules en collision, N_i densité des particules par unité de volume et σ la section efficace.

À basse pression, la densité du gaz est plus faible, en conséquence le libre parcours moyen sera plus grand. Cela permet aux espèces chargées d'avoir suffisamment de temps pour être accéléré par le champ électrique, entre les collisions, ce qui facilite le transfert d'une plus grand d'énergie lors de la collision [9].

1.1.4.5 Neutralité

L'une des caractéristiques d'un plasma est d'être quasiment neutre. Elle représente la tendance du plasma vers une quasi neutralité électrique, c'est-à-dire que dans un volume du plasma, l'ensemble de particules chargées positives et négatives et macroscopiquement neutre .

$$\sum q_i N_i = 0 \tag{1.5}$$

Où : q_i : est la charge électrique,
N_i : est la densité des différentes espèces chargées (i) présentes dans le plasma.

1.1.4.6 Longueur de Debye

La longueur de Debye λ_{De} est une longueur critique d'interactions collectives (coulombiennes) à partir de laquelle, le potentiel des espèces en interaction est écranté [27, 37]. Cette valeur est donnée par (1.6) :

$$\lambda_{De} = (\frac{\epsilon_0}{e^2}\frac{K_B T_e}{n_e})^{1/2} \tag{1.6}$$

Où : ϵ_0 est la constante diélectrique du vide,

$$\epsilon_0 = 8,854\ 10^{-12}\ \text{F/m}.$$

e est la charge de l'électron, K_B est la constante de Boltzmann, T_e et n_e sont respectivement la température et la densité des électrons.

On considérera donc que si la distance est inférieure à λ_{De}, le potentiel vu est celui d'une charge seule, et qu'au delà, le potentiel induit par cette charge n'est plus observé (écrantage).

L'équation (1.6) peut être aussi exprimée comme suit :

$$\lambda_{De}(cm) \approx 743(\frac{T_e}{n_e})^{1/2} \tag{1.7}$$

Où T_e est en celsius (C) et n_e est en cm^{-3} [19].

1.1.4.7 Fonction de distribution

Pour une meilleure description d'un plasma au voisinage d'une position donné à un moment donné, il faut décrire la répartition de chaque espèce de particules composant ce plasma, son état énergétique ainsi que sa distribution en vitesse.

Pour cela on définit la fonction de distribution f telle que $f(\vec{r}, \vec{V}, t)\mathrm{d}\vec{r}\ \mathrm{d}\vec{V}$ représente le nombre moyen de particules de type i et de masse m_i contenues dans le volume $\mathrm{d}\vec{r}\ \mathrm{d}\vec{V}$ autour du point $(\vec{r}, \vec{V})$ ($\vec{r}(x, y, z)$ et $\vec{V}(V_x, V_y, V_z)$ étant les champs des distances et des vitesses des particules chargées respectivement) et à l'instant t [6, 9].

La fonction de distribution est la solution de l'équation de Boltzmann qui décrit la variation de la cinétique des espèces dans le plasma, elle est valide pour les plasmas faiblement ionisés, gouvernés par les collisions entre espèces neutres et particules chargées.

La majorité de modèles de décharge de gaz sont établies sur cette équation. Cependant, l'équation de Boltzmann est difficile à manipuler et ne peut pas être résolue sans lui faire des simplifications significatives même pour une espèce simple. Une forme souvent utilisée de l'équation est donnée par l'expression suivante [6, 9] :

$$\frac{\partial f_i}{\partial t} + V_i\frac{\partial f_i}{\partial r} + \frac{F_i}{m_i}\frac{\partial f_i}{\partial V} = (\frac{\partial f_i}{\partial t})_{collision} \tag{1.8}$$

Avec :

$$F_i = q(E + V * B) \tag{1.9}$$

1.1.5 Collisions dans les plasmas

Lorsque deux particules sont séparées par une distance d s'approchent l'une de l'autre, elles commencent à interagir et si, après cette interaction, quelques changements mesurables se produisent, on dit qu'une collision a eu lieu. C'est de ces collisions que se déroule la formation des espèces réactives de plasma [20].

L'interaction entre les particules neutres est du à la déformation de leur nuage électronique, ce qui entraîne d'abord une force attractive, puis fortement répulsive du fait des noyaux positifs. Du fait de cette interaction, les particules sont déviées de leurs trajectoires initiales [21].

1.1.5.1 Collisions élastiques

Lors d'une collision élastique, l'énergie cinétique et la quantité de mouvement des particules entrant en collision sont conservées . Il y a simplement un changement de direction des particules, avec une redistribution des énergies de translation entre elles.
Ces collisions ne modifient pas l'énergie interne des particules en question, mais sont responsables des phénomènes thermiques (conduction et diffusion de chaleur au sein du gaz) [14].

1.1.5.2 Collisions inélastiques

Par contre, dans les collisions inélastiques, l'énergie interne des particules change. Les collisions inélastiques entre un électron rapide et une espèce neutre sont un des facteurs principaux déterminant la chimie du plasma. C'est par ce type de collision que les électrons cèdent de l'énergie aux autres espèces du plasma (et peuvent par exemple chauffer le gaz).

1.1.5.3 Différents processus collisionnels dans le plasma

Processus d'excitation :

Ionisation par impact électronique :

$$e^- + A \rightarrow e^- + e^- + A^+$$

Excitation par impact électronique :

$$e^- + A \rightarrow e^- + A^*$$

Dissociation des molécules diatomiques par impact électronique :

$$e^- + A_2 \rightarrow e^- + A + A$$

Ionisation électronique métastable :

$$e^- + A^* \rightarrow e^- + e^- + A^+$$

Ionisation métastable neutre :

$$A^* + B \rightarrow A + e^- + B^+$$

Processus de relaxation et de recombinaison :

Désexcitation :

$A^* \rightarrow A + h\upsilon$

Recombinaison électron-ion :

$e^- + A^+ + A \rightarrow A^* + A$

Recombinaison radiative :

$e^- + A^+ \rightarrow A + h\upsilon$

Attachement des électrons :

$e^- + A \rightarrow A^-$

Recombinaison ion-ion :

$A^- + A^+ \rightarrow A + A$ [22]

1.1.5.4 Sections efficaces des collisions

Tous les processus collisionnels en phase gazeuse (élastiques ou non) sont caractérisés par une section efficace σ qui permet de calculer la fréquence (ou le taux) de collision. Elle permet d'évaluer la probabilité d'interaction entre un flux de particules projectiles et une densité de particules cibles.

Exemple d'un modèle projectile-cible : $A + B = C + D$

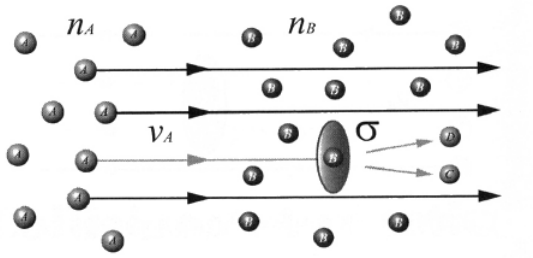


FIGURE 1.3 – Section efficace de collision [23].

$$\frac{\mathrm{d}n_A}{\mathrm{d}t} = -\sigma(n_A v_A . n_B) \tag{1.10}$$

Où :

$\frac{\mathrm{d}n_A}{\mathrm{d}t}$: est le nombre de réactions par unité de temps et de volume en $\mathrm{m}^{-3}.\mathrm{s}^{-1}$,

σ : est la section efficace en m^2,

$n_A v_A$: est le flux de particules incidentes en $\mathrm{m}^{-2}.\mathrm{s}^{-1}$,

n_B : est la densité de particules cibles en m^{-3}.

1.1.6 Modèles d'équilibre dans les plasmas

Une des classifications possibles des divers milieux plasma repose sur leur degré d'équilibre. On trouve ainsi les plasmas [24] :

1.1.6.1 Equilibre Thermodynamique Comple ou Total (ETC) ou (ETT)

Un plasma est constitué d'un grand nombre de particules, matérielles ou non (les photons). Ces particules possèdent une certaine énergie cinétique et potentielle, elles bougent dans l'espace, et entrent en collision avec les particules voisines. S'il n'existe aucun échange de matière ou d'énergie avec le milieu extérieur, un état d'équilibre ne peut être atteint, dans lequel chaque processus est contrebalancé par le processus inverse.

Un état de micro-réversibilité est alors atteint : tout mécanisme qui tend à faire perdre de l'énergie à une particule est instantanément compensé par le mécanisme inverse qui tend à lui faire gagner cette même énergie. On parle alors d'équilibre thermodynamique complet (ETC), où toutes les particules du plasma ont la même énergie moyenne, et où tous les processus collisionnels et radiatifs sont micro réversibles [24].

La température et la pression sont uniformes et suffisent pour définir cet état d'équilibre. Les températures électroniques et ioniques de rayonnement sont égales. Les particules ont une distribution des vitesses maxwellienne. Du fait de ces propriétés, un certain nombre de lois est vérifié La distribution de Boltzmann est utilisée pour la population atomique : la loi de Maxwell pour la distribution des particules et la loi de Planck pour la radiation [5].

Ces lois permettent de donner tout le détail des populations et ne dépendent que de l'énergie de chaque élément considéré [24]. Dans ces conditions, les lois d'équilibre sont valables en tout point.

1.1.6.2 Equilibre thermodynamique local (ETL)

Dans tout le plasma on peut, dans certaines conditions définir un état Equilibre Thermodynamique Local. La température locale d'équilibre T est supposée connue en ce point du plasma. Tout les lois, à l'exception de celle de Planck, sont valables localement [24].

1.1.6.3 Equilibre thermodynamique local partiel (ETLP)

Lorsque la densité est trop faible (en particulier la densité électronique), les nombre de collisions par unité de temps n'est plus suffisant pour assurer la micro réversibilité de ces deux niveaux [24], donc seule une partie des niveaux excités sont soumis à l'ETL.

1.1.6.4 Hors équilibre

Souvent, l'ionisation est due à un champ électrique extérieur. Le gaz n'est pas en équilibre thermodynamique [26].

1.1.7 Génération des plasmas

Les gaz sont généralement des bons isolants néanmoins, sous certaines conditions, lorsqu'on les faire traverser par un courant électrique, on dit alors que le gaz est le siège

d'une décharge. Cette dernière est définie comme étant l'ensemble des phénomènes qui accompagnent le passage d'un courant électrique dans un milieu gazeux.
Le gaz que nous désirons ioniser, est injecté dans une enceinte confinée sous vide partiel ou à pression atmosphérique. Le plasma est ensuite généré par l'action d'une décharge électrique dans le gaz, qui a pour rôle de transférer de l'énergie à ce gaz pour l'exciter et l'ioniser.

A la différence des gaz neutres, les plasmas, du fait de leur caractère chargé, sont sensibles à l'action des forces électromagnétiques. L'application d'un champ électrique et/ou magnétique influe directement sur les espèces chargées. L'énergie injectée est transportée spécialement aux particules les plus mobiles telles que les électrons qui contribuent à la création d'espèces actives par processus d'ionisation, d'excitation, d'attachement, de recombinaison ou de dissociation du gaz.

Les paramètres opératoires d'une décharge électrique comprennent donc la géométrie du réacteur, le choix d'un gaz à une pression déterminée et les grandeurs physiques caractéristiques de la source d'énergie telles que la tension d'alimentation et la fréquence d'excitation f (ou pulsation $\omega = 2\pi f$) [27].

1.1.7.1 Décharges électriques

Le terme décharge se rapportait initialement à la décharge se produisant entre les deux électrodes planes d'un condensateur plongé dans un gaz [20].
Les phénomènes de décharge électrique, étudiés pourtant depuis prés de deux siècles, font toujours l'objet de recherche active auprès des scientifiques. On pourrait s'étonner de cet état de fait mais on comprendrait vite que cela n'est dû qu'à la très grande complexité du phénomène et des mécanismes qui le constituent.

1.1.7.1.1 Décharge à courant continu (DC) Cette décharge est réalisée par l'application d'une tension continue entre deux électrodes dans une enceinte en verre remplie d'un gaz à une pression comprise usuellement entre 10 mTorr et 10Torr [28].

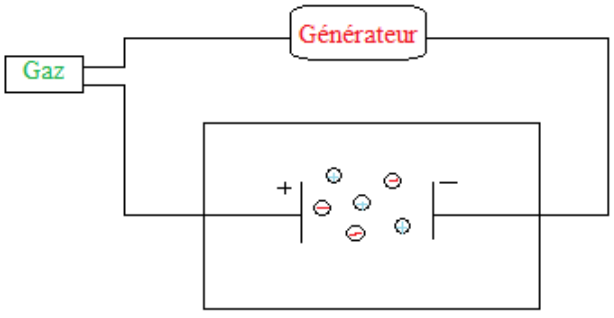


FIGURE 1.4 – Décharge à courant continu (DC)

Ce type de décharges a connu historiquement une grande importance puisque elles

constituaient une application de l'étude des plasmas faiblement ionisés hors équilibre ; la tension nécessaire pour entretenir la décharge est de l'ordre de quelques centaines de volts [28]. Le courant est alors typiquement de 10^{-1} à 10^{-4}A [30].

Régimes de décharge dans un gaz Un gaz soumis à une décharge de laboratoire, peut se trouver dans différents régimes de fonctionnement :

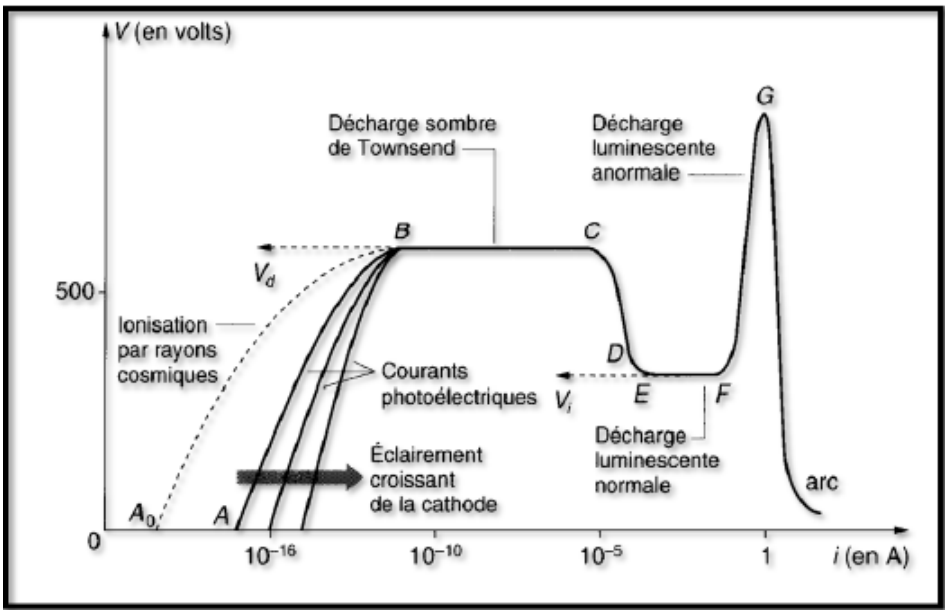


FIGURE 1.5 – Régimes de décharge à courant continu (DC) [31].

Le premier régime : Correspond au décharge non autonome, il ne peut exister qu'en présence d'un moyen extérieur, souvent une source lumineuse, assurant la production d'électrons primaires à la cathode par effet photoélectrique.

Le deuxième régime : Il est correspond au se qu'on appelle, la décharge de Townsend. Il est caractérisé par une croissance quasi-verticale du courant pour une valeur de tension appelée tension disruptive. Cette croissance correspond au passage d'un régime où la multiplication des électrons est principalement gouvernée par l'ionisation par impact d'électrons sur les molécules du gaz à un régime où l'essentiel de la multiplication est assurée par l'augmentation du flux d'électrons extraits par bombardement ionique de la cathode. Dans le régime de Townsend, la charge d'espace générée par le plasma est faible et le champ électrique reste égal au champ Laplacien.

Le troisième régime : Dans le cas des basses pressions considérées, ces décharges sont également généralement entretenues par un mécanisme de type Townsend. La grande différence qu'elles présentent avec les décharges dites de Townsend réside dans le fait que c'est le champ de charge d'espace et non pas le champ Laplacien qui gouverne la dynamique des espèces chargées.

Le quatrième régime : Correspond au régime d'arc. Celui-ci est caractérisé par une très faible tension de maintien (quelques dizaines de volts), de fortes densi-

tés de courant et un échauffement important de la décharge dont la température peut facilement atteindre plusieurs milliers de Kelvin. Le maintien du régime d'arc est également gouverné par des processus élémentaires à la cathode. Ces processus très complexes sont cependant différents de ceux rencontrés dans le cas des décharges luminescentes. On cite souvent des effets comme l'effet thermoïonique, l'émission de champ, . . . , etc. Le maintien d'un régime d'arc impose également de fortes contraintes sur l'alimentation électrique qui doit pouvoir assurer la circulation de courants forts.

1.1.7.1.2 Décharge à courant radiofréquence (RF) La RF est la gamme de fréquence allant de 1MHz à 200MHz, les décharges RF peuvent être générées par des structures allant de deux plaques parallèles métalliques polarisées, à la circulation d'un courant dans une bobine séparée du plasma par un diélectrique [12, 32–34]. Les champs électromagnétiques transfèrent leur énergie aux électrons par des mécanismes de chauffage qui peuvent être ohmiques (collisionnels) ou stochastiques (non-collisionnels).

Il existe deux manières pour coupler l'énergie au plasma : couplage capacitif CCP (Capacitively Coupled Plasmas) et couplage inductifs ICP (Inductively Coupled Plasmas), comme nous le verront par la suite :

⇒**Types de couplages** :

La puissance peut être couplée au plasma de plusieurs maniéres. Le couplage capacitif, le couplage inductif et le couplage hélicon sont les trois types de couplages possible [28, 35].

1.1.7.1.3 Couplage capacitif (CCP : Capacitively Coupled Plasma) : C'est historiquement le premier type de réacteur RF industriel qui fut développé pour fonctionner même avec des électrodes non-conductrices lors par exemple du dépôt de matériaux isolants. De par la simplicité de son concept et son adaptabilité pour les grandes échelles (réacteur de grande dimension), il est très largement répandu et couramment utilisé pour la modification de surface par plasma [36].

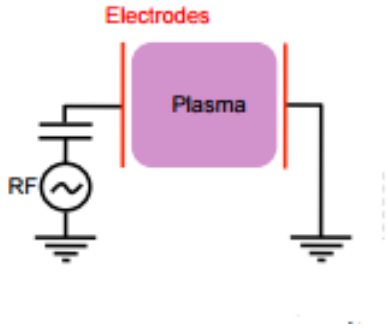


FIGURE 1.6 – Principe de couplage capacitif [37].

Dans ce mode de couplage la puissance RF est appliquée dans la chambre plasma au moyen d'une électrode plongées dans le plasma, une polarisée à la RF (13.56 MHz) et

l'autre à la masse.
Un champ électrique alternatif est alors induit entre les deux électrodes et permet un couplage de l'énergie aux électrons grâce à la partie électrique de la force de Lorentz :

$$F_{L_{elec}} = qE,$$

ou q est la charge élémentaire et E le champ électrique appliqué.

1.1.7.1.4 Couplage inductiff (ICP : Inductively Coupled Plasma) : Il est généré par une bobine à l'extérieur du plasma, séparée par une fenêtre en céramique. Le couplage de l'énergie se fait ici au moyen de la partie magnétique de la force de Lorentz :

$$F_{L_{mag}} = q\nu * B,$$

Lorsque le courant RF circule dans l'antenne, celle-ci émet un champ magnétique qui accélère les électrons libres et créer un courant dans le plasma.

Ce type de couplage peut permettre d'atteindre des densités plus élevées que pour le CCP. Avec une fréquence d'excitation de 13,56 MHz et une puissance de $\sim 1 W\mathrm{cm}^3$ les densités obtenues par un ICP sont de l'ordre de $10^{16} - 10^{18}\mathrm{m}^{-3}$.

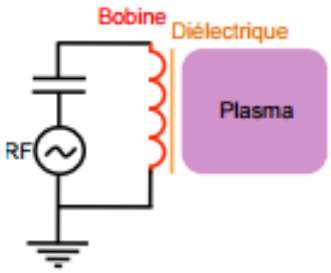


FIGURE 1.7 – Principe de couplage inductif [37].

1.1.8 Classification des Plasmas

Les plasmas sont principalement caractérisés par leurs paramètres, surtout par la densité et la température électroniques [32] ils peuvent être classifiés en deux grandes familles ; plasmas chauds ou et des plasmas froids.

1.1.8.1 Plasmas chauds

Les plasmas chauds sont en général en équilibre thermodynamique complet ou local [33]. Ils sont caractérisés par un fort taux d'ionisation, proche de 1 et par. Toutes les espèces de particules (électrons, ions, neutres) ont des températures voisines pouvant atteindre quelques milliers de degrés, exprimées par l'égalité :

$$T_e \approx T_i \approx T_g$$

.
Les spécificités de ce type de milieu sont alors utilisées dans de nombreuses applications telles ; la synthèse réactive, les analyses chimiques (spectroscopie d'émission atomique par plasma à couplage inductif), l'éclairage, pour la découpe, la soudure etc.. [13], ainsi que dans le traitement de matériaux pour leur densité d'énergie élevée et leur capacité à chauffer, fondre et dans certains cas, vaporiser le matériel à être traité [38].

Les plasmas chauds sont complètement ionisés, l'exemple le plus évident de source de plasma chaud est le soleil, se rencontrent dans les étoiles où se créent des réactions de fusion nucléaire. Ces plasmas représentent 99 de l'univers. Elles peuvent être créés par une décharge continue(arc), par une décharge à haute fréquence ou par laser [33].

1.1.8.2 Plasmas froids

Le terme « plasma froid » désigne un gaz faiblement ionisé, avec des taux d'ionisation compris entre 10^{-7} et 10^{-4}, constitué d'espèces neutres (atomes ou molécules), d'électrons et d'ions positifs ou négatifs [39].
Ils ont la particularité de présenter une population d'électrons d'énergie moyenne élevée (1 à 10 eV) et d'espèces neutres et ioniques "froides" (typiquement 300 à 3000K) [13].
Dans ce type de plasmas, généralement, le taux d'ionisation est faible et les atomes neutres, à température ambiante, sont majoritaires [37].

Les plasmas froids sont divisés en deux catégories : les plasmas thermique (en équilibre thermodynamique) et les plasmas non thermiques (plasmas hors équilibre thermodynamique).

Plasmas thermiques (En équilibre thermodynamique) Les plasmas thermiques sont aussi des plasmas partiellement ionisés mais ils sont en général en équilibre thermodynamique local. Toutes les espèces constituant ces plasmas sont caractérisées par une température unique, autrement dit l'énergie cinétique est bien repartie entre toutes ces particules. L'état d'équilibre thermodynamique est vérifie lorsque le nombre de collisions entre les électrons et les particules lourdes est assez important et aussi lorsque chaque processus qui se produit dans le plasma est équilibré par son processus inverse [22].

Ces plasmas sont produit dans les arcs électriques ou dans des étincelles et des flammes, ils se trouvent dans un état très proche de l'équilibre thermodynamique local, la valeur dans les régions les plus chaudes peut atteindre 30000k, la densité électronique peut dépasser 10^{16}cm^{-3}.

Plasmas non thermiques (Hors équilibre thermodynamique) Lors d'une décharge électrique, la température des électrons peut rester très supérieure à celle des particules lourdes. En effet, à cause de leur mobilité les électrons sont très accélérés dans les champ électrique,leur température monte rapidement. Ces électrons chauds ne cèdentqu'une faible partie de leur énergie cinétique aux particules lourdes, sous l'effet des collisions qui sont rares. Et le milieu reste alors dans un état hors d'équilibre. Ces plasmas sont appelés plasmas réactifs [40].

1.1.9 Applications des plasmas

Les propriétés uniques du plasma donnent lieu à un large éventail d'applications potentielles et réelles. Sa simplicité, sa facilité de mise en œuvre, ses caractères économique et écologique, la rendent très attractive. Les domaines d'applications sont très variés et concernent de nombreux secteurs. On peut regrouper ces applications en trois catégories [41].

Le plasma comme source de rayonnement :

- Source de lumière.
- Affichage à écran plat.
- Source de rayon X.
- Lasers.

Le plasma comme source d'énergie :

- Energie de fusion.
- Générateurs MHD.

Environnement :

- Traitement des effluents polluants gazeux ou liquides,
- Vitrification et traitement de déchets (amiante, REFIOM...),
- Traitement de l'eau,
- Destruction des bactéries et neutralisation des odeurs.

Le plasma comme outils de divers traitements :

- Traitement de surfaces : Nettoyage de surfaces, activation de surface.
- Synthèse de matériaux.
- Source de chaleur : Découpage, Soudage, Incinération.
- Déposition de matériaux : PVD, PECVD, torche plasma.

1.2 Dépôt physique des couches minces

1.2.1 Introduction

Cette partie s'attache à décrire une des applications très variés du plasma. Il s'agit du dépôt en phase vapeur (Physical Vapor Deposition : PVD).
Commençant par une définition sur les couches minces, et les mécanismes de ses formations.
Le dépôt physique en phase vapeur regroupe un ensemble de méthodes de dépôt sous vide de films minces. A titre d'exemple, nous pouvons citer : l'évaporation sous vide, la pulvérisation cathodique, l'ablation laser pulsé, ou le dépôt par arc électrique.

En dépôt physique en phase vapeur (PVD), les éléments entrant dans la composition des dépôts sont introduits sous forme solide dans l'enceinte de dépôt. Ils sont ensuite mis en phase vapeur avant de se déposer sur les substrats placés en face de la cible [42].

1.2.2 Définition d'une couches minces

Par principe, une couche mince d'un matériau donné est un élément de ce matériau dont l'une des dimensions qu'on appelle l'épaisseur a été fortement réduite de telle sorte qu'elle s'exprime en Angstrom et que cette faible distance entre les deux surfaces limites (cette quasi bidimensionnelle) entraîne une perturbation de la majorité des propriétés physiques [43].

En pratique on peut distinguer deux grandes familles de méthodes, celles qui font appel à un gaz porteur pour déplacer le matériau à déposer d'un récipient au substrat et qui s'apparentent aux techniques de diffusion utilisées dans la fabrication des composants actifs, et celles qui impliquent un environnement à pression très réduite et dans lesquelles le matériau à déposer sera véhiculé grâce à une impulsion initiale de nature thermique ou mécanique [43].

1.2.3 Principe de formation et mécanisme de croissance des couches minces

L'appellation « couche mince » est réservée à des films d'épaisseur micronique ou submicronique. Le dépôt des couches minces est constitué à partir d'espèces constituantes (atomes, molécules, particules solides, particules liquides...). Ces espèces viennent d'une source et sont par la suite transportées vers un substrat au travers d'un milieu du type [44] :
· passif (vides ou basse pression, air à pression atmosphérique, atmosphère inerte...),
· actif (plasma, gaz réactif, liquide...).

La formation de la couche mince peut se décomposer en trois étapes principales :

Première étape : Production des espèces à déposer, il existe trois façons de mettre un matériau en phase vapeur : l'évaporation, la pulvérisation et les gaz de vapeurs chimiques.

deuxième étape : Transport des espèces du matériau à déposer vers le substrat, si on est en régime de flux moléculaire (libre parcours moyen important) le transport peut se dérouler sans collisions entre les atomes et les molécules. En retour il y aura de nombreuses collisions dans la phase vapeur (plasma) pendant le transport vers le substrat dans le cas ou la pression partielle du matériau et/ou des gaz environnant est assez élevée, ou même si certaines de ces espèces sont ionisées.

troisième étape : : Dépôt sur le substrat et donc la formation de la couche mince , cette étape prend en compte le dépôt de la couche avec les processus de nucléation et de croissance par des ions de la phase vapeur (ou plasma) [3].

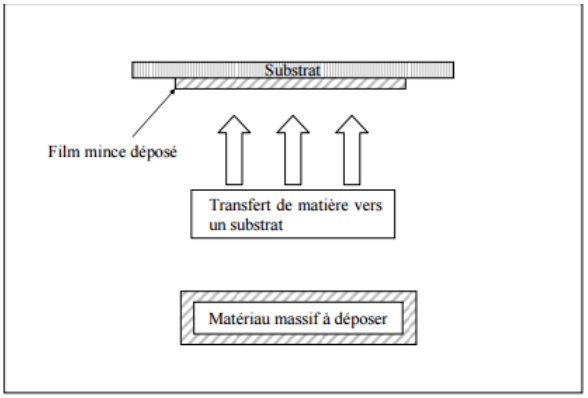


FIGURE 1.8 – l'élaboration d'une couche mince par dépôt physique en phase vapeur [45].

1.2.4 Dépôt physique en phase vapeur (PVD)

Les techniques de dépôts physiques en phase vapeur, appelés PVD (en anglais : Physical Vapour Deposition), sont des techniques d'élaboration de couches minces. Elles peuvent êtres divisées en plusieurs parties selon le procédé désiré pour l'obtention de la couche mince.

Les principales techniques de PVD sont :

√l'évaporation sous vide,

√ l'ablation laser,

√ le dépôt par faisceau d'ions,

√ l'épitaxie par jets moléculaires et la pulvérisation cathodique.

Les avantages des procédés PVD sont nombreux, il permettent de déposer une grande variété de matériaux, inorganiques, métaux alliages, ainsi que certains métaux organiques [53].

Dans toutes ces techniques le principe de base est d'élaborer une couche mince à partir d'un matériau massif. Le procédé comporte trois éléments principaux : Une cible, composée du matériau à déposer sous sa forme solide, un substrat qui est le matériau à revêtir, et la couche mince obtenue par transport de la matière de la cible au substrat.

1.2.5 Pulvérisation cathodique

La technique de pulvérisation cathodique ou appelé sputtering est une technique de dépôt en couche mince basée sur la technologie du plasma froid.
Elle est obtenue par un bombardement ionique au cours duquel un transfert de quantité de mouvement se produit entre les ions-projectiles et les espèces de la cible-cathode [46].

Historiquement ce procédé a été observé pour la première fois en 1852 par Groove puis en 1958 par Plucker.
En 1965 des dépôts furent réalisés de manière industrielle, mais le véritable essor de sputtering naquit de l'invention en 1972 de la cathode magnétron [47].

Les techniques de pulvérisation sont généralement utilisées pour déposer toutes sortes de matériaux : métaux, matériaux réfractaires, diélectriques, céramiques [48].
Selon le type d'alimentation continue ou alternative et selon le type de matériau à déposer [46]. La pulvérisation cathodique continue permet le dépôt de matériaux conducteurs, simples ou composés, sur tous types de substrats.

La particularité de ce procédé est de réaliser le dépôt d'un matériau hors équilibre thermodynamique : l'énergie nécessaire à la réaction est apportée par les espèces ionisées de la phase plasma et non pas sous forme thermique par chauffage comme c'est le cas en CVD [77].

1.2.5.1 Principe de pulvérisation cathodique

Le principe est le suivant : un gaz ionisable neutre ou réactif , tel que l'argon est introduit à faible pression (de l'ordre du Pascal) dans une enceinte de dépôt. La cathode, sur laquelle le matériau à pulvériser est fixé, est reliée au pôle négatif d'un générateur de tension de quelques kilovolts. L'anode, servant aussi de porte substrat, disposée parallèlement à la cible, et reliée à la masse.

Sous l'effet de la différence de potentiel, les ions argon, sont attirés par la cathode , ce qui provoque le bombardement des atomes de la cible et puis le transfère d'une partie de leur quantité de mouvement, les électrons se déplaces vers l'anode (potentiel positif) et entretiennent le plasma. Il s'ensuit une cascade de collisions entre les atomes de la surface. Les atomes de la cible se retrouvent dispersés dans toutes les directions. Une grande partie de l'énergie dissipée dans le solide produit un échauffement de celui-ci. Il se peut aussi qu'un ou plusieurs atomes du solide, suite à ces collisions, se trouvent expulsés hors de la surface.

Ce phénomène, appelé pulvérisation, s'explique par la formation d'une condensation de vapeur métallique. La vapeur ainsi produite traverse le plasma et peut se condenser sur la surface d'un substrat donné et le recouvrir d'un film mince, ce processus s'effectue en

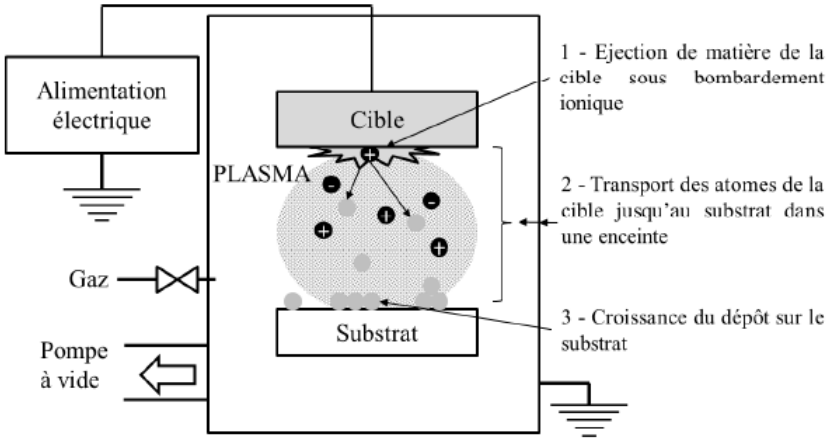


FIGURE 1.9 – Principe de la pulvérisation [49].

trois temps, l'ionisation du gaz d'Ar, le bombardement de la cible et le transfert d'énergie au réseau cristallin de celle-ci.

La pulvérisation cathodique se fait en courant continu et se déroule en trois grandes phases [74] :

1. ***Création d'une vapeur métallique à partir d'une cible*** : De l'argon gazeux est injecté dans le réacteur à flux contrôlé, qui va rapidement former un plasma d'argon sous l'effet d'un champ électrique de forte intensité appliqué entre la cible métallique (cathode) et le substrat (anode). Ainsi, les ions Ar^+ formés vont être attirés par la cible métallique et la « pulvériser », ou créer une « décharge », i.e des atomes métalliques vont être détachés de la surface et se mélanger au plasma.

2. ***Transport au sein d'un réacteur*** : Les atomes du matériau que l'on désire déposer vont se déplacer au sein du plasma, jusqu'à atteindre le substrat.

3. ***Condensation à la surface du substrat à recouvrir*** : Pour la phase de dépôt, les atomes individuels vont simplement venir se déposer sur le substrat.

Les paramètres gouvernant le dépôt de couches minces par pulvérisation qui peuvent modifier considérablement les propriétés morphologiques du dépôt sont :

√ La pression du gaz partiel ;

√ La composition du gaz partiel ;

√ La puissance appliquée sur la cible ;

√ La tension de polarisation du porte-substrat ;

√ La densité de courant ;

√ L'angle d'incidence des particules de bombardement ;

√ La présence ou non des champs magnétiques.

Il existe trois types de pulvérisations cathodiques, suivant le mode de création du plasma ou la nature de la cible (conductrice ou isolante) : la pulvérisation diode (la plus simple), la pulvérisation triode et la pulvérisation cathodique magnétron dont on s'intéressera dans notre étude uniquement à la dernière.

1.2.5.2 Pulvérisation cathodique diode

Polarisation en coutant continu(Direct current) utilisée pour les matériaux conducteurs et semi conducteurs dopés. Après avoir fait le vide dans l'enceinte, on introduit une certaine quantité d'argon pour atteindre une pression d'environ 10^{-1} à 10^{-2}mbar. On applique alors un courant continue entre la cathode (cible) et l'anode. Un plasma d'argon se crée ; le gaz Ar s'ionise et devient Ar^+. Son dispositif est constitué d'une cathode froide, sur laquelle le matériau à pulvériser est fixé, est reliée au pôle négatif d'un générateur de tension de quelques kilovolts. L'anode, sur laquelle se trouve le substrat, est reliée à la masse.

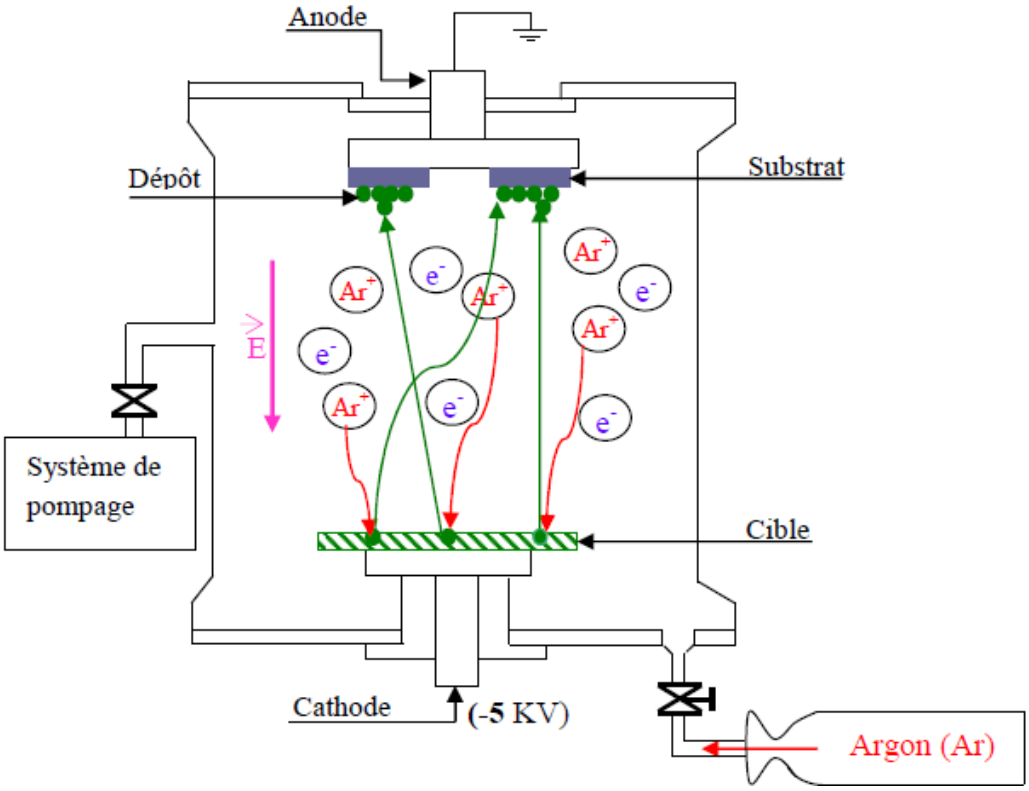


FIGURE 1.10 – Polarisation en à courant continu(DC) [51]

La tension d'attraction des ions est continue ce qui ne permet pas de pulvériser des matériaux isolants ou le traitement d'un substrat isolant.. Le procédé diode DC fonctionne entre 66,77 et 1,3 Pa. Le système est simple mais la vitesse de dépôt est faible.

Le système, quoique simple et de faible cout, est relativement peu efficace car les vitesses de dépôt sont faible, ce mode de pulvérisation ne permet de déposer que des

matériaux conducteurs, et la température de formation de dépôt est élevée (400C).

Polarisation radio fréquence (Radio-Ferquency) utilisée pour les matériaux isolants et semi-conducteurs non dopés . On remplace le champ électrique continu par un champ électrique alternatif à haute fréquence de l'ordre du mégahertz (1 kV crête à crête). En appliquant à la cathode une tension Rf, une tension d'autopolarisation négative se crée à la surface de la cible grâce à la différence de mobilité entre les ions et les électrons, les ions qui ont une faible mobilité ne voient que les potentiels continus (tension d'autopolarisation), alors que les électrons beaucoup plus mobiles suivent les alternances du potentiel Rf d'une électrode à l'autre.

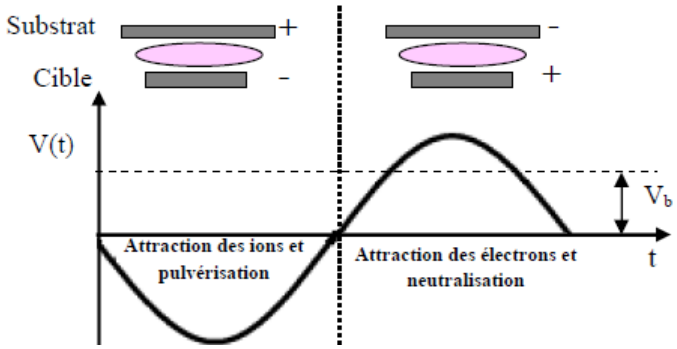


FIGURE 1.11 – Polarisation radio fréquence (RF) [51].

L'avantage essentiel du procédé est de permettre la pulvérisation de n'importe quel matériau, qu'il soit conducteur ou isolant. car dans des systèmes à courant continu les charges électriques des ions positives bombardant la cible s'accumulent à sa surface.

Elles y créent un champ électrique qui repousse les ions du plasma, ce qui a pour effet de réduire considérablement l'efficacité de la pulvérisation. Pour contourner cette difficulté, on utilise une tension de polarisation alternative. Lors de l'alternance négative, la cathodes attire les ions d'argon. Ces derniers pulvérisent la cathode en la chargeant positivement. A l'opposé pendant l'alternance positive c'est les électrons qui sont précipités sur la cible et neutralisent les charges apportées par les ions.

1.2.5.3 Pulvérisation cathodique triode

La pulvérisation triode se distingue de la pulvérisation diode par le fait que le plasma est ici créé et entretenu indépendamment de la cible.
La cathode qui est un filament de tungstène, chauffé à une température de l'ordre de 2500C, émet des électrons qui sont accélérés dans un champ électrique crée par une anode portée à un potentiel électrique. L'émission d'électrons de la cathode W est dirigée vers une anode.
Elle passe auparavant dans un champ magnétique créé par une bobine qui donne a ce flux une trajectoire spiralée augmentant la probabilité de collision avec les atomes d'argon.

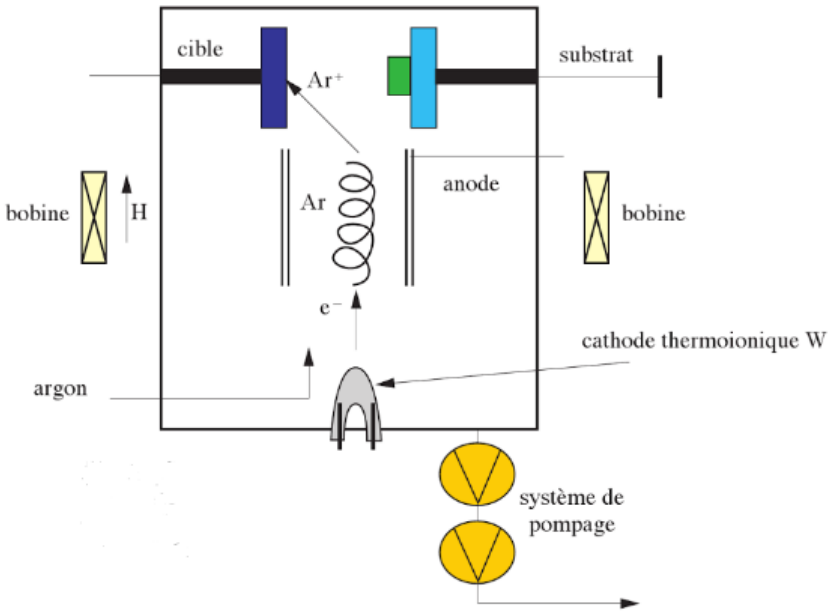


FIGURE 1.12 – Système de pulvérisation triode [46].

Cette technologie permettre de créer un plasma stable et homogène dans la gamme des 10^{-3}mbar ; d'où une amélioration considérable de la vitesse de dépôts, malheureusement son inconvénient majeur est que le filament de tungstène est peu utilisable avec des gaz réactifs et sa durée de vie est courte.

Un tel plasma peut être établi à une pression beaucoup plus basse que la configuration de diode cathodique à cathode froide. Un inconvénient de cette configuration est la densité de plasma non uniforme sur la surface de la cible. Cela conduit à une érosion et à un dépôt inégaux. Depuis l'avènement de la pulvérisation magnétron, cette technique n'est pas très utilisée mais elle est capable de réaliser des taux élevés de pulvérisation.

1.2.5.4 Pulvérisation cathodique magnétron

La pulvérisation magnétron est la méthode la plus utilisée au niveau industriel car elle permet d'obtenir des vitesses de pulvérisation importantes, une meilleure uniformité de dépôts et une bonne reproductibilité.

C'est un perfectionnement de la cathode utilisée en pulvérisation diode classique, qui permet de s'affranchir du filament chaud. Ce perfectionnement résulte de la combinaison d'un champ magnétique intense perpendiculaire au champ électrique créé par la cathode, c'est-à-dire parallèle à la cible.

L'utilisation d'un magnétron joue un rôle important dans le confinement des électrons autour du voisinage de la cible (cathode) et dans l'augmentation de la probabilité de collision des électrons avec le gaz de traitement. Ceci augmente à son tour le taux de création d'ions dans le plasma.

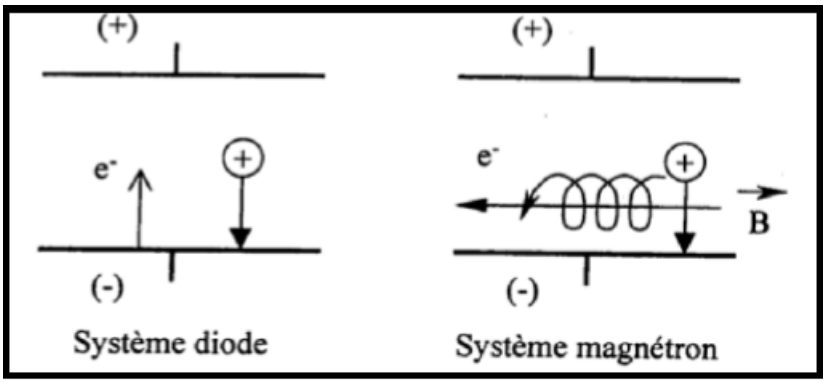


FIGURE 1.13 – Trajectoires électroniques [52].

Principe de fonctionnement Un champ magnétique $\vec{B}$ est produit par des aimants de polarité inverse, (perpendiculaire au champ électrique $\vec{E}$, c'est-à-dire parallèle à la cathode et très pré de celle-ci) afin de piéger des électrons dans des configurations de boucles fermées ; en effet, les trajectoires électroniques s'enroulent autour des lignes de champ magnétique augmentant considérablement le taux d'ionisation des atomes du gaz au voisinage de la cathode. Cela entraîne une vitesse de pulvérisation et donc un dépôt plus important.

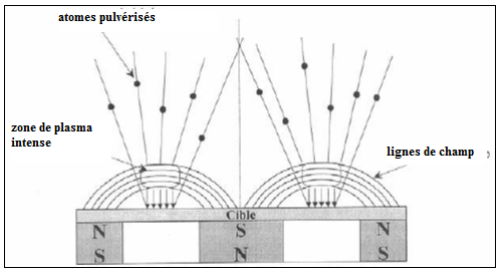


FIGURE 1.14 – Configuration d'une cathode magnétron [53].

Les espèces pulvérisées sont en général électriquement neutres. Elles sont diffusées dans toute l'enceinte et peuvent être orientées vers le substrat selon l'orientation de la distribution de champ magnétique. La qualité mécanique (adhésion) et physico-chimique du dépôt obtenu dépend considérablement des phénomènes produits au sein de ce plasma.

À faible pression, les particules pulvérisées subissent peu de collisions et arrivent sur le substrat avec un angle moyen θ_1 faible, d'où l'obtention d'une structure dense présentant une moindre porosité intergranulaire.

Par contre, sous l'effet d'une forte pression de dépôt, les atomes de la cible pulvérisée subissent de multiples collisions avec les atomes ou les ions d'argon pendant leur trajet et autant de déviations.

En conséquence, ces particules vont se déposer à la surface de la couche en formation suivant une incidence effectuant un angle moyen θ_2 plus grand, conduisant à la formation

de colonnes séparées par des espaces vides dus aux effets d'ombrage et avec une énergie plus faible qui conduit à une diminution de la densité [54].

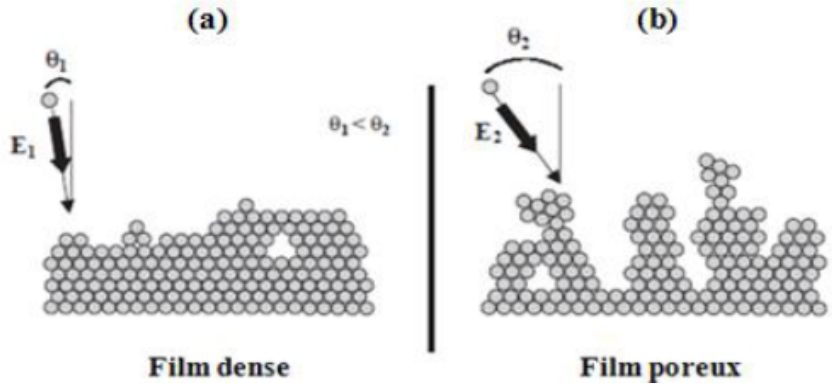


FIGURE 1.15 – Représentation de l'évolution de la microstructure selon l'angle d'incidence θ_i et l'énergie incidente E_i des particules [54].

L'avantage principal de la configuration de pulvérisation de magnétron est qu'un plasma dense peut être formé près de la cathode à de faibles pressions de sorte que les ions peuvent être accélérés du plasma à la cathode sans perte d'énergie en raison de collisions physiques et d'échange de charge.
Ceci permet un taux de pulvérisation élevé avec un potentiel inférieur sur la cible qu'avec la configuration de diode DC.

Cette configuration permet la pulvérisation à de faibles pressions (< 5mTorr), où il n'y a pas de thermalisation des particules de la cathode, ainsi qu'à des pressions plus élevées (> 5 mTorr) où se produit la thermalisation.

1.2.5.5 Types des configurations magnétrons

Il existe deux types de magnétrons. Les magnétrons équilibrés et les magnétrons déséquilibrés. Nous allons dans ce qui suit décrire ces deux configurations :

Magnétron équilibré (balanced magnetron) Si on considère le cas des cibles circulaires. Un magnétron équilibré est constitué d'un aimant central de forme cylindrique et d'un aimant périphérique en forme d'anneau. Les polarités des aimants sont inversées. Les champs magnétiques produits par chacun des deux aimants sont sensiblement d'égale intensité. Les lignes de champ se referment sur elles-mêmes et forment un anneau.

Cette configuration permet un piégeage optimum des électrons et une localisation du plasma près de la cathode.

Magnétron déséquilibré (unbalnced magnetron) Le champ magnétique peut être créé par les aimants permanents, par les électroaimant ou par une combinaison des deux. Lorsque les aimants sont magnétisés différemment, on parle d'un magnétron déséquilibré.

Dans cette configuration l'aimant central produit un champ magnétique d'intensité différente de celui produit par l'aimant périphérique. Les lignes de champ de l'aimant le plus puissant se dirigent vers le substrat (Figure 2.9(b) et Figure 2.9(c)).

Les électrons ne sont plus confinés uniquement dans l'espace cathodique, mais ionisent des atomes du gaz près du substrat.

Cette configuration permet de délocaliser une partie des ions du plasma dans la région du substrat, et ainsi de fournir de l'énergie cinétique aux atomes de la couche durant la croissance du revêtement.

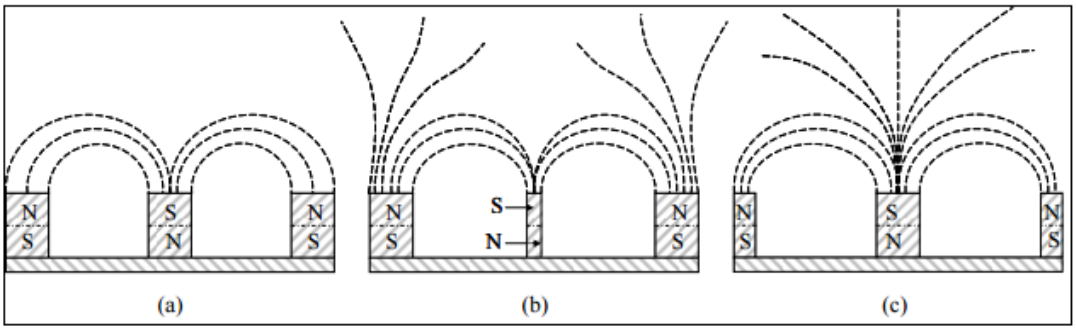


FIGURE 1.16 – Configurations possibles des magnétrons. (a) Equilibré, (b) et (c) Déséquilibrés [45].

1.2.6 Phénomènes d'interaction ion-matière

1.2.6.1 phénomènes au parois

Il s'agissant des interactions plasma-surface en général, les principales réactions entre les espèces du plasma et la surface sont les suivant [55] :

— l'ion peut être réfléchi sous sa forme originelle Ar^+ ou encore sous la forme d'un atome neutre Ar ayant perdu beaucoup d'énergie,

— l'adsorption : l'ion peut être adsorbé a la surface de la cible (adsorption qui peur etre physisorption dans le cas des gaz rares ou chimisorption dans le cas des gaz réactifs.

— l'absorption : l'ion peut être également absorbé dans la cible. Les ions à très haute énergie peuvent donc s'implanter dans les couches superficielles de la cible, en modifier la structure cristalline de manière très localisée et éjecter un atome de la cible,

— la désorption : la libération d'atomes ou d'éspèces par le solide,

— la neutralisation ionique,

— la désexcitation des atomes ou molécules excités à la surface,

— la recombinaison atomique .

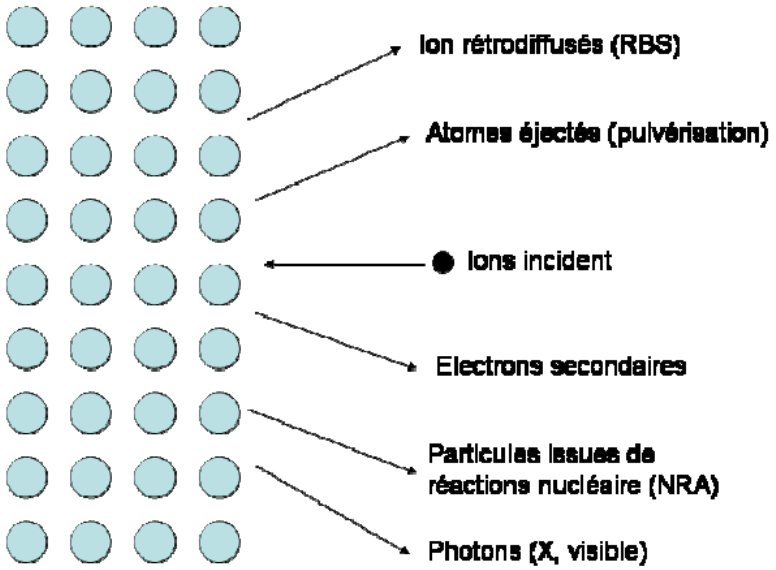


FIGURE 1.17 – Phénomènes d'interaction ion-matière [56].

Comme il est déjà indiqué que la pulvérisation résulte du transfert de la quantité de mouvement des ions vers la cible. il y on a deux régimes de collisions possibles. La figure (1.4) illustre les régimes possibles de collisions selon l'énergie des ions d'Ar :

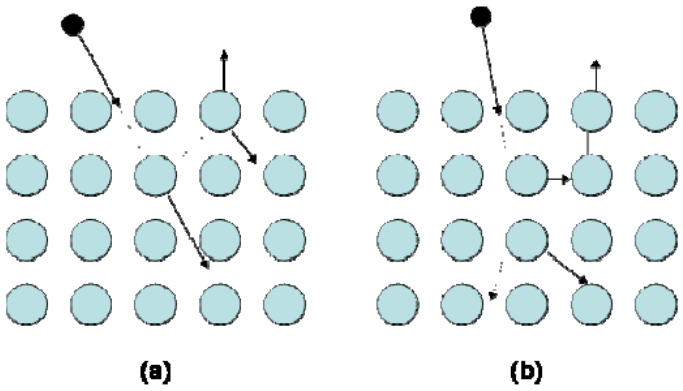


FIGURE 1.18 – Les régimes de pulvérisation par collision simple (a) et cascade linéaire (b) [56].

— Lorsque $E_{Ar^+} < 100$ eV, l'énergie est suffisante pour éjecter des atomes, mais elle ne peut pas provoquer des collisions en cascade.

— Lorsque 100 eV $< E_{Ar^+} <$ 1000 eV, de multiples collisions sont possibles.

• ***Régime de collision simple*** La pulvérisation dans ce régime de simples collisions, est caractérisée par le faible nombre d'atomes mis en mouvement lors du ralentissement de l'ion projectile et la grande sensibilité à l'angle d'incidence.

Cette situation correspond à la pulvérisation induite par des ions de faible énergie cinétique ou par des ions légers (H, He de quelques keV). L'énergie transférée est suffisante pour éjecter les atomes de la cible mais trop faible pour provoquer des collisions en cascade [44].

• ***Régime de cascades collisionnelles*** Dans le régime de cascade linéaire, les collisions entre les particules incidentes, dont l'énergie est comprise entre quelque keV jusqu'à quelques centaines de keV, et les atomes de la cible créent des atomes de recul suffisamment énergétiques qui peuvent à leur tour créer d'autres générations d'atomes de recul [44].

1.2.6.2 Phénomènes à la cathode

Due à la présence d'une chute de potentiel de quelques centaines de volts devant la cathode, les ions positifs sont accélères et bombardent la surface avec une énergie importante. Deux réactions prépondérantes se produisent en conséquence :

• **Émission d'électrons secondaires** : Ce phénomène est induit à la cathode par bombardement de particules énergétiques ou photons.

Lors de la collision entre un ion et une surface, l'éjection d'un ou plusieurs électrons par cette surface peut se produire (ce phénomène peut aussi intervenir lors du bombardement d'une surface par d'autres types de particules, tels que des atomes neutres énergétiques dans leur état fondamental, dans un état métastable ou des photons).

Les électrons émis par la surface entrent alors dans le plasma avec une énergie importante, correspondant à la différence de potentiel entre la surface et le plasma (cas d'une gaine non collisionnelle), variant entre quelques eV et quelques centaines d'eV.
C'esr est un processus essentiel tant pour l'allumage que pour la condition d'auto-entretien des décharges électriques dans des gaz, au moins en ce qui concerne les décharges en courant continu (DC) [55], car ils ionisent les atomes du gaz lors des collisions avec ceux-ci [57].

- **Éjection d'atomes** : Dont une partie en se condensant sur le substrat, constituera le dépôt de film mince.

1.2.7 Transport des espèces pulvérisées dans la phase gazeuse et formation de la couche mince

Après l'étape de pulvérisation, les espèces éjectées de la cible sont transportées dans la phase gazeuse avant de se déposer sur le substrat situé à proximité. Dans les réacteurs à dépôt, les distances cibles-substrats sont généralement de l'ordre de la dizaine de centimètres, ce qui est supérieur aux libres parcours moyens des collisions neutres-neutres dans les conditions opératoires typiques (5 cm à 0.05 cm entre 1 et 100 mTorr).

Les espèces pulvérisées peuvent ainsi entrer en collision avec les atomes, molécules et particules chargées du plasma, ce qui est susceptible de modifier leur trajectoire et leur distribution en énergie ou encore de conduire à leur ionisation [58].

Suivant son adsorption sur le substrat, l'espèce pulvérisée suit une série de processus de surface comme l'illustre la figure(2.12). Tout d'abord, l'atome adsorbé peut, selon la nature des liaisons chimiques qui le tient aux atomes de la surface, diffuser ou migrer d'un point à l'autre de la surface (fig. 2.12b). Il peut aussi soit retourner à la phase vapeur (évaporation) ou bien se recombiner avec d'autres atomes adsorbés, pour former un doublet (fig. 2.12c). Ce dernier peut ensuite être joint par d'autres atomes pour former des triplets, quadruplets et ainsi de suite.

C'est l'étape de la nucléation conduisant à la formation d'îlots (fig. 2.12d et 2.12e). Ces îlots vont ainsi croître en taille et en nombre et peuvent éventuellement s'assembler (coalescence, fig. 2.12g), conduisant finalement à un film continu (fig. 2.12h).

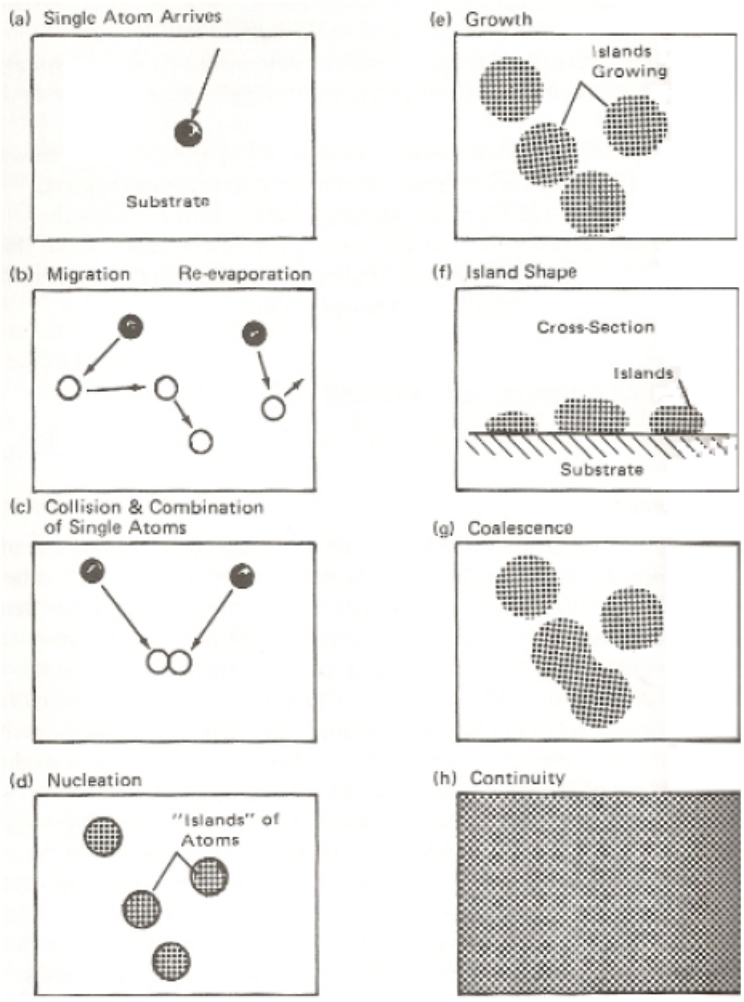


FIGURE 1.19 – Étapes de formation des couches minces [58].

1.2.7.1 Rendement de pulvérisation

Le rendement de pulvérisation, défini par le nombre moyen d'atomes éjectés par ion incident, dépend de la nature de l'ion incident, de son énergie, de l'angle d'incidence, et de la nature des atomes-cible.

L'énergie de l'ion incident doit dépasser un certain seuil pour que la pulvérisation devienne possible. Ce seuil vaut approximativement quatre fois l'énergie de liaison de surface de l'atome-cible.

Dans le régime de cascade linéaire, dans l'hypothèse d'une cible amorphe et de collisions élastiques, la formule de Sigmund permettant de calculer le taux de pulvérisation est [56] :

$$Y_{at/ion} = 3.56\alpha \frac{Z_i Z_a}{(Z_i^{2/3} + Z_a^{2/3})^{1/2}} \frac{M_i}{M_i + M_a} \frac{s_n(\varepsilon)}{U_0} (\cos\theta_{ion})^{-\beta} \tag{1.11}$$

Où :

Z_i et Z_a : représentent les numéros atomiques de l'ion incident et de l'atome cible,

M_i et M_a : sont les masse atomiques de l'ion incident et de l'atome cible (g/mol),

U_0 : est l'énergie de liaison d'un atome à la surface de la cible (eV),

α : est une grandeur sans dimension dépendant du rapport des masses M_a/M_i,

β : exposant dépendant du rapport M_a/M_i,

θ_{ion} : angle entre la trajectoire de l'ion incident et la normale à la surface de la cible.

Le terme $S_n(\varepsilon)$, appelé pouvoir d'arrêt normalisé, est une fonction universelle qui dépend de l'énergie réduite, définie par [56] :

$$\varepsilon = \frac{0.885 a_0}{Z_i Z_a e^2 (Z_i^{2/3} + Z_a^{2/3})^{1/2}} \frac{M_i}{M_i + M_a} E \tag{1.12}$$

Ce rendement va dépendre de nombreux paramètres comme la nature de la cible (matériau, état de surface), du type et de l'énergie des ions incidents, ainsi que de l'angle d'incidence.

1.2.8 Avantage de cette technique

La pulvérisation cathodique magnétron présente de très nombreux avantages décrits dans la littérature parmi lesquels on peut retenir :

◇ la reproductibilité des dépôts, ce qui explique le très grand succès de cette technique dans le milieu industriel,

◇ l'obtention de couches très uniformes par leur aspect et leur adhérence,

◇ des rapports atomiques dans les couches voisins de ceux de la cible.

Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté un rappel sur la définition et les propriétés électriques d'un plasma, les différents modes de création d'une décharge. Nous avons décrit les différentes collisions mises en jeu dans une décharge. Nous avons abordé quelques applications du plasma y compris les techniques de dépôts par voie physique des couches mince. Ensuite, une brève présentation des notions générales sur les couches minces, la technique de pulvérisation cathodique et ses différents types tout en appuyant sur le procédé magnétron ont été présenté.

CHAPITRE 2

SIMULATION SOUS COMSOL MULTIOHYSICS

2.1 Introduction

Dans notre étude, on a étudié un modèle de décharge plasma en courant continu à deux dimensions, à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics® (la version 5.0). COMSOL est un code numérique basé sur la méthode des éléments finis qui permet de résoudre des équations différentielles partielles (PDE) dans les domaines 1D, 2D et 3D. On décrit la méthodologie numérique utilisée dans cette étude. Le logiciel COMSOL MULTIPHYSICS et son mode de fonctionnement seront présentés plus en détail.

Il existe trois modèles généralement utilisées dans la littérature pour modéliser un plasma basse pression hors équilibre. Toutes les modèles implique essentiellement la résolution d'une équation de transport appropriée avec les équations de Maxwell : les modèles analytiques, les modèles fluides, les modèles collisionels - radiatifs.

Dans ce travail, une approche bidimensionnelle (r, z), dépendante du temps du modèle de fluide est utilisée pour décrivez le comportement de deux espèces chargées (des électrons et des ions Ar), dans un réacteur magnétron cylindrique en courant continu (DC). Le transport des espèces chargées est décrite par des grandeurs moyennes, qui sont les solutions des trois premiers moments de l'équation de Boltzmann, qui correspondants aux équations de continuité, transfert de moment et l'équation de transfert d'énergie.

Ce modèle de décharge de plasma magnétron 2D est basé sur un traitement à couplage du modèle de fluide plasma ainsi que les équations d'évolution de champ magnétique.

Pour les simulations numériques, le modèle de fluide présente un avantage en termes de temps de calcul, mais il perd sa validité lors de la diminution de la pression du gaz, de sorte que lorsque le libre parcours moyen des particules chargées dépasse fortement la longueur caractéristique de la décharge.

Bien que les décharges de magnétrons fonctionnent à de faibles pressions (1 à des dizaines de mTorr), la présence du champ magnétique réduit la distance effective parcourue par les électrons entre deux collisions (le mouvement entre deux collisions est une spirale et donc la distance parcourue peut être longue même si la distance entre la collision est petite) [59].

COMSOL Multiphysics est un environnement de simulation et de modélisation de presque toutes les phénomènes physiques. Son point fort : le couplage entre différents phénomènes. Des modules optionnels offre des interfaces spécialisées en acoustique, génie chimique, géophysique, électromagnétisme, transfert de chaleur, MEMS, Plama, Batteries et Piles à Combustible, CFD et mécanique des structures [59].



2.2 Description mathématique du plasma

2.2.1 Le modèle fluide :

Le modèle de décharge où la description du transport des particules est basée sur les valeurs moyennes est appelé modèle fluide. Ce modèle est largement utilisé dans l'étude des plasmas de décharge pour leur adaptabilité et la rapidité de calculs.
Il résout les 3 premiers moments de l'équation de Boltzmann dans le temps et l'espace. Il décrit le plasma en fonction des quantités macroscopiques (la densité, la vitesse moyenne, la pression, le flux de chaleur).

La décharge est modélisée en tant que fluide et les notions microscopiques (vitesse instantanée, section efficace, fonction de distribution etc.. . .) disparaissent au profit de grandeurs physiques moyennes (densité, fréquence de réaction, vitesse et énergie moyenne). .

2.2.1.1 Équations utilisés dans le modèle :

On utilise un modèle à deux fluide.Les équations de fluide de base pour l'électron et l'ion et de l'électron sont écrites ci-dessous. Ils sont décrits par les trois premiers moments correspondants de l'équation de Boltzmann : continuité, transfert de moment et équation moyenne de transfert d'énergie. L'équation de transfert de l'énergie moyenne est prise en compte seulement pour l'électron, alors que les deux autres équations sont considéré pour les électrons et les ions [55] :

Équations pour l'électron • équation de continuité :

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla.\vec{\Gamma}_e = S_e \tag{2.1}$$

Avec :

$\vec{\Gamma}_e = n_e\vec{v_e}$, est le flux des électrons,

• équation de transfert de quantité de mouvement :

$$m_e n_e[\frac{\partial \vec{v_e}}{\partial t} + (\vec{v_e}.\nabla)\vec{v_e}] = en_s(\vec{E} + \vec{v_e} \times \vec{B}) - \nabla\vec{\vec{P}}_e - m_e n_e f_{ms}\vec{v_e}(1 + \frac{f_{iz}}{f_{me}}) \tag{2.2}$$

Avec :

$\vec{\Gamma}_e = n_e < \varepsilon_e\vec{v_e} >$, est le flux d'énergie des électrons,

• équation de transfert de l'énergie moyenne :

$$\frac{\partial n_e\varepsilon_e}{\partial t} + \nabla.\vec{\Gamma}_{\varepsilon e} = -\vec{\Gamma}_e.\vec{E} - \theta_e n_e \tag{2.3}$$

Òu :

n_e la densité de l'électron,

m_e la masse de l'électron,

$\vec{v_s}$ la vitesse moyenne de la particule de fluide,

f_{iz} la fréquence d'ionisation directe des neutres par collisions électroniques,

f_{ms} la fréquence totale de transfert de mouvement pour la collision de la particule de type s-neutre,

$\vec{E}$ l'intensité du champ électrique,

$\vec{B}$ l'induction magnétique,

$\vec{\vec{P_s}}$ le tenseur de pression,

E la charge de l'électron,

t le temps,

ε_e l'énergie moyenne de l'électron (exprimée en eV),

θ_e le taux de perte d'énergie par collision électron-neutre,

Équations de transport des ions Les équations du transport ionique sont dérivées du moment de l'équation Boltzmann ionique en supposant de petites vitesses de dérive par rapport aux vitesses thermiques [78].

• équation de continuité :

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \nabla.\vec{\Gamma}_i = S_i \tag{2.4}$$

Avec :

$\vec{\Gamma}_i = n_i\vec{v_e}$, est le flux des ions,

• équation de transfert de quantité de mouvement :

$$m_i n_i[\frac{\partial \vec{v_i}}{\partial t} + (\vec{v_i}.\nabla)\vec{v_i}] = q_i n_i(\vec{E} + \vec{v_i} \times \vec{B}) - \nabla\vec{\vec{P_i}} - m_i n_i f_{mi}\vec{v_i}(1 + \frac{f_{iz}}{f_{mi}}) \tag{2.5}$$

Avec :

$\vec{\Gamma}_i = n_i < \varepsilon_i\vec{v_i} >$, est le flux d'énergie des ions.

• équation de transfert de l'énergie moyenne :

$$\frac{\partial n_i\varepsilon_i}{\partial t} + \nabla.\vec{\Gamma}_{\varepsilon i} = -\vec{\Gamma}_i.\vec{E} - \theta_i n_i \tag{2.6}$$

En considérant que les deux populations, électrons et ions, sont générés uniquement par collisions d'ionisation directe électron-neutre, les termes source dans l'équation de continuité deviennent :

$$S_e = S_i = f_{iz} n_e$$

.

2.2.1.2 Équations des champs magnétiques et électriques

Le champ électrique et le potentiel plasmatique sont donnés par l'équation de Poisson [78] :

• L'équation de poisson est exprimée comme suit :

$$\Delta V = -\frac{e}{\varepsilon_0}(n_i - n_e) \tag{2.7}$$

$$\vec{E} = -\nabla V \tag{2.8}$$

L'équation (3.7) permet le calcul du potentiel plasma V et l'équation (3.8) permet le calcul du champ électrique nécessaire dans les équations de transfert de quantité de mouvement et de transfert de l'énergie moyenne.

Les relations fondamentales de la magnétostatique sont écrites comme suit :

$$\vec{\nabla}.\vec{B} = 0 \tag{2.9}$$

et

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j} \tag{2.10}$$

Où : **B** désigne l'induction magnétique ou densité de flux magnétique ; **H** désigne le champ magnétique ; **j** est la densité de courant électrique ; ∇ est l'opérateur nabla.
Dans le domaine magnétostatique où aucun courant électrique n'est présent, il est possible de formuler et de résoudre le problème en utilisant un potentiel scalaire magnétique V_m.

Alors l'équation (3.10) peut se réécrire comme suit :

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = 0 \tag{2.11}$$

Dans une région sans courant où $\vec{\nabla} \times \vec{H} = 0$, cela implique que le potentiel scalaire magnétique V_m est peut être défini à partir de la relation ou on peut faire dériver H du potentiel scalaire V_m.

$$\vec{H} = -\nabla.V_m, \tag{2.12}$$

.

En utilisant la relation constitutive qui relie $\vec{H}$ par $\vec{B}$:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + M) \tag{2.13}$$

Avec : M est l'aimantation ;

A partir de cette relation et en remplaçant le terme du champ magnétique H par son expression dans l'équation (3.9), elle devient :

$$-\nabla.(\mu_0 \nabla V_m - \mu_0 M) = 0 \tag{2.14}$$

Et nous utilisons cette équation pour la modélisation de la magnétostatique en l'absence de courant électrique [78].

2.2.2 Méthode des éléments finis

Historiquement les premières prémices de la méthode des éléments finis ont été proposés par Richard Courant dans les années 1940 mais ce sont les mécaniciens qui ont développé et démontré l'efficacité de cette méthode dans les années 1950-1960 Après ces premiers succès pratiques, des mathématiciens appliques ont considérablement d'enveloppé les fondations théoriques de la méthode et proposé des améliorations significative [59] .

Cette méthode consiste à subdiviser le domaine étudié en éléments finis, et approcher l'inconnu dans chaque élément par des fonctions d'interpolation. Ces fonctions sont généralement des polynômes de Lagrange de premier ou deuxième degré. L'interpolation dans un élément est effectuée en fonction de ses valeurs nodales, ce qui impose la continuité de l'inconnu sur les interfaces des éléments [62].

Le principe de la méthode des éléments finis est la transformation de l'équation aux dérivées partielles (EDP) qui régit le problème traité à un système d'équation algébrique dont la résolution permet de définir l'inconnu à un ensemble de points (noeuds) de la discrétisation [61].

2.2.2.1 Types des éléments finis

Selon que le domaine d'étude, soit à une, deux ou trois dimensions, on rencontre le plus souvent des éléments linéaires, quadratiques ou cubiques [62].

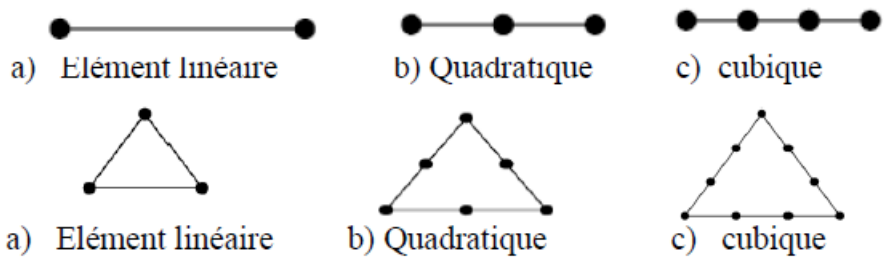


FIGURE 2.1 – éléments classiques en une et deux dimensions [62].

Dans la majorité de cas bidimensionnels, on préfère utiliser des éléments triangulaires du premier ordre. Pour aboutir à une meilleur exactitude de la solution, on procède a raffiner le maillage [62].

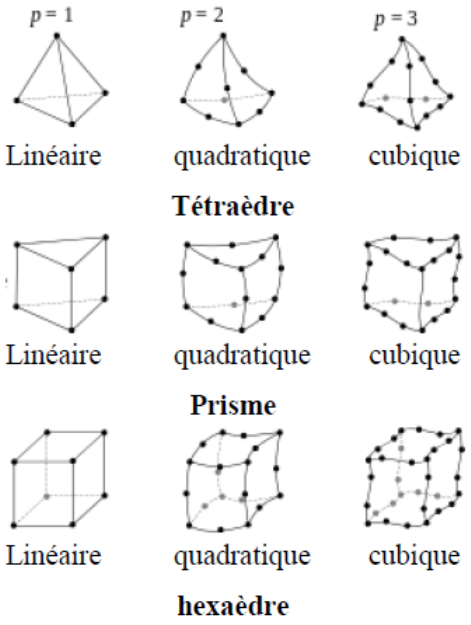


FIGURE 2.2 – éléments classiques en trois dimensions [62].

2.2.3 Introduction à Comsol Multiphysiques

COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. C'est un logiciel multiplateforme (Windows, Mac, Linux).
Il permet de simuler de nombreuses applications en ingénierie, et permet de modéliser une large gamme de phénomènes physiques : l'électrostatique, magnétostatique, électrodynamique l'écoulement de fluides ou encore la déformation des matériaux.
COMSOL est constitué d'un noyau sur lequel viennent se greffer différents modules . Selon le problème étudié, il convient donc de se doter du module adéquat [75]. Dans le cadre de notre étude des décharges magnétrons nous avons utilisé le module «Plasma module» et le modèle « AC/DC module ».

Les différentes étapes du processus de modélisation sont à l'ordre comme suit :

1. Définition de la structure étudiée en 2D (géométrie, dimensions),
2. Définition des propriétés matériaux,
3. Définition des conditions aux limites,
4. Définition du maillage,
5. Choix de la ou des physiques,
6. Choix du domaine d'études temporel fréquentiel ou stationnaire,
7. Résolution et affichage les résultats.

2.2.4 Module de COMSOL

- AC/DC Module
- RF Module
- Acoustics Module
- LiveLink for MATLAB
- Batteries and Fuel Cells Module
- Electrodeposition Module
- CAD Import Module
- Fatigue Module
- CFD Module
- File Import for CATIA V5
- Chemical Reaction Engineering Module
- Geomechanics Module
- Corrosion Module
- Heat Transfer Module
- ECAD Import Module
- LiveLink for AutoCAD
- Electrochemistry Module
- LiveLink for Creo Parametric
- Electrochemistry Module
- LiveLink for Excel
- LiveLink for Inventor [60]

Tous ces modes d'application peuvent être couplés à des simulations multiphysique.

2.2.5 Bibliographies du module Plasma

- Interfaces dédiées pour les types standards de plasma,

• Résolution des termes de Boltzmann d'ordre 2 pour calculer les sources et les propriétés

de transport à partir des données de section efficace,
• Ajout et retrait arbitraire d'espèces, de réactions et de réactions de surface pour décrire la chimie du plasma,
• Définition des sources de réaction à partir des données de section efficace, des coefficients d'Arrhenius, des taux de réaction ou des coefficients de Townsend,
• Calcul automatique des tenseurs des propriétés de transport des électrons et de la conductivité du plasma en présence de champ magnétique statique,
• Import de fichiers au format CHEMKIN® , pour la thermodynamique des espèces et les propriétés de transport

2.2.6 Principe d'utilisation

L'utilisateur définit ses couplages ou sélectionne les interfaces prédéfinies. Les différentes étapes du processus de modélisation : définir la géométrie, les propriétés matériaux, le maillage, choisir la ou les physiques, résoudre et afficher les résultats, sont intégrées dans une seule interface.

Des modules d'applications optionnels offre des interfaces spécialisées notamment en mécanique linéaire et non-linéaire, acoustique, écoulement, transfert de chaleur, Génie chimique, géophysique, électromagnétisme basse et haute fréquence corrosion, Plasma suivi particule optimisation, MEMS, ainsi qu'avec les logiciels de CAO et MATLAB

2.2.7 Utilisation COMSOL

La modélisation des interactions entre plasma et circuits électrique externes est un point clé pour la compréhension des phénomènes de décharge. Le module Plasma fournit des outils pour ajouter des éléments de circuit directement en 1D, 2D ou 3D. Une alternative est l'import dans le modèle d'un circuit électrique au format SPICE [60].
La chimie du plasma est décrite soit par l'ensemble des sections efficaces de collision disponible dans un fichier, soit par la définition en direct des espèces et des réactions.

Le module Plasma inclut une documentation complète sur les modèles suivants :
• Plasma capacitif (CCP),
• Plasma micro-ondes,
• Décharge DC,
• Décharge diélectrique (DBD),
• Générateur de gaz réactif,
• Plasma thermique,
• Gaseous Electronics Conference (GEC) reference cell,
• Analyse de Boltzmann de données.

2.2.7.1 Définition du modèle

Au démarrage de COMSOL nous devons choisir quel type de simulation nous voulons faire.

◇ ***Choix du dimension*** :

Nous choisissons tout d'abord de faire des simulations avec un modèle 2D : Dans le navigateur de modèle, cliquez sur l'onglet **Nouveau**, puis sélectionnez **2D axisymétrie** dans la liste Espace Dimension :

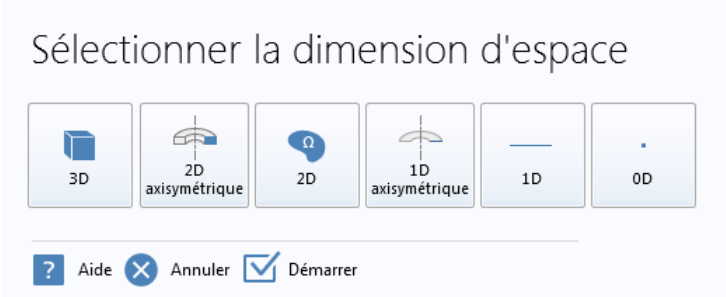


FIGURE 2.3 – Choix de la dimension

2.2.7.2 Définition des paramètres

Nom	Expression	Unité	Description
mueN	$1E25[\frac{1}{(m*V*s)}]$	$s^2.\frac{A}{(kg.m^3)}$	Mobilité électronique réduite
V0	125[V]	V	Voltage appliqué
Wf	5		Fonction de travail
p0	0.5[torr]	Pa	pression de gaz
Br	1.4[T]	T	Densité de flux rémanent

TABLE 2.1 – Paramètres du modèle

2.2.7.3 Géométrie de la structure

La géométrie du réacteur de décharge plasma est de la forme cylndrique, 2D avec une cathode, une anode et un aimant de la forme u . En raison de la symétrie cylindrique du système, seule une image bidimensionnelle est tracée.

1. On commence dans un premier temps de structuré notre réacteur. Dans la fenêtre de construction du modèle, cliquez-droit sur **Géométrie 1** et choisissez rectangle 1, puis dans la fenêtre de réglages on sélectionne les dimensions :

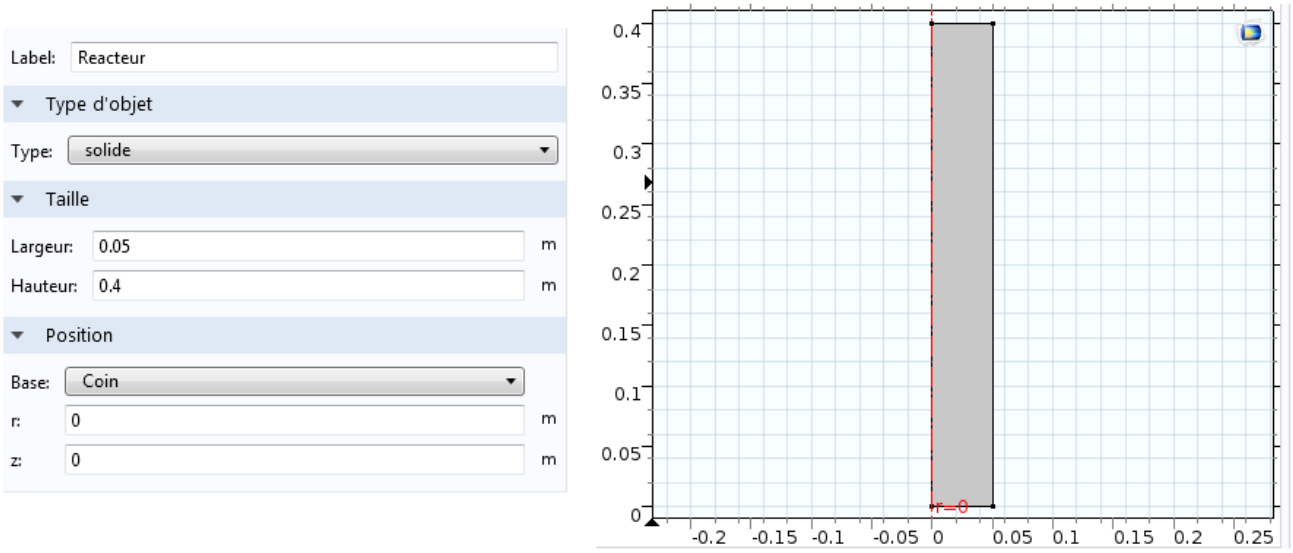


FIGURE 2.4 – Paramètres de la géométrie du réacteur

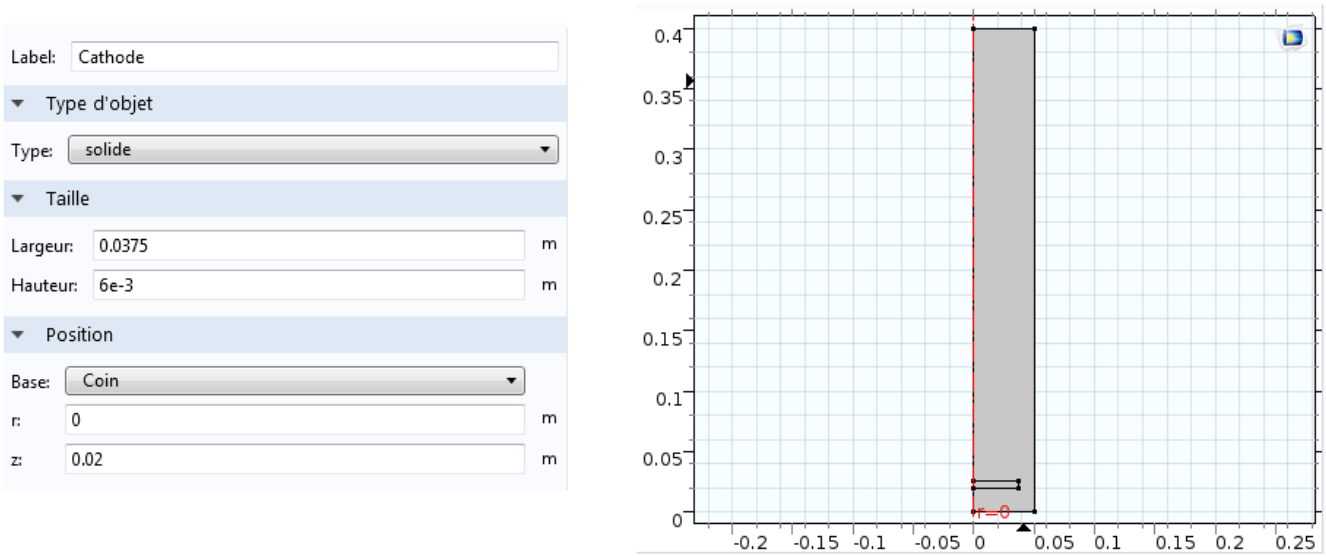


FIGURE 2.5 – Paramètres de la géométrie de la cathode

2. Ensuite on ajoute la cathode, en suivant les mêmes étapes :

3. On ajoute après l'anode, en suivant les mêmes étapes :

4. Dans cette étape, en suivant les mêmes étapes précédentes, on construit l'ensemble de l'aimant permanent. Il est composé de trois géométries, un rectangle et 2 carrés :

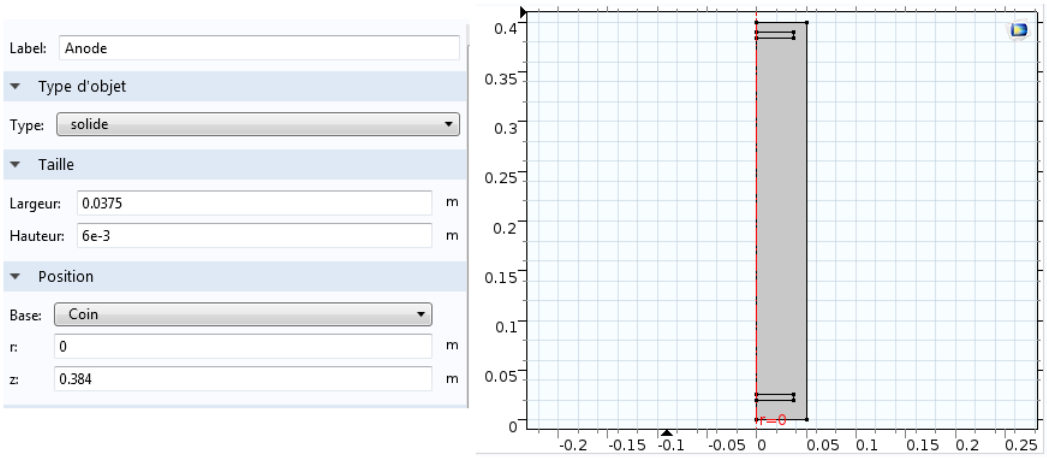


FIGURE 2.6 – Paramètres de la géométrie de l'anode

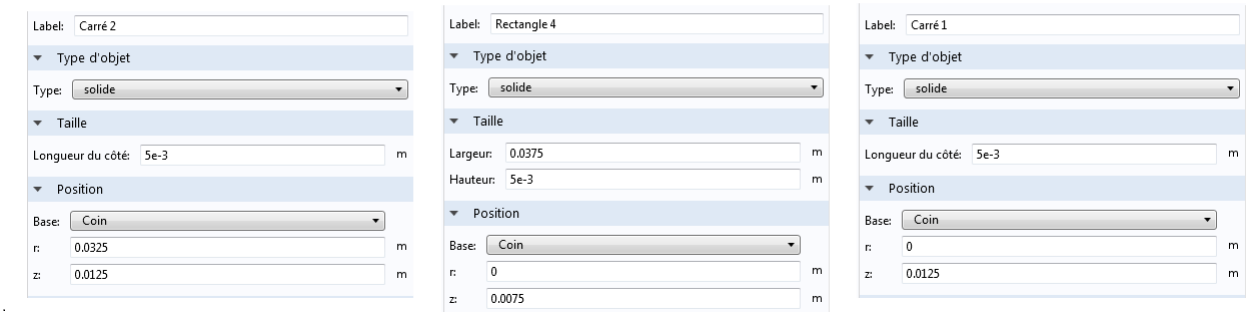


FIGURE 2.7 – Paramètres de la géométrie de l'aimant

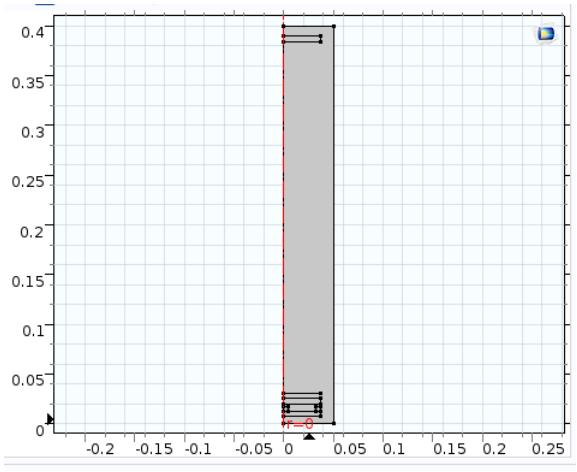


FIGURE 2.8 – Géométrie finale du réacteur

2.2.7.4 Physique du modèle

2.2.7.4.1 Définition du matériau : On défini pour chaque volume le matériau utilisé. On utilise une bibliothèque permettant de définir simplement toutes les constantes physiques du matériau. Pour notre étude on a choisi :

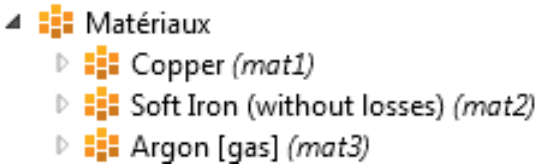


FIGURE 2.9 – Matériaux utilisés

— le gaz d'argon pour la création du plasma,

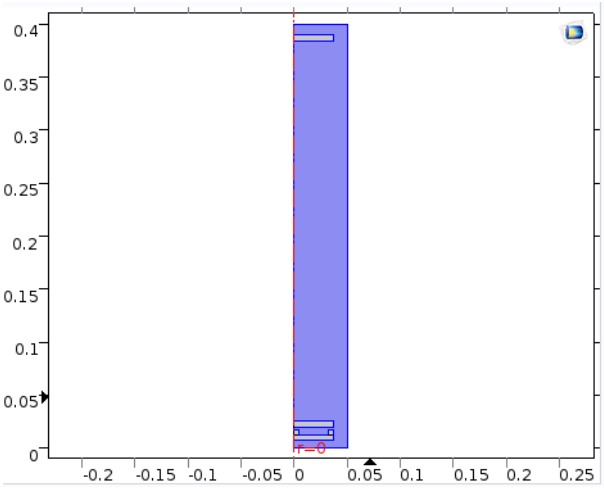


FIGURE 2.10 – Sélection du matériau dans le réacteur

— le fer pour l'ensemble de l'aimant permanent,

— le cuivre pour la cathode,

— l'aluminium pour l'anode,

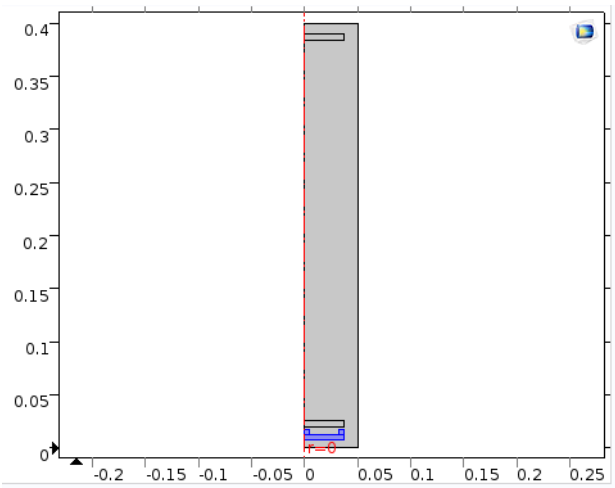


FIGURE 2.11 – Sélection du matériau pour l'aimant

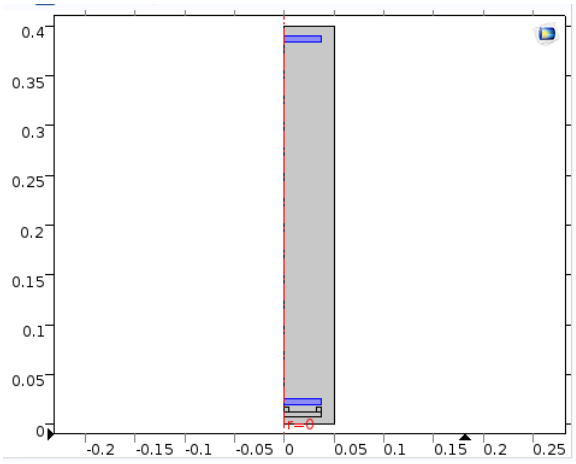


FIGURE 2.12 – Sélection du matériau pour la cathode et l'anode

◇ ***choix de la physique et définitions des conditions aux limites*** :

Au cours de cette étude, deux modules ont été utilisés : un module plasma et un module AC/DC. chaqu'un de ces deux modules présente une liste des interface, permettant la modélisation d'une large de phénomène. En premier lieu on a choisi le modèle plasma, dont le type de décharge que nous désirons l'appliquer est le décharge à courant continu :

— ***Modèle plasma :*** Dans ce cas on a choisi l'interface de décharge DC, Cliquons sur suivant et puis sur terminer.

Comme il est déjà indiqué aux chapitres précédents, Le plasma étudié est celui de d'argon, on importe les sections efficaces, les réactions des différents éléments de l'argon(neutre Ar, ion Ar^+, excité Ars..).

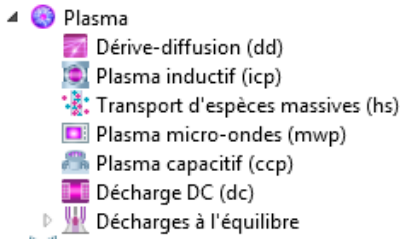


FIGURE 2.13 – Choix de la physique-module plasma-

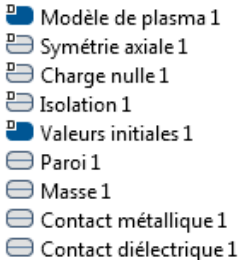


FIGURE 2.14 – Conditions aux limites

Le plasma d'argon est l'un des mécanismes les plus simples à mettre en œuvre à de faibles pressions. Tous les états excités peuvent être regroupés en une seule espèce, ce qui entraîne un mécanisme chimique composé uniquement de 3 espèces et de 7 réactions :

Réaction	**Formule**	**Type de réaction**	$\triangle\varepsilon$**(eV)**
1	$e + Ar \Rightarrow e + Ar$	élastique	0
2	$e + Ar \Rightarrow e + Ars$	excitation	11.5
3	$e + Ars \Rightarrow e + Ar$	superélastique	-11.5
4	$e + Ar \Rightarrow 2e + Ar^{+}$	ionisation	15.8
5	$e + Ars \Rightarrow 2e + Ar^{+}$	ionisation	4.28
6	$Ars + Ars \Rightarrow e + Ar + Ar_{+}$	ionisation penning	-
7	$Ars + Ar \Rightarrow Ar + Ar$	métatable quentching	-

TABLE 2.2 – Tableau des processus chimiques

En plus de réactions volumétriques, les réactions de surface suivantes sont mises en œuvre :

Réaction	Formule	sticking coefficient
1	$Ars + Ar \Rightarrow Ar$	1
2	$Ar^{+} \Rightarrow Ar$	1

TABLE 2.3 – Tableau réactions de surface

— ***Modèle AC/DC :*** Dans notre cas on a choisi l'interface de champ magnétique, courant nul. Afin de représenter le profil du champ magnétique à l'intérieur du réacteur.

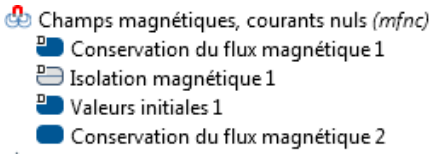


FIGURE 2.15 – Choix de la physique -module AC/DC-

Le calcul des propriétés magnétiques pour chaque point devient très simple avec a méthode des éléments finis et on se basant sur les lois magnétiques de maxwell et d'électromagnétique afin de les représenter en forme géométrique clair et simple.

La loi définie dans la fenêtre "champs magnétiques, courants nuls (mfnc)" est la suivante :

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = -\vec{\nabla} V_m \tag{2.15}$$

Ou V_m est le potentiel scalaire magnétique.

$$\vec{\nabla}.\vec{B} = 0 \tag{2.16}$$

2.2.7.4.2 Maillage : Cette étape sert à définir les volumes élémentaires pour permette la discrétisation du système continu. La dimension de la maille peut être modifiée afin de diminuer le nombre d'élément et de réduire l'utilisation de la mémoire - et augmenter la vitesse de calcul. On pourra aussi affiner le maillage dans les zones de rapide changement, et avoir un maillage plus grand dans les zones se déformant peu. Pour tester si le maillage est 'assez' fin on peut essayer de le raffiner et voir si les résultats changent ou non.Cette étape sert à définir les volumes élémentaires pour permette la discrétisation du système continu.

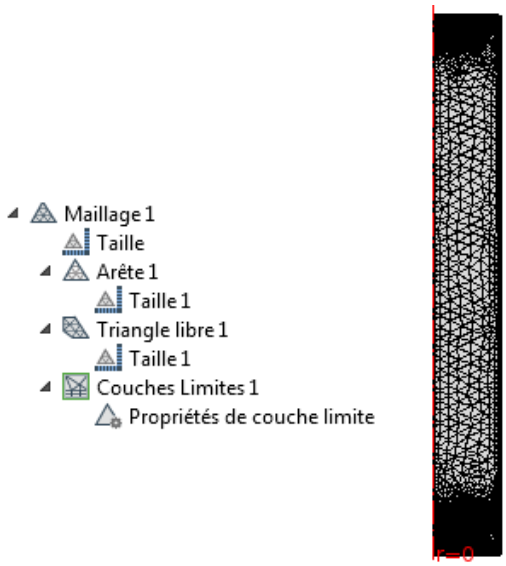


FIGURE 2.16 – Paramètres et représentation du maillage

2.2.7.4.3 Simulaion : On lance la simulation correspondant au modèle sélectionné..

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donnés les différentes étapes pour l'exploitation du logiciel COMSOL multiphysique.
Ce logiciel est peut être utilisé pour résoudre des équations aux dérivées partielles (EDP), en utilisant la méthode des éléments finis en 2D. Cette méthode est exploité grasse à l'interface graphique, qui est utilisé pour spécifier certaines données telles que le domaine, les conditions aux limites, et le maillage de la géométrie.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter et interpréter les résultats obtenus par la simulation numérique, d'une décharge plasma d'argon.Les paramètres de la décharge (potentiel électrique, champ électrique, densités des particules chargées et métastables), ainsi que du champ magnétique, serons discutés.

3.1.1 Création du plasma d'argon

Le potentiel électrique, la densité électronique et la température électronique sont toutes des quantités de l'intérêt. La majeure partie de la variation de chacune de ces grandeurs se produit le long de la longueur axiale du réacteur.

3.1.1.1 Densité électronique

La figure (3.1) montre la densité électronique à 2D dans le réacteur. On remarque qu'il y a une grande production des électrons prés de la cathode. Ensuite elle diminue en approchant de l'anode car les électrons seront freiné a proximité de l'anode et des parois du réacteur.

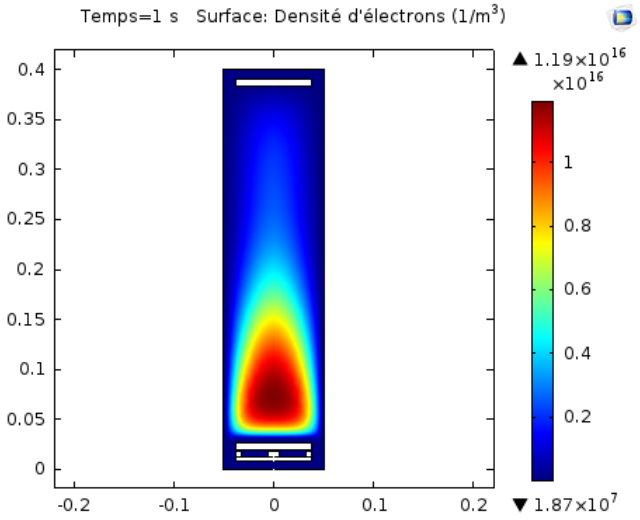


FIGURE 3.1 – Densité des éléctrons

Sur la figure (3.2) on peut constater que la densité électronique diminue rapidement suivant la direction radiale. Cela est causée par une perte d'électrons diffusifs à la surface des murs du réacteur où ils accumulent une charge de surface. L'accumulation de ces charges négatives conduit à un potentiel positif au centre du réacteur par rapport aux parois.

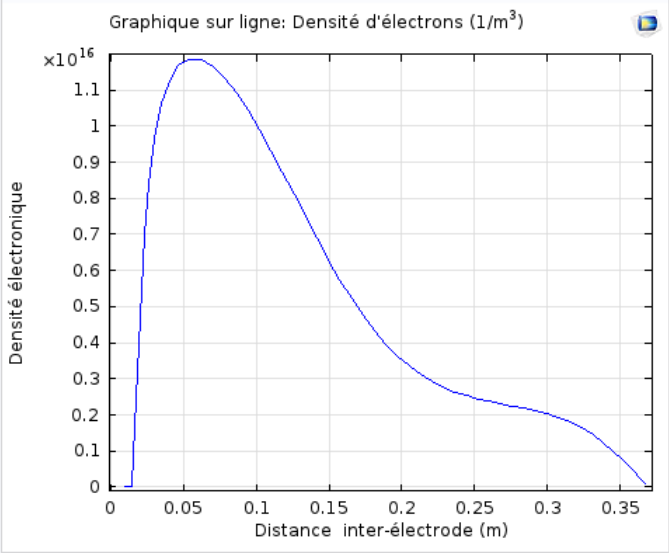


FIGURE 3.2 – Distribution spatiale de la densité électronique

3.1.1.2 Température électronique

D'après la figure (3.3), on remarque que les électrons sont plus énergétiques dans la région prés de la cathode (appelée région cathodique) et atteint une valeur maximale. Cette énergie permet d'accélérer les électrons, dans le sens de la cathode vers l'anode. Au cours de déplacements des électrons, ils perdent leurs énergies en effectuent des collisions endothermique avec les espèces d'argon neutres, ce qui induit le refroidissent des électrons.

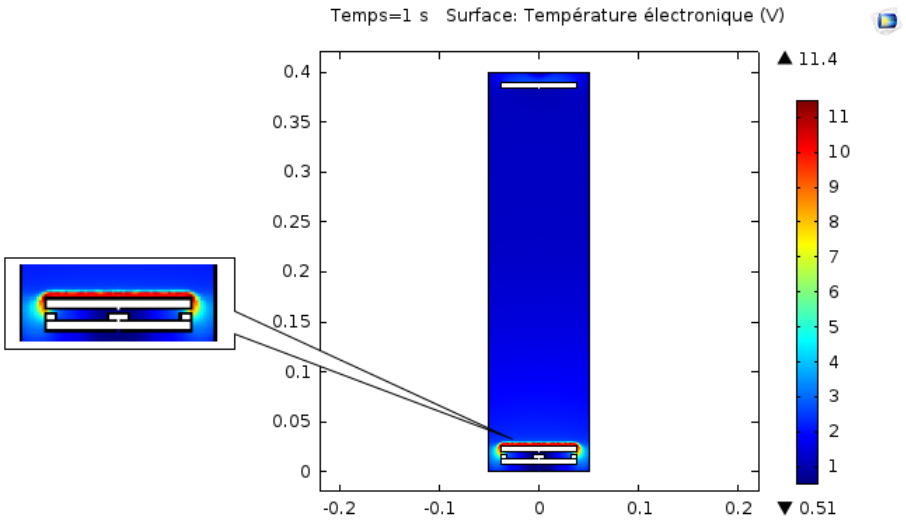


FIGURE 3.3 – Température des électrons le long de la longueur axiale

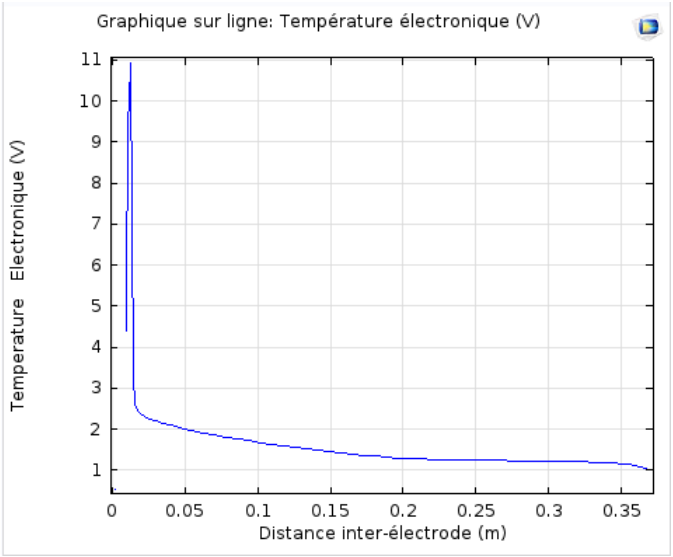


FIGURE 3.4 – Distribution spatiale de la température électronique

Selon la figure (3.4) on peut remarquer qu'à la distance de 0.05 m, la distribution de l'énergie électronique démunie et devient quasi-linéaire et atteint une valeur d'environ 1V. Car lorsque les électrons continuent leurs déplacements vers l'anode, ils cèdent une quantité d'énergie, en effectuant des collisions élastiques et d'ionisation. Ces électrons sont très important pour l'allumage et le maintient de la décharge.

3.1.1.3 Potentiel électrique

La figure (3.5) représente le potentiel électrique de décharge à l'instant $1s$, il est tracé le long de la longueur axiale du réacteur. On peut remarquer qu'il est pratiquement constant dans le volume du plasma et il décroit rapidement aux niveaux des parois et des électrodes.

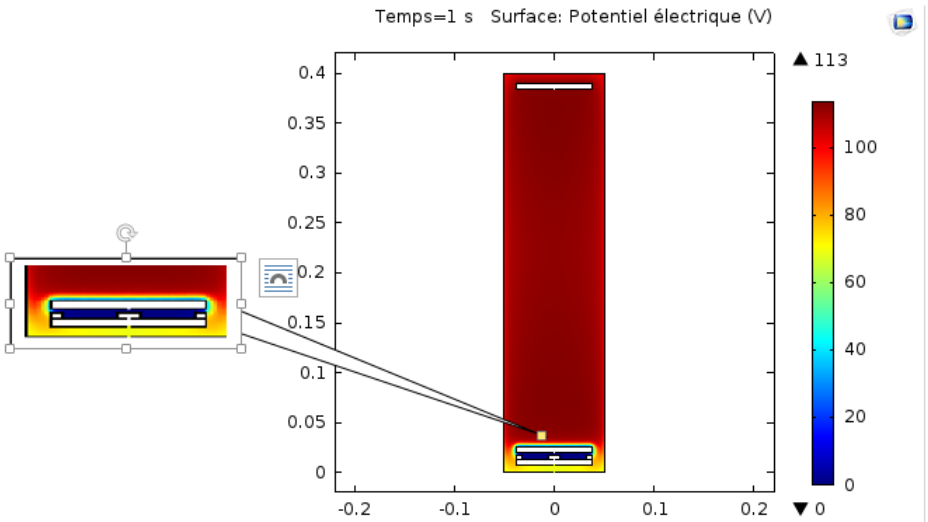


FIGURE 3.5 – Potentiel électrique le long de la longueur axiale

Notons sur la figure (3.6) que le profil du potentiel présente une importante chute de potentiel dans la région de la gaine cathodique cela est due au mouvement des espèces chargées positivement. Cette chute est une caractéristique propre de la décharge.

À la distance inter-électrodes qui égale à 0.01 m, le potentiel électrique devient quasiment constant dans le milieu du réacteur (colonne positive) et la région anodique ou sa valeur dépasse 110 V.

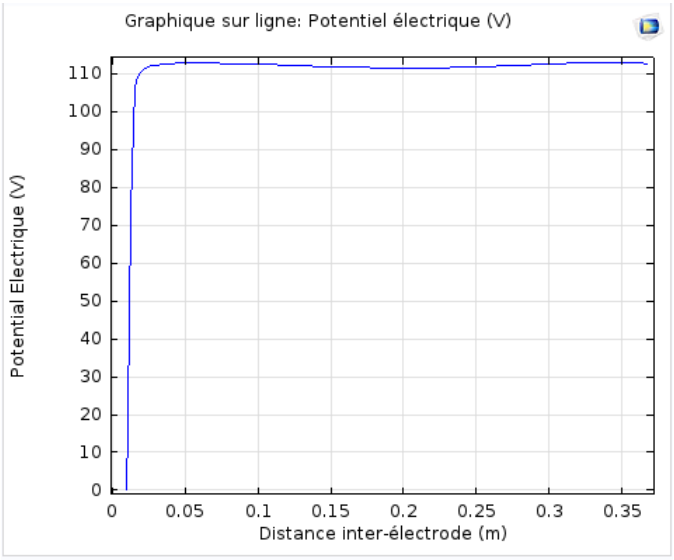


FIGURE 3.6 – Distribution spatiale du potentiel électrique

3.1.1.4 Densité ionique

La figure (3.7) montre l'allure de la distribution spatiale de la densité ionique de l'argon :

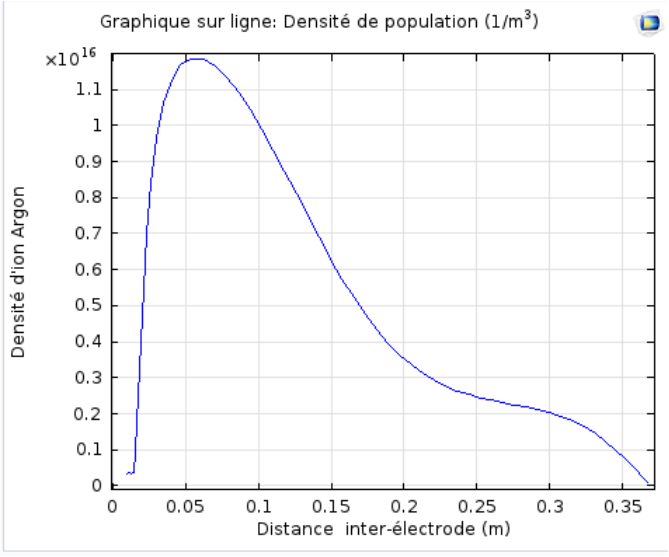


FIGURE 3.7 – Distribution spatiale de la densité ionique Ar^+

On remarque que la densité dans la région cathodique est faible par rapport au milieu du réacteur (à la région dite colonne positive) ou la densité est maximale.
Dans la région cathodique les valeurs de densités ioniques , sont relativement plus élevés par rapport aux celles des densités électroniques.

Cela peut se traduire par le fait que les électrons sont beaucoup plus mobiles et rapides que les ions Ar^+ et s'éloignent alors de la région cathodique.
Puis on remarque qu'au milieu du réacteur, les densités électroniques et ioniques deviennent quasi égales, dans cette zone la mobilité des électrons est réduite, cela est du à cause de leurs interactions avec les ions.

3.1.1.5 Densité de l'argon excité

Sur la figure (3.8), présente la densité de l'argon excité le long de la longueur axiale du réacteur.

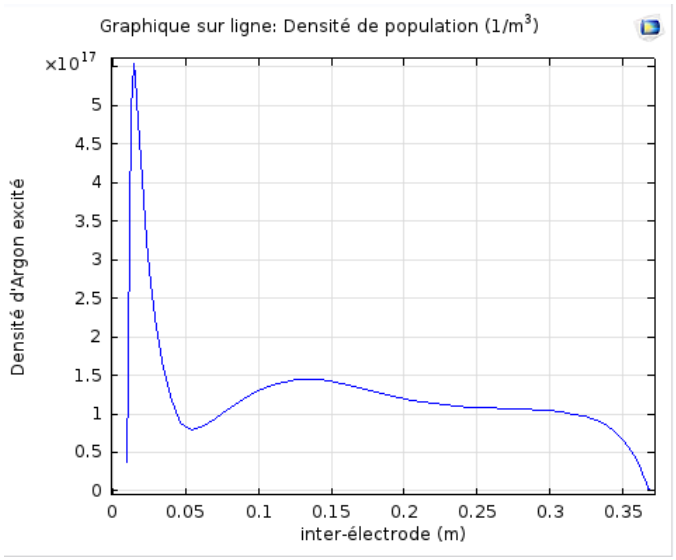


FIGURE 3.8 – Distribution spatiale de la densité de l'argon excité

D'après l'allure du graphe, on remarque qu'il y a une augmentation remarquable prés de la cathode environ ($6.10^{17}\mathrm{m}^{-3}$), cette augmentation est traduite par la production importante des atomes d'argon excité dans la région cathodique. A partir de la distance 0.05(m), elle diminue rapidement jusqu'à elle atteint une valeur de $0.5.10^{17}\mathrm{m}^{-3}$. Après elle reste pratiquement constante à l'intérieur de l'enceinte et tende vers zero prés de l'anode.

3.1.2 Création du champ magnétique

3.1.2.1 Potentiel scalaire magnétique

La figure(3.9) montre les lignes du potentiel scalaire magnétique.

On remarque que les lignes commencent à partir d'une extrémité et se ferment sur une autre dans une géométrie semi-toroïdale, ils se dirigent du pôle nord vers le pôle sud.

On peut dire qu'ils sont denses aux extrémités et entre les branches de l'aimant permanent ils sont faibles. c'est à dire que le champ magnétique $\vec{B}$ est important dans les régions du pôle.

Notant que la forme précise de ces lignes dépend de la forme de l'aimant étudié et cette configuration magnétique est la plus courante utilisée en utilisant des cathodes planes.

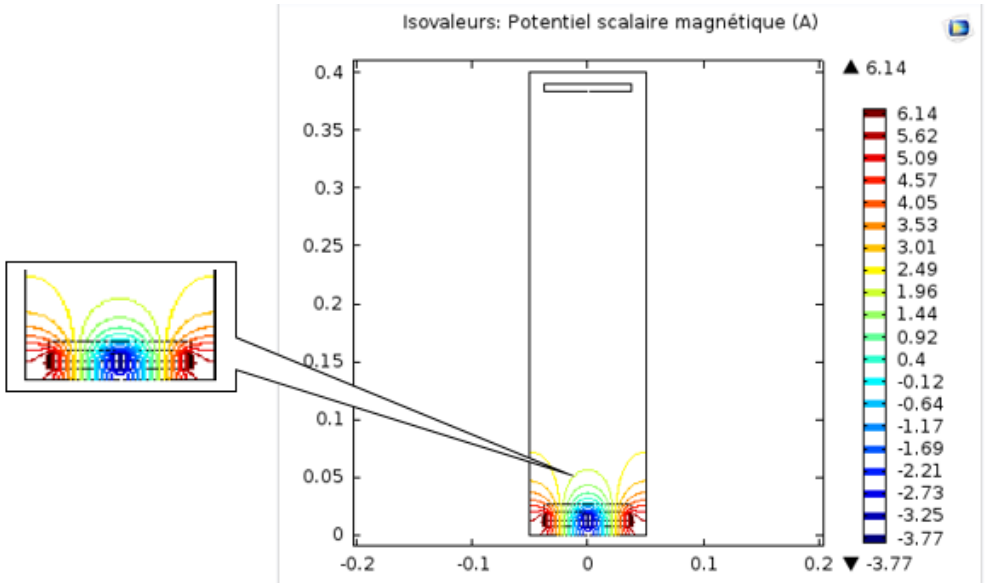


FIGURE 3.9 – Représentation du potentiel scalaire magnétique

3.1.2.2 Densité de flux magnétique

La figure (3.10) montre le profil de l'induction magnétique de l'aimant étudié. On peut constater que la distribution de l'induction magnétique suit la distribution du potentiel scalaire magnétique, car ces deux termes sont liés.

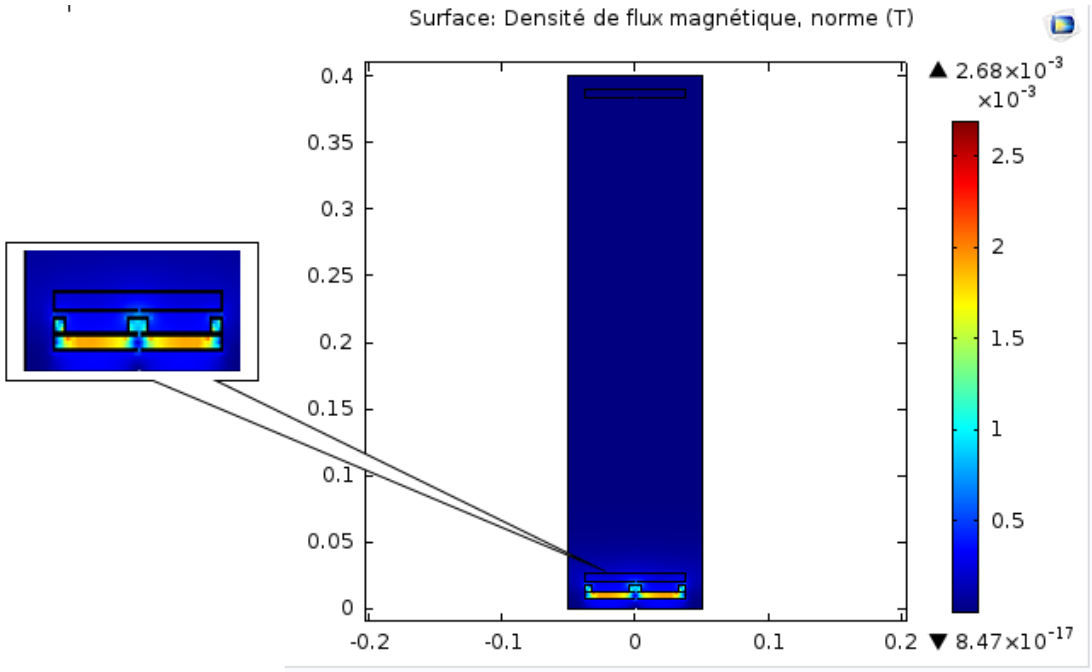


FIGURE 3.10 – Représentation de la densité du flux magnétique

3.1.3 Effet de la géométrie du réacteur sur les paramètres de décharge

Cette partie est consacrée à une vérification de l'effet de la géométrie sur la décharge. Pour mieux comprendre l'influence de la géométrie sur le comportement de la décharge. Nous allons donc varier la hauteur de notre réacteur (de 0.05 m à 0.7 m) de telle sorte que la distance inter-électrodes varie.

Effet de la distance inter-électrodes sur le potentiel électrique

Les figures (3.11) et (3.12), représentent respectivement le profil du potentiel électrique à l'instant t =0.1 ms. On remarque que le profil du potentiel électrique garde presque le même comportement aux niveaux des gaines tout en long de la variation de la distance inter-électrodes :

- Au niveau de la gaine cathodique : une importante chute du potentiel,
- Au niveau de la gaine anodique : reste indépendante de la variation inter-électrodes et atteint une valeur maximale du potentiel.
- Au niveau de la colonne positive : cette zone est dépendante de la distance inter-électrodes, lorsque la distance décroit la largeur de la zone colonne positive se contractée et inversement.

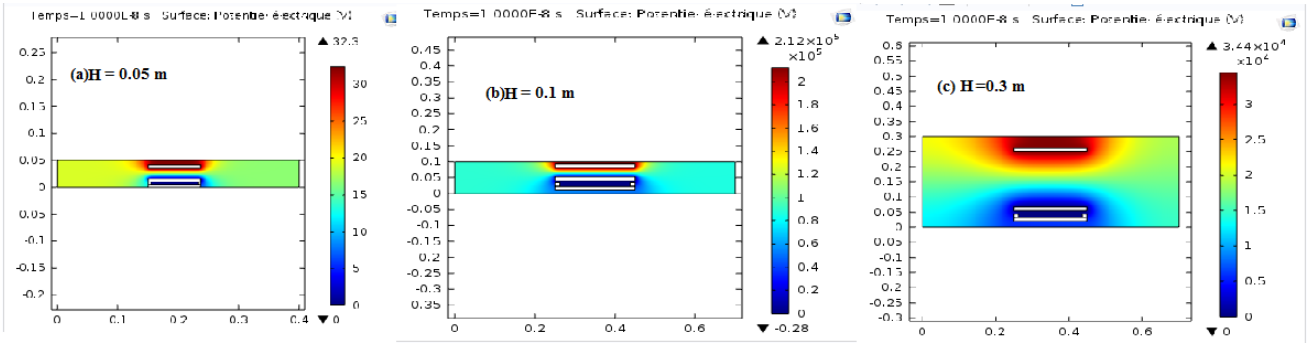


FIGURE 3.11 – Représentation du potentiel électrique(a) (b) (c)

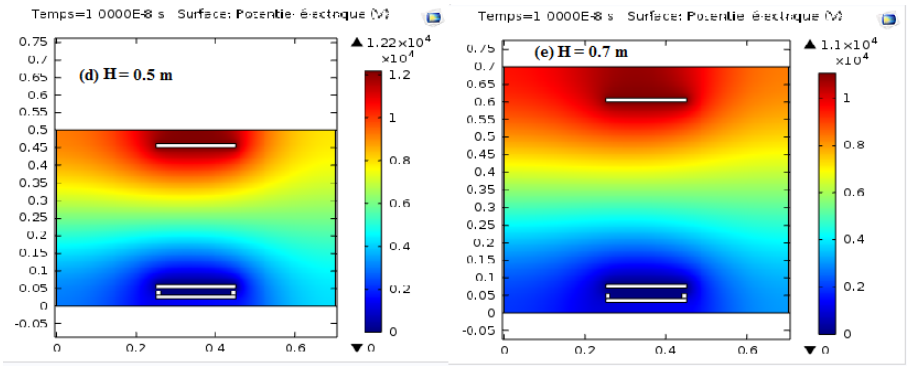


FIGURE 3.12 – Représentation du potentiel électrique(d) (e)

Effet de la distance inter-électrodes sur la densité électronique

Sur la (3.13) et (3.14), on note que les profils des densités électroniques sont dépendants de la variation de la distance inter-électrodes. Plus que la distance inter-électrodes décroit plus que la densité augmente (ce qui est clair sur la figure (3.13.a)).

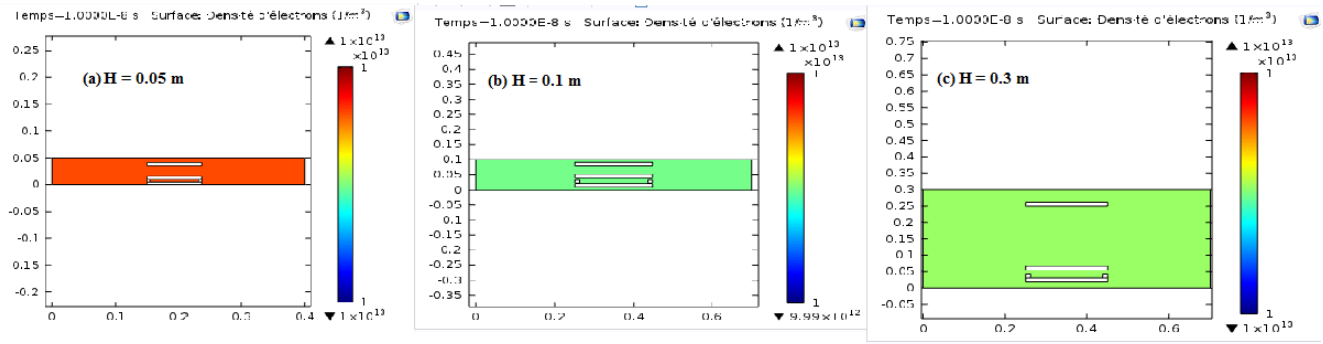


FIGURE 3.13 – Représentation de la densité électronique(a) (b) (c)

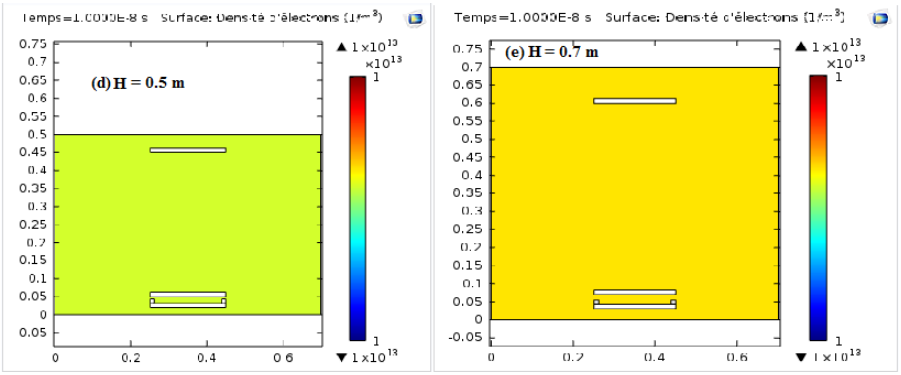


FIGURE 3.14 – Représentation de la densité électronique(d) (e)

3.1.3.1 Effet de la distance inter-électrodes sur la température électronique

Les profils de la température électronique (figure 3.15, 3.16) dépendent de la variation de la distance entre les électrodes. Il présente une faible densité électronique lorsque la distance croit et inversement se densifie quant la distance décroit .

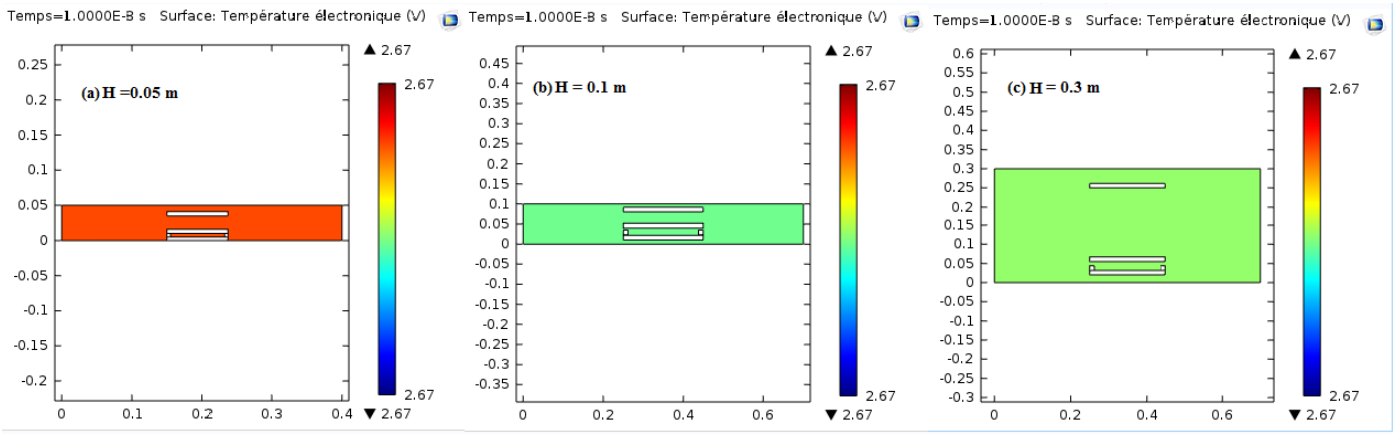


FIGURE 3.15 – Représentation de la température électronique(a) (b) (c)

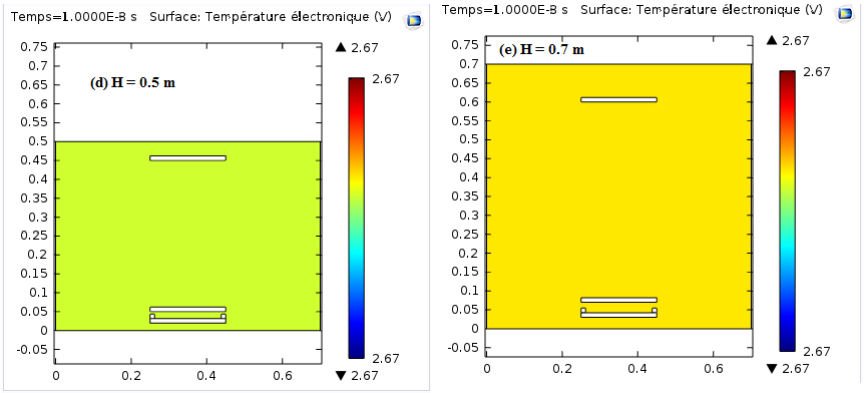


FIGURE 3.16 – Représentation de température électronique(d) (e)

3.1.3.2 Effet de la distance inter-électrodes sur la densité du flux magnétique

les figures (3.17), (3.18), représentent la densité du flux magnétique de l'aimant permanent.
On remarque que cette paramètre magnétique est dépendante durant tout le changement de la distance inter-électrodes.

Plus que la distance entre les électrodes croit plus que l'induction magnétique devient plus dense. Elles sont proportionnelles à la distance inter-électrodes.

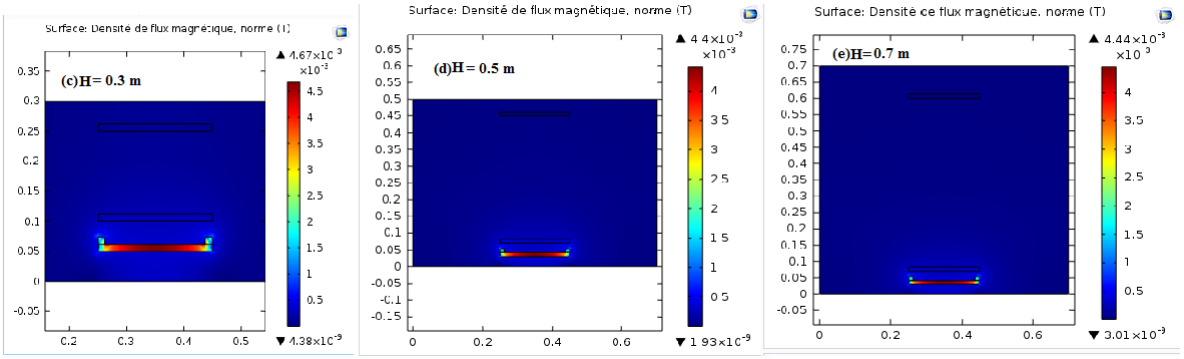


FIGURE 3.17 – Représentation de la densité du flux magnétique (a) (b) (c)

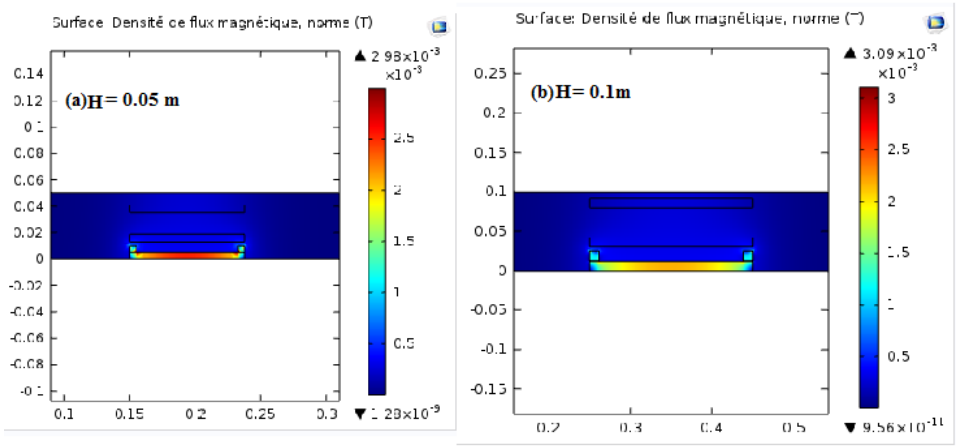


FIGURE 3.18 – Représentation de la densité du flux magnétique(d) (e)

3.1.3.3 Effet de la distance inter-électrodes sur le potentiel scalaire magnétique

Notons sur les figures (3.19), (3.20) que les lignes du potentiel scalaire magnétique de l'aimant permanent sont inchangées aux différentes valeurs de la distance inter-électrodes et gardes la même distribution.

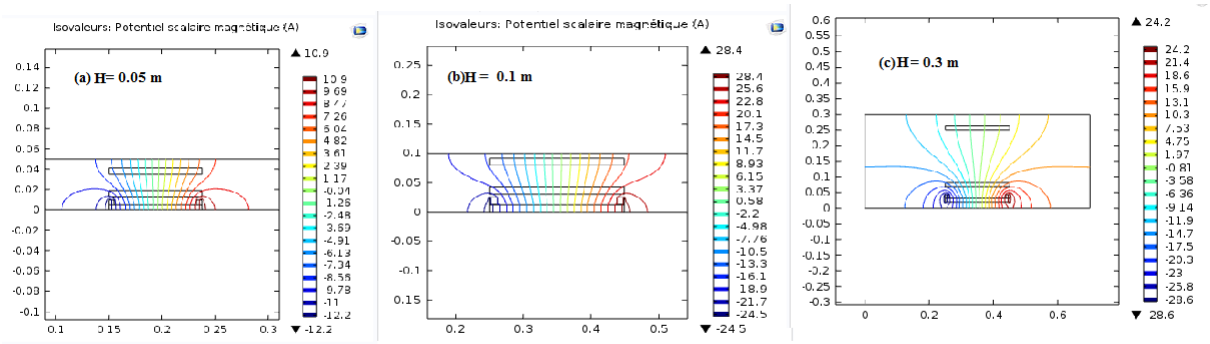


FIGURE 3.19 – Représentation du potentiel scalaire magnétique(a) (b) (c)

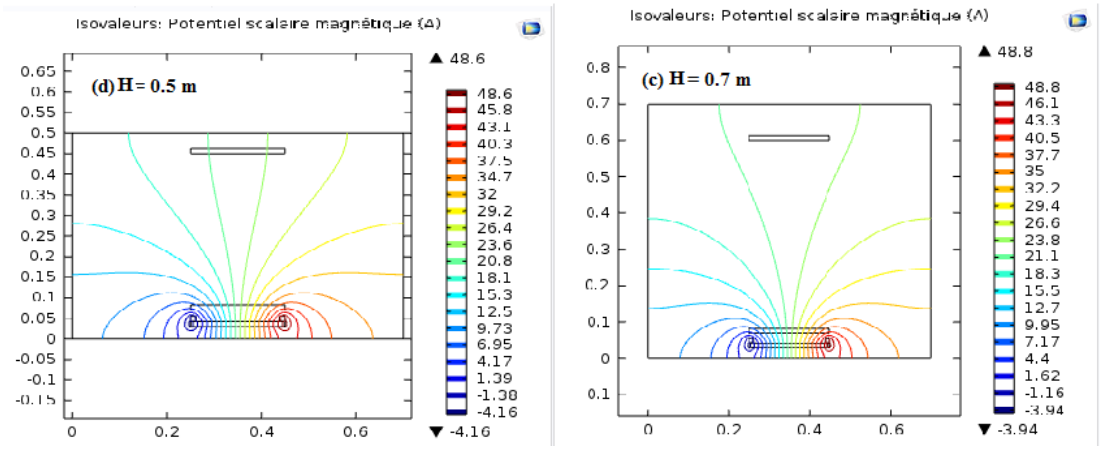


FIGURE 3.20 – Représentation du potentiel scalaire magnétique(d) (e)

Conclusion

Les résultats de la simulation ont été élaborés par le logiciel COMSOL. Dans ce dernier chapitre nous avons validé et traité le modèle proposé, et nous avons présenté les résultats de simulation, on a discutés les distributions spatiales des différentes espèces pressentes dans le plasma d'argon et représenté le profil du champ magnétique d'un aimant permanent à l'intérieur du réacteur.

Dans une deuxième partie nous avons illustré les résultats de simulation en terme de variation dans l'espace inter-électrodes du potentiel électrique, de la densité et tempé-

rature électroniques, du potentiel scalaire magnétique pour l'aimant permanent et son induction magnétique.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Notre travail a pour objectif d'étudier et de modéliser qualitativement un réacteur magnétron en courant continu (DC) à 2D en utilisant le logiciel commercial COMSOL MULTIPHYSIQUE. Les resultats de la simulation nous permettent de déterminer le comportement des différentes espèces d'Argon produites à l'intérieur du réacteur de décharge et les caractéristiques électromagnétiques et géométriques du réacteur.

Dans ce mémoire de fin d'étude, les principaux phénomènes physico-chimiques des plasmas qui interviennent dans un réacteur à décharge, les densités des particules chargées ont étaient discutées, l'établissement des équations du modèle fluide ont étaient déterminées, l'ignition et le maintien du plasma d'argon au sein du réacteur et la représentation des différents paramètres plasmas (potentiel électrique, densité électronique, température électronique, densité des ions d'argon et densité de l'argon excité) ont étaient examinés. Les résultats obtenus dans la première partie sur la décharge plasma on courant continu, indiquent que la densité électronique est faible par rapport à la densité ionique au niveau de la région cathodique. Nous avons remarqué que les densités électronique et ionique deviennent quasi égales au niveau de la région dite colonne positive, c'est à dire au milieu du réacteur ou le plasma est formé. Les profils du champ et potentiel magnétique et densité de flux magnétique ont été étudiés et interprétés dans la deuxième partie. Les résultats obtenus indiquent que la densité de flux magnétique est particulièrement intense dans les régions des pôles et que la distribution de la densité de flux magnétique suit la distribution du potentiel scalaire magnétique, car ces deux termes sont liés.

Le présent travail nous permet lieu d'avoir une maitrise du logiciel Comsol Multiphysics nécessaire pour le développement d'une méthodologie numérique pour simuler le procédé d'élaboration des dépôts physiques des films minces en phase vapeur (PVD), il nous permet également de comprendre l'influence de certains paramètres géométriques du système de pulvérisation et de prédire certaines propriétés de la couche finale. Ces matériaux suscitent un intérêt grandissant pour les nombreuses applications dédiées aux domaines de la micro-optoélectronique et du photovoltaïque. Ce projet nous aussi permet d'acquérir des connaissances de base concernant la physique des plasmas (processus de créations et de pertes des espèces au sein du plasma, grandeurs caractéristiques et les différents types de plasmas et de réacteurs à plasma, notamment ceux basse pression, et leurs domaines d'utilisation.). Aussi, ce travail ouvre la voie à de nouvelles études plus fines. Ainsi dans la perspective de ce travail, nous prévoyant de réaliser un couplage entre

notre code 2D de la décharge magnétron (profil du champ d'induction magnétique crée par deux aimants permanents) avec un code de Monte Carlo. Ce code cinétique permet la détermination les paramètres de transport tels que la mobilité, les coefficients de taux réaction ainsi que les profils des espèces chargées dans les gaz plasmagènes. Car dans la version actuelle du logiciel, la simulation d'une décharge magnétron en tenant compte de tous les phénomènes physico-chimiques qui peuvent avoir lieu dans une telle décharge ne peut pas être supporté par le logiciel vu le grand nombre très élevé de dégrée de liberté du système à étudié.

BIBLIOGRAPHIE

[1] TIBERIU Minea et LEROY Olivier, Décharges magnétron et micro-onde. *Laboratoire de physique des gaz et des plasmas* [en ligne], [consulté le 25/12/2016]. Disponible à l'adresse : http ://www.lpgp.u-psud.fr/.

[2] KELLY PJ, ARNELL RD, « *Pulvérisation magnétron : un examen des développements récents et applications*», Vol. 56, Issue 3, pp. 159-172, (2000).

[3] TLILI Brahim, « *Caratirisation de films durs multicouches élaborés par pulvérisation magnétron influence des conditions d'élaboration sur leurs propriètés*», Thèse de doctorat, Ecole nationale d'ingénieurs de Tunis,(2010).

[4] BENZEGGOUTA Dhafira, « *Etude de procédés de dépôts de films minces par décharge magnétron fortement ionisée*», Thèse de doctorat, Université de Paris-Sud.

[5] AZZAOUI Mohamed, «*Etude de spectroscopie atomique et moléculaire dans un pulvérisateur cathodique magnétron*», Thèse de magistère, université Kasdi Merbah Ouargla, (2013).

[6] CAILLAULT Lise, TIBERIU Minea, « *Simulation PIC-MCC du plasma dans un réacteur magnétron DC en modes équilibré et déséquilibré*», LPGP UMR 8578 CNRS-UPS, Université Paris-sud XI.

[7] H. KIM, D. KWON and N. SIK, « *Development of New Method for Fluid Simulation of Capacitively Coupled Plasma Discharge*», J. Korean Phys. Soc., Vol. 49, pp. 1967-1971, (2006).

[8] CHENG Jia, « *Two-dimensional simulation of inductively coupled plasma based on COMSOL and comparison with experimental data*», Journal of Semiconductors, vol.34, No.6, (2013).

[9] BAHOUH Hanan, «*Modèle fluide d'une décharge plasma radiofréquence*, Thèse de doctorat, université de CONSTANTINE 1,(2014).

[10] HOLLY Zell, *NASA Sun Earth Connection* [en ligne], mars 2006, [consulté le 04/02/2017]. Disponible à l'adresse : *http* : *//www.nasa.gov/mission$_p$ages/themis/auroras/sun$_e$arth$_c$onnect.html*.

[11] CHRISTIAN Sarra-Bournet ,«*Design et réalisation d'un réacteur plasma à pression atmosphérique pour des traitements de surfaces dans le domaine des biomatériaux*, Université Laval, (2007).

[12] V. MARTIN, «*Etude de microdécharges comme source de rayonnement ultraviolet intense*», Thèse de doctorat en physique des plasmas présentée ,Université Paris Sud, (2011).

[13] GUENDOUZ Djillalia, «*Modélisation d'une décharge luminescente entretenue par un terme constant*», Thèse de doctorat ,Université Oran Mohamed Boudiaf, (2012).

[14] BENYOUCEF Djilali, «*Modélisation particulaire et multidimensionnelle des décharges hors équilibre à basse pression excitées par champs électromagnétiques*», Thèse de doctorat, université Paul Sabatier Toulouse, (2011).

[15] M. OLIVIER CHRUSZEZ, «*Caractérisation de maatériau plasma pour la conception de fonctions hyperfrequences*», Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse), (2015).

[16] DELCROIX Jean-Loup, BERS Abraham, «*Physique des plasmas*», Inter Edition, CNRS Edition 20/22, Paris, ISBN 2-7296-0484-7, ISBN 2-271-05126-6, p9, (1994).

[17] XU Yan, «*Fabrication et caractérisation des films CuInGaSe2 par pulvérisation cathodique Etude des défauts par la spectroscopie des pièges profonds par la charge*», Thèse de doctorat ,Université NANTES, (2014).

[18] MATÉO-VÉLEZ Jean-Charles, « *Etude de procédés de dépôts de films minces par décharge magnétron fortement ionisée*», Thèse de doctorat, École nationale supérieur de l'aéronautique et de l'espace, (2006).

[19] BERKANE Amel, «*Modélisation de mécanismes se produisant dans un plasma de dépôt*», Thèse de doctorat, Université Frères Mentouri Constantine, (2015).

[20] PINAULT.M.-A, «*Techniques de dépôt*», Cours Master MATEC – CEDER, (2006).

[21] FLITTI.A, HENNAD.A et BENAIRED N, «*Résolution numérique de l'équation de dérive-diffusion : traitement d'un problème non-linéaire*», Revue de la Technologie avancée CDTA, 19, page 14-24, (2007).

[22] SOKOLOV Dmitry, «*Contributionau développement de la projection thermique à très faible pression*», Thèse de Master, Université Abou Bakr Belkaid– Tlemcen,

(2016).

[23] TARDIVEAU Pierre ,«*Physique des plasmas*, cours, université Paris sud, (2012).

[24] TEBANI Hocine, «*CMODELISATION TRIDIMENSIONNELLE DE LA DECHARGE LUMINESCENTE BASSE PRESSION*», Thèse de doctorat, Université d'Oran Mohamed Boudiaf, (2015).

[25] FRANCOIS De Gaufridy De Dortan, «*Etude de l'influence de l'environnement plasma sur sections efficaces d'excitation collisionnelle electron-ion dans un plasma chaud et dense*», 2003.

[26] TRAVAILLE Grégoire, «*spectroscopie LIBS sans étalonnage .Examen critique et applicabilité a l'analyse de sols pollues*», Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, (2010).

[27] FRIDMAN Alexander, «*Plasma Chemistry*», Cambridge University Press, (2008).

[28] M. A. LIEBERMAN, A. J. LICHTENBERG, «*principles of plasma discharges and materials processing*», John Wiley, New Yor), (2005).

[29] ZEITOUN. «*introduction sur les plasmas*[en ligne], mars 2008, [consulté le 02/12/2016], Disponible à l'adresse : *http* : *//www.zeitoun.net*.

[30] J. SCHULZE, A. DERZSI1 and Z. DONKÔ, «*Electron heating and the electrical asymmetry effect in dual-frequency capacitive CF4 discharges*», Plasma Sources Sci. Technol. 20, 14pp, (2011).

[31] J. M. MEEK, J.D.CRAQQS, (1953)."Electrical breakdown of gases". Oxford : Clarendon Press.

[32] BRAND Ferg, «*PLASMA PHYSICS*» School of Physics ,Université Sydney NSW Australia, (2006).

[33] ASSAF Imene, «*Effet des conditions aux limites sur la propagation du streamer positif dans l'azote* », Thèse de magistère , Université d'Oran Mohamed Boudiaf, (2016).

[34] E. C. I. CASTILLO, «*Étude théorique et expérimentale de décharges électriques à haute pression et faible courant en milieu non-réactif et réactif appliqué à la synthèse d'hydrocarbures*», thèse de doctorat en Sciences des Métiers de l'Ingénieur, pastel-00685101, (2008).

[35] CHABERT Pascal, BRAITHWAITE Nicholas, «*Physics Of Radio-Frequency Plasmas*», Cambridge University Press, (2011)

[36] FAUCHAIS.P, «*Gaz ionisés et plasmas*», Technique de l'ingénieur, AF3560, page 1-27.

[37] JÉRÔME Bredin, «*Développement de diagnostics électrostatiques pour le filtrage magnétique et la formation du plasma ion-ion dans le propulseur PEGASES*», Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Paristech, (2013).

[38] FAUCHAIS.P, «*Understanding plasma spraying*», Journal of Physics D (Applied Physics), T37, 86, (2004).

[39] CHABERT Pascal, RAIMBAULT Jean-Luc, «*Plasmas froids radiofréquence*», Université Paris-sud.

[40] JOHN Harry, «*Introduction to Plasma Technology*», WILEY-VCH Verlag and Co. KGaA, (2010).

[41] ZIRAR Amina, «*Etude de la projection thermique par plasma d'arc*», Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, (2016).

[42] VALETAS Matthieu, «*Couches minces magnétiques pour applications hyperfréquences : étude des Samarium-Cobalt et des Néodyme-Fer-Bore par pulvérisation radiofréquence magnétron*», Thèse de doctorat, Université Limoges,(2003.

[43] BOUHSSIRA Noua, «*Elaboration et Caractérisation des Couches Minces d'Oxyde de Zinc par Evaporation*», Thèse de magister, Université MENTOURI – CONSTANTINE, (2005).

[44] BENCHIHEB Nedjoua, «*Diagnostic d'un Plasma de Procédé de Couches Minces par Pulvérisation Cathodique*», Thèse de doctorat, Université de Mentouri Constantine , (2015).

[45] NOUAR Rafik ,«*Etude et réealisation de couches minces à caractère magnéetique par pulvéerisation cathodique magnéetron. Application pour des capteurs de type GMI*, Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, (2011).

[46] LECH Pawlowski, «*Dépôts physiques : techniques,microstructures et propriétés*», première édition, presses polytechniques et universitaires romandes,CH-1015 Lausanne, (2003).

[47] MANASTERSKI Christian, «*La pulvérisation cathodique industrielle*», Thèse de magister, Université de Mentouri Constantine, (2010).

[48] TAABOUCHE Adel, «*Contribution à l'étude structurale et microstructurale de films ZnO obtenus par ablation laser*», Thèse de magister, Université de Mentouri Constantine, (2010).

[49] SIAD Ahcene ,«*Etude numéerique et expéerimentale de la croissance de couches minces déeposéees par pulvéerisation réeactive*», Thèse de doctorat, école Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, (2016).

[50] HAPPOP.R et HAPPOP.P.S, «*Thin Solid Films 3*», 109 (1969).

[51] FERHATI Fariza ,«*Élaboration de l'oxyde de vanadium V2O5 par APCVD* , Thèse de magistère, Université de Tizi Ouzou, (2011).

[52] C. Nouveau, Thèse de doctorat, ENSAM, Cluny (2001).

[53] INSTITUT Numerique, *Chapitre I. Généralités sur les revêtements PVD* [en ligne], mai2013, [consulté le 18/03/2017]. Disponible à l'adresse :*http* : *//www.institut − numerique.org.*

[54] BEDJAOUI Amina, «*Capteurs à base des couches minces d'oxyde de cuivre (II) (CuO) : Optimisation et modélisation en vue de la détection de gaz*», Thèse de doctorat, Université Aix Marseille et de l'Université de Carthage, (2013).

[55] COSTIN Claudiu, «*Modélisation d'une décharge magnétron DC dans l'argon et en mélanges argon-oxcygène, par un modèle fluide*», Thèse de doctorat, Univrsité paris Orsay, (2005).

[56] JIN Chengfei, «*Dépôts de TaNx par pulvérisation cathodique magnétron à fort taux d'ionisation de la vapeur pulvérisée*», Thèse de magister, Université de Paris-Sud, (2011).

[57] RICHARDT.A et DURAND.A.M, «*Les interactions ions énergétiques-solides* », Editions IN FINE (1997).

[58] MAALOUL Lanoir, «*Dynamique de croissance par plasma RF magnétron des couches minces à base d'oxyde de zinc*», Thèse de doctorat,Université de Montréal, (2015).

[59] GOLANT .V.E.e, AHILINSKI .A.P, SAKHAROV I.E.e., «*Fundamentals of plasma physics*, Wiley , New York, (1980).

[60] *https* : *//www.comsol.com/press − release.* [consulté le 10/01/2017]

[61] HABI Meriem et KHENQAOUI Bouchra ,«*Simulation D'un Electro-aimant*, Thèse de master, univeristé Kasdi Merbah Ouargula, (2015).

[62] DELIMI Ryma, «*méthodes comparées pour le calcul des forces d'origine électromagnétique. application aux paliers magnétiques*, université mentouri – constantine, (2008).

[63] FRIDMAN Alexander , «*Plasma Chemistry*», Cambridge University Press, (2008).

[64] AGOSTINO .R et al., «*Advanced Plasma Technology*», WILEY-VCH Verlag and Co. KGaA.

[65] FRANZ. G, «*Low Pressure Plasmasn and Microstructuring Technology*», ISBN 978-3-540-85848-5, Springer Dordrecht Heidelberg London New York, (2009).

[66] MICHAEL A. LIEBERMAN. ALLAN J. LICHTENBERG, «*Principles of plasma discharges and materials processing*», A John Wiley and sons, INC Publication, 2nd Edition ISBN 0-471-72001- 1, USA, 2005, p 45 .

[67] MICHAEL A. LIEBERMAN, «*A short course on the Principles of Plasma discharges and materials processing*», first edition, John Wiley and Sons, Inc, p24, (2001).

[68] SOLOMENKO et Fedorechenko. A.I, «*High température Dust- leden jets in plasma technology*», Université de Technologie de Belfort-Montbeliard, france, (2009).

[69] BENNANA Yasmina, «*Etude spectroscopique des élargissements Doppler des plasmas lors de la soudure aux lasers*», Thèse de master, Université Kasdi Merbah Ouargla, (2015).

[70] MRAIHI Abderrahmane, «*Réalisation, caractérisation et bilan énergétique de réacteurs corona mono et multi-pointes dans l'air à la pression atmospherique pour application décontamination*», Thèse de doctorat, université de toulouse, (2012).

[71] STERN David.P et MAURICIO Peredo. Disclaimer : The following material is being kept online for archival purposes.In Although accurate at the time of publication, it is no longer being updated. The page may contain broken links or outdated information, and parts may not function in current web browsers. *Electrons, Ions et Plasma L'aurore polaire* [en ligne]. [consulté le 11/04/2017]. Disponible à l'addresse : https ://www-spof.gsfc.nasa.gov/Education/FIelect.html.

[72] BENZEGGOUTA Dhafira, «*Etude de procédés de dépôts de films minces par décharge magnétron fortement ionisée*», Thèse de doctorat,Université de Paris-Sud.

[73] CHELOUCHE Salim, «*Propriétés des fenêtres optiques ZnO :Al pour cellules solaires en couches minces à base de CIGS*», Thèse de magister, Université Ferhat Abbas de Sétif, (2012).

[74] LANTHONY Cloé, «*Modélisation multiéchelle de la structuration des interfaces dans les nanothermites multicouches Al/CuO déposées en phase vapeur*», Thèse de doctorat, Univrsité de toulouse, (2014).

[75] CHOUCHANE Fares, «*Confinement électrique et optique dans la filière GaAs :Ingénierie libre par oxydation sélective et reprise d'épitaxie*», Thèse de doctorat, Université Toulouse III-Paul Sabatier, (2012).

[76] $https://fr.wikipedia.org/wiki/COMSOL_Multiphysics$. [consulté le 10/04/2017]

[77] MORILHAT Alexendre, «*Synthèse de couches minces résistives par pulvérisation cathodique magnétron pour l'élaboration de résistances étalons calculables en courant alternatif*», Thèse de doctorat, Universitétechnologique de Belfort-Montbeliar, (2011).

[78] LU Xie, «*Simulations of plasma sputtering deposition and thin film growth*», Thèse de doctorat, École doctorale énergie, matériaux, sciences de la terre et de l'univers, (2013).