

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

Spécialité : ENTRAINEMENTS ELECTRIQUES

Présenté par
SALAH Abd el wahab
BELHADJAR Ferhat

Thème

Développement d'un modèle électromagnétique sans charge d'une cathode magnétron en vue de sa caractérisation

Mémoire soutenu publiquement le ...12 juillet 2015 devant le jury composé de :

M Hassane MOHELLEBI

Professeur, Université de Tizi-Ouzou, Président

M Saïd TOUATI

Maitre de Recherche, C.R.N.B, Rapporteur

M Saïd TOUATI

Maitre de Recherche, C.R.N.B, Rapporteur

M Samy Hassani OULD OUALI

Maitre de conférences B, Université de Tizi-Ouzou, Examineur

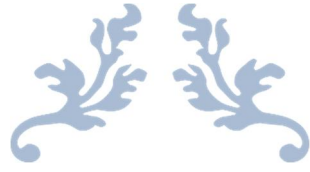
M Prénom NOM

Grade, Lieu d'exercice, Examineur

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier Mr HOCINI Farid notre promoteur maitre de conférence classe B à l'université MOULOUD MAMMERI de Tizi-Ouzou et Mr TOUATI Said maitre de conférence classe A et notre Co-promoteur Mr Mhamed SALHI du Centre de Recherche Nucléaire de Birine, de nous avoir proposés ce sujet, et nous tenons à lui exprimer notre profondes gratitude pour leurs précieux conseils.

Nous remercions vivement le président et les membres de jury pour nous avoir honorés et acceptés d'examiner ce travail.



DEDICACES



Dédicaces

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents.

A mon frère HAMID et sœurs (OUAHIBA et FADHILA, SAIDA, RIMA) et à toute ma famille.

Mes amis (es) de la promotion entraînement électriques 2014 et 2015

Mes amis de ma région (ali KHABO et BEN DIFF tahar, YACIN lyass).

A tous mes amis(es) en particulier mon binôme. RAMDAN (zinga), TALEB Tahar ,smail KARKACHE.

Fouad, Malek et Abdo. et tous les anciens de Oued Aissi (TALBI Faredj, NOUNO,MOUASS Hossine ould oulhadj assem, hassan LARABI. et Saïd SLIMANI , KESSI Mohamed, AZRINE Fawzi ...etc)

Merci

ABD EL OUAHAB (saw)

Dédicaces

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents et Grand parents

A mon frère Mohammed et sœurs (Ouiza et Yasmina) et à toute ma famille

Mes amis (es) de la promotion entrainement électriques 2014(Katia, Djamila, Safia,Thamazgha, Thinhinane,Kahina ,Achour, Mahdi , Hamid , Hafid ,Mouloud , Asseme , Hassan,Menad,Ghilasse, Fatiha) .

Mes amis (es) I.N.S.G (Kahina, Naima, wardia...) et Sporting Club (AI-KI-DO) AMRANI Nassim et maitre Hocine.

Le maitre ACHOUR Rabah tout le groupe du JU JIYU NO MICHI.

A tous mes amis(es) en particulier mon binôme (d'avoir supporté mon caractère) Fouad, Malek et Abdo (copain de chambre) ainsi qu'à ma tres cheres et adorablse amies Imene Souhila et Linda, BOBI (mon voisin) le club des cruciverbistes D86 et tous les anciens de Oued Aissi (TALBI Faredj, RABIA Smail, NONO, TAKILT Redouan , TAGRIT Chabane . HADADI ALI, Moh ISSOLAH KESSI Moh, AZRINE Fawzi ...etc)

Merci

Ferhat



SOMMAIRE



Sommaire

CHAPTRE I : Généralité sur le dépôt de couche mince

I.Introduction :.....	1
II.Définition des couches minces :	1
III.Applications des couches minces :.....	1
IV.Méthodes générales de dépôt de couches minces :	2
IV.1.Dépôt en phase vapeur chimique ("CVD") :.....	2
IV.2.Dépôts physiques en phase vapeur :.....	3
IV.2.1. La pulvérisation cathodique :.....	5
IV.2.1.1.Principe de fonctionnement :	6
a-La polarisation en courant continu ou DC (Direct Current) ...	7
b-La polarisation en courant continu pulsé.....	7
c-La polarisation radio fréquence RF	8
IV.2.1.2.Interactions ions-cible, Pulvérisation et autres phénomènes	8
IV.2.1.3.Pulvérisation de particules neutres	9
IV.2.2.Évolution de la technique de la pulvérisation cathodique à la pulvérisation cathodique magnétron	11
IV.2.3. Pulvérisation triode	11
IV.2.4. Pulvérisation cathodique magnétron.....	12
IV.2.5. Le mécanisme de pulvérisation cathode magnétron	16
IV.2.6. Le libre parcours moyen d'une particule et la thermalisation	18
IV.3 .La raréfaction du gaz	21
IV.4L'effet magnétron.....	21
VI.e plasma	23
VI.1.Paramètres caractéristiques de plasma.....	26
La densité	26
La température.....	26
les longueur caractéristiques	27
Les fréquence caractéristiques	27
Les vitesse caractéristiques.....	27
La grandeur β	27
Ecrantage de Debye	28

paramètre de couplage	28
VI.2.les différents types de plasma	29
1) les plasma spatiaux	29
2)les plasma terrestres.....	29
3)Plasma réactifs	30
4)Plasmas thermiques	30
5)Plasma relativiste.....	30
7)Plasma non collisionnel	31
Conclusion.....	31

CHAPTRE II : Electromagnétisme et physique des matériaux

I.Introduction.....	32
II.Notion fondamentales.....	32
II.1Notion de champ	32
a.Champ électrique	32
b.Densité de charge	33
II.2Densité de courant \mathbf{j}	33
II.3Induction magnétique \mathbf{B}	33
II.4Aimantation \mathbf{M}	34
II.5Champ magnétique \mathbf{H} , perméabilité μ	34
II.6Déplacement électrique \mathbf{D} , champ de polarisation \mathbf{P} permittivité ϵ	34
III.Equations de l'électromagnétisme	35
III.1.Equation de Maxwell	35
III.2.Lois de comportement des milieux.....	36
III.3.Loi d'Ohm.....	36
III.4.Equation de continuité.....	37
III.5.Potentiel vecteur magnétique.....	37
III.6.Potentiel scalaire (en régime statique)	37
IV.Méthode numérique	37
IV.1.Méthodes des éléments finis	38
IV.2.Etapes de résolution par la MEF.....	38
IV.3.Principe de la méthode variationnelle	38
IV.4.Méthode des résidus pondérés.....	39
a)principe de méthode	39

b)Différentes méthode déduites des résidus pondérés	40
V.Formulation élément finis des équations électromagnétiques	44
V.1.Equation magnétostatique	44
VI.Le magnétisme à l'échelle atomique	44
VI.1 Système a plusieurs electron	46
VII.Les types du magnétisme	47
VII.1Le diamagnétisme	47
VII.2Le paramagnétisme de Langevin.....	48
VII.3Le ferromagnétisme.....	50
VII.4Ferromagnétisme et matériaux ferromagnétiques	50
VII.5 domaine magnétiques	51
VII.6 matériaux magnétiques	52
VII.7 matériaux diamagnétiques.....	52
VII.8 matériaux paramagnétiques	54
VII.9Matériaux ferromagnétiques	55
VII.9.1matériaux ferromagnétiques doux	57
VII.9.2 matériaux ferromagnétiques durs	57
VII.10 aimants permanents	58
VII.10.1propriétés magnétiques des aimants	59
VII.10.2variation du champ avec le temps et la température- point de curie.....	60
VII.10.3principaux matériaux constitutifs des aimants permanents.....	60
VII.10.4différents types de micros aimants permanents.....	62

CHAPTRE III : RESULTAT ET INTERPRETATION

Introduction.....	65
I.Présentation de logiciel CAO Maxwell Ansys	65
I.1Difinition de Maxwell Ansys.....	65
I.2Organigramme de fonctionnement de Maxwell Ansys	66
II.Présentation des composants de L'enceinte PVD	67
II.1.L'enceinte PVD sous environnement Maxwell Ansys.....	67
II.2. La cathode magnétron sous environnement Maxwell Ansys	67
III.Les Composantes de la cathode magnétron	68
III.1.Le Port aimant P1	69

III.2.Le Limiteur du champ P2	69
III.3 Les Aimants permanents P3 et P4	71
III.4. La cible P5	71
III.5. Le Couvercle cible P6	72
III.6. Support port Aimant P7	73
III.7. Support cathode P8	74
III.8. cache externe P9	75
III.9 Port substrat P11	76
III.10 La pièce P10«Port substrat ou anode »	76
IV.Résultat et interpretation	77
IV.1.Etude magnétostatique	77
IV.1.1Variation des paramètres géométriques	77
A)Variation du rayon l' aimants P3	77
A.1)La cible P5 en Nickel	77
A.2)La cible P5 en titane	81
B)Variation du rayon l' aimants P4	84
B.1)La cible P5 en Nickel	84
B.1)La cible P5 en titane	89
C)Modification de la pièce P2 « limiteur du champ »	93
D)Modification des matériaux.....	96
V.1.Etude Electrostatique.....	117
IV.Conclusion	118
Conclusion général	
Conclusion général	119



INTRODUCTION GENERALE



Les traitements de surface sont des techniques de revêtement qui ont été utilisées depuis longtemps (dorure de l'antiquité) et ils se sont progressées en fonction et à mesure de développement technologique (dépôt sous vide XX^e siècle).

Le traitement de surface permet d'apporter des propriétés chimiques, mécaniques, optiques, magnétiques et autres plus meilleures que le matériau de base (matériau substrat).

Trois grandes familles de technique nous permettent de traiter des surfaces :

- La peinture, l'application des couches de peinture permet de donner à un objet des propriétés anticorrosion ainsi qu'un aspect visuel agréable (décoration).
- Galvanoplastie/électro-plastie, elle consiste à déposer sur un objet métallique ou non ; à l'aide ou sans l'aide d'un courant électrique, une couche mince d'un autre métal ou d'un alliage métallique dont les propriétés sont différentes de celles du matériau substrat.
- Le dépôt sous vide, il consiste à déposer sur un substrat (métallique/non métallique) une couche mince d'un autre métal/céramique. Avec cette méthode on peut agir sur les paramètres de dépôt pour avoir des couches avec des propriétés et des structures appropriées.

Le dépôt sous vide regroupe plusieurs techniques, dont la plus communément utilisée dans l'industrie est le dépôt physique en phase vapeur « Physical Vapor Deposition ». Il y'a deux grandes familles dans le dépôt par PVD ; le dépôt par pulvérisation cathodique et le dépôt par évaporation.

Le présent mémoire présente une étude sur l'un des composants d'un système de pulvérisation cathodique qui les cathodes magnétron. Un modèle électromagnétique sans charge d'une cathode magnétron a été développé.

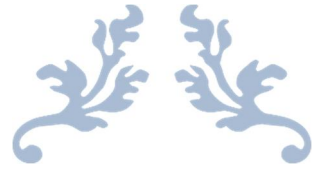
Le mémoire est subdivisé en trois chapitres.

Dans le premier chapitre on présente un aperçu sur le dépôt de couche mince par la méthode PVD et les différentes configurations des dispositifs de pulvérisation

cathodique. De même, une brève description, sur les cathodes magnétrons et leurs utilité dans les systèmes PVD, a été donnée. Les différents paramètres de plasma dans un dispositif PDV ont été également mis en exergue.

Le deuxième chapitre on donne un aperçu sur les fondements théoriques pour le calcul de champs magnétiques et la physique des matériaux. La résolution de l'équation de l'électromagnétisme par élément finis a été expliquée.

Le dernier chapitre on présente la modélisation numérique par le logiciel MAXWELL ANSYS des deux cathodes magnétrons du système de pulvérisation cathodique réalisé par l'unité de recherche UR-MPE/UMBB en collaboration avec le Centre de Recherche Nucléaire de Birine/COMENA. Une étude paramétrique de la géométrie, les distances et les matériaux utilisés dans la cathode a été réalisé par simulation. Les résultats obtenus sont également présenté dans ce chapitre.



CHAPITRE I : GENERALITE SUR LE DEPOT DE COUCHE MINCE



CHAPITRE I : Généralité sur le dépôt de couche mince

I. Introduction :

Pour bien comprendre ce domaine, nous allons présenter des généralités qui vont faciliter à mieux saisir les différents phénomènes de dépôt de couche mince et les diverses méthodes qui existent dans ce domaine.

II. Définition des couches minces :

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 habituellement en nanomètres ou en angströms. Cette très faible distance entre les deux surfaces limites (ce quasi bi dimensionnalité) entraîne une perturbation de la majorité des propriétés physiques. La différence essentielle entre le matériau à l'état massif et à l'état de couches minces est en effet liée au fait que, dans l'état massif, on néglige, généralement, le rôle des limites dans les propriétés, tandis que, dans une couche mince, ce sont au contraire les effets liés aux surfaces limites qui sont prépondérants. Il est assez évident que plus l'épaisseur sera faible et plus cet effet de bi dimensionnalité sera exacerbé, et qu'inversement lorsque l'épaisseur d'une couche mince dépassera un certain seuil l'effet des limites deviendra minime et le matériau retrouvera les propriétés bien connues du matériau massif. Une caractéristique essentielle d'une couche mince est que, quelle que soit la procédure employée pour sa fabrication, elle est toujours solidaire d'un support sur lequel elle est construite. En conséquence, il sera impératif de tenir compte de ce fait majeur dans la conception, à savoir que le support influence très fortement les propriétés structurales de la couche qui y est déposée. Ainsi une couche mince d'un même matériau, de même épaisseur pourra avoir des propriétés physiques sensiblement différentes selon qu'elle sera déposée sur un substrat isolant amorphe tel le verre, ou sur un substrat monocristallin de silicium [1].

III. Applications des couches minces :

La principale particularité d'un matériau en couche mince est en fait de présenter des propriétés de surface différentes de celles du matériau massif correspondant. Une très grande variété de matériaux est utilisée pour produire des couches minces : métaux, alliages, semi-conducteurs, composés réfractaires, polymères. La structure des couches minces peut aussi varier très largement, ce qui explique la grande diversité de leurs applications [1] :

- Microélectronique.
- Optique.
- Revêtements anticorrosion.
- Biotechnologies.
- Isolation thermiques, etc.

IV. Méthodes générales de dépôt de couches minces

L'appellation couche mince est réservée à des films d'épaisseur macaronique ou submicronique. Les principales méthodes utilisées pour fabriquer des couches minces sous vide font appel à la technique de dépôt en phase vapeur chimique (CVD : Chemical Vapor Deposition) et de dépôt en phase vapeur physique (PVD : Physical Vapor Deposition) [2].

IV.1. Dépôt en phase vapeur chimique ("CVD")

Le dépôt en phase vapeur chimique (CVD) est une méthode dans laquelle ou les constituants d'une phase gazeuse réagissent pour former un film solide déposé sur un substrat.

Les composants volatils du matériau à déposer sont éventuellement dilués dans un gaz porteur et introduits dans une enceinte où sont placés les substrats. Le film est obtenu par réaction chimique entre la phase vapeur et le substrat chauffé. Dans certains cas, une élévation de température est nécessaire pour maintenir la réaction chimique. Le CVD est un domaine interdisciplinaire, il comprend un ensemble de réactions chimiques, un processus thermodynamique et cinétique, un phénomène de transport. La réaction chimique est au centre de ces disciplines: elle détermine la nature, le type et les espèces présentes. Il existe deux types de réacteurs: le réacteur à paroi chaude et le réacteur à paroi froide. Dans le cas du réacteur à paroi chaude, ce dernier est chauffé directement, ce qui permet d'opérer à plus faible pression: à peu près 75 mtorr, pour lesquels des dépôts se produisent bien sur les substrats, mais aussi sur les parois (technique LPCVD : Low-Pressure Chemical Vapor Deposition). Dans le cas du réacteur à paroi froide, seul le substrat est chauffé, si bien que la réaction n'est effective qu'au niveau du substrat chauffé; elle se produit à pression atmosphérique. Le principe de cette méthode de dépôt est présenté dans la figure I-1, dans le cas de la paroi chaude [2].

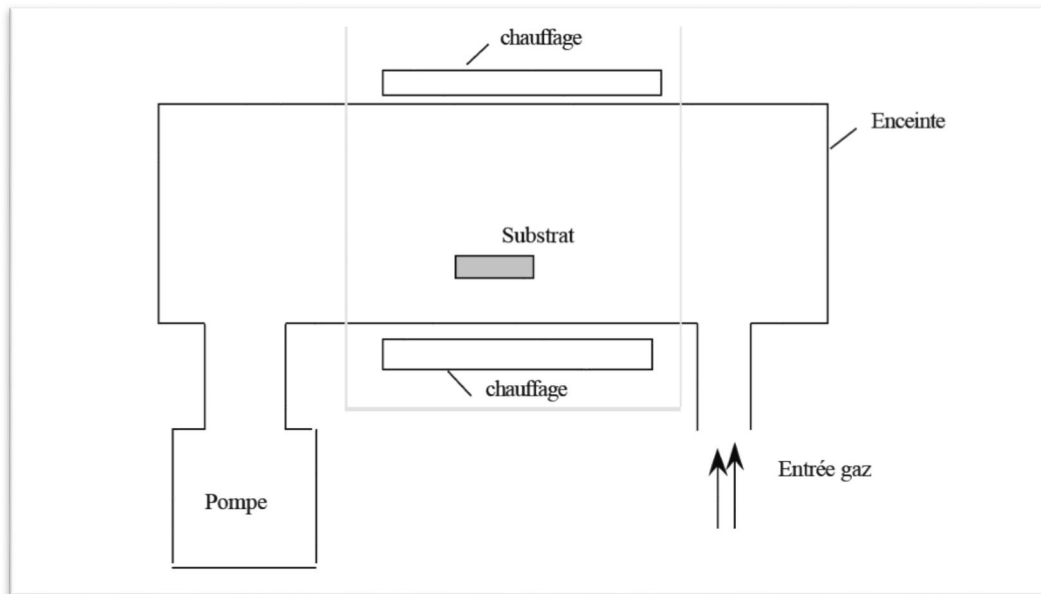


Figure I-1 Schéma de principe de dépôt en phase vapeur chimique (CVD), réacteur à parois chaudes [2]

La réaction chimique peut être activée à l'aide d'un plasma. Cette méthode s'appelle "CVD plasma" ou PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition). Dans ce cas, il y a création en plus de particules énergétiques.

La fabrication de couches minces métalliques grâce à ces méthodes s'est particulièrement développée ces dernières années. Les avantages de ce procédé sont les suivants : il est facile d'obtenir un assez grand nombre d'éléments ou de composés chimiques.

On obtient une bonne qualité des couches, un excellent recouvrement des marches, et une bonne adaptabilité dans une chaîne de production. De plus, elle offre la possibilité de réaliser des dépôts sélectifs, ce qui permet d'éliminer une étape de gravure et de planarisation de la surface. Les inconvénients sont les suivants : les films sont peu denses, ils sont souvent contaminés par des gaz très réactifs issus de la réaction chimique (hydrogène, fluor, chlore...), tous les matériaux ne peuvent être déposés par CVD, et le système de dépôt est une mise en œuvre relativement lourde [2].

IV.2. Dépôts physiques en phase vapeur

Les techniques de dépôts physiques en phase vapeur, appelés PVD (en anglais : Physical Vapour Deposition), sont des techniques d'élaboration de couches

CHAPITRE I : Généralité sur le dépôt de couche mince

minces. Elles peuvent être divisées en plusieurs parties selon le procédé mis à profit pour l'obtention de la couche mince :

- ✓ La pulvérisation cathodique et sa variante, la pulvérisation cathodique magnétron
- ✓ L'évaporation par faisceau d'électron
- ✓ Le bombardement ionique
- ✓ Le dépôt par arc

Dans toutes ces techniques le principe de base est d'élaborer une couche mince à partir d'un matériau massif (voir Figure I-2). 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 [3].

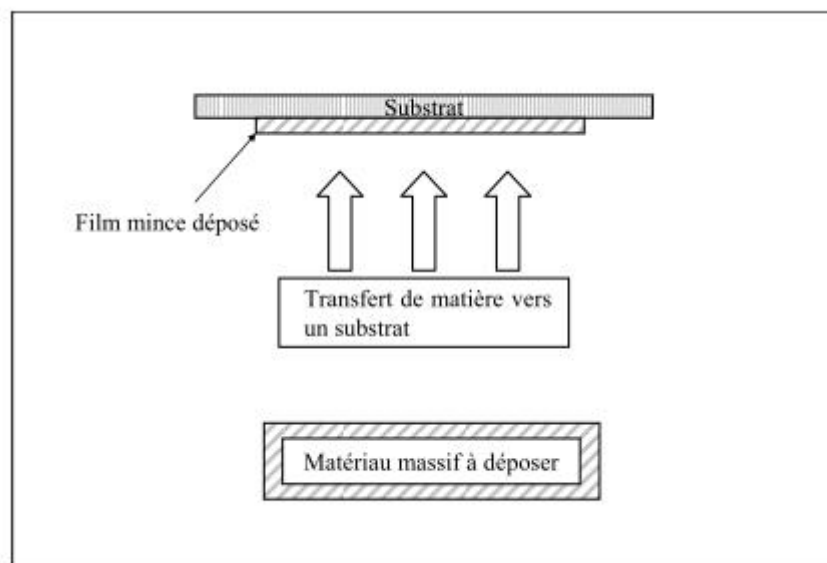


Figure I-2 : Schéma de base de l'élaboration d'une couche mince par dépôt physique en phase vapeur [3]

Les techniques se différencient par le procédé qui permet d'arracher les atomes à déposer de la cible, ainsi que par la nature du milieu présent entre la cible et le substrat. L'utilisation de l'une ou l'autre de ces techniques est généralement conditionnée par l'application visée, la nature du matériau à déposer, le coût, ainsi que la pureté et la qualité de la couche obtenue, et enfin la vitesse de dépôt souhaitée[3].

CHAPITRE I : Généralité sur le dépôt de couche mince

Dans cette partie nous allons nous intéresser plus particulièrement à la pulvérisation cathodique et sa variante la pulvérisation cathodique magnétron qui est la technique utilisée durant notre travail de thèse[3].

IV.2.1 La pulvérisation cathodique

La pulvérisation cathodique, est une technique de dépôt en couches minces. Les étapes de la formation d'une couche mince par pulvérisation cathodique sont :

1. La pulvérisation des espèces à déposer à partir d'une cible par bombardement ionique.
2. Le transport des espèces pulvérisées, sous forme de vapeur, vers le substrat.
3. La condensation de la vapeur sur le substrat et la formation de la couche La pulvérisation cathodique magnétron est une amélioration de la pulvérisation Cathodique simple.

Un réacteur de pulvérisation cathodique simple est schématisé sur la Figure I-2. Il est constitué de :

- ✓ Une enceinte de pulvérisation (E)
- ✓ Une cible constituée de l'élément ou de l'alliage à déposer, elle fait également office de cathode
- ✓ Un porte substrat sur lequel sont disposés les substrats à revêtir
- ✓ Un système de pompage destiné à abaisser la pression à l'intérieur de l'enceinte
- ✓ Un système d'injection de gaz destiné à contrôler la pression et la nature du ou des gaz présents dans l'enceinte
- ✓ Un générateur DC ou RF affecté à la cible, destiné à générer un plasma dans l'enceinte pour pulvériser la cible
- ✓ Un générateur DC ou RF affecté au porte substrat, destiné à décaper le substrat avant l'étape de pulvérisation et / ou à apporter de l'énergie au film mince durant sa croissance
- ✓ Un système de refroidissement affecté à la cible : Permet de préserver la cible d'un échauffement excessif durant sa pulvérisation

CHAPITRE I : Généralité sur le dépôt de couche mince

- ✓ Un dispositif de refroidissement ou de chauffage affecté au substrat : destiné à en contrôler la température durant la croissance des films
- ✓ Un cache amovible permettant une pré-pulvérisation de la cible

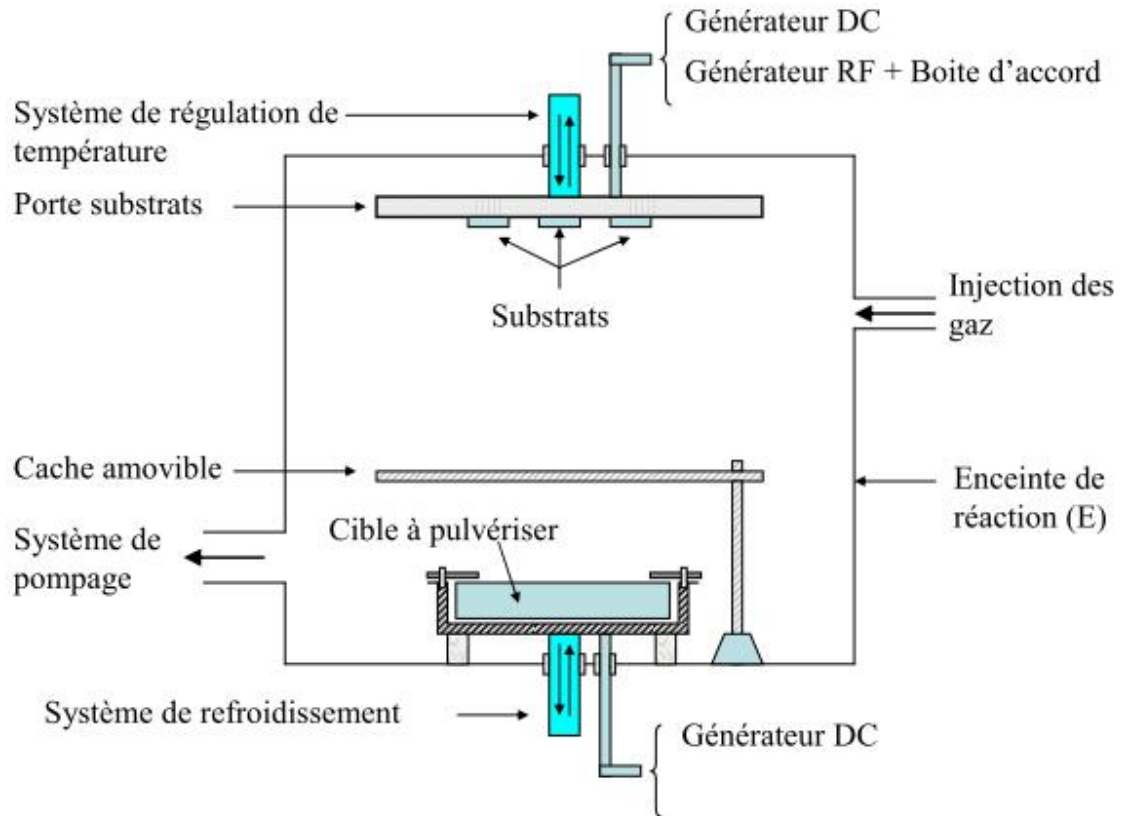


Figure I- 3. Schéma du dispositif de pulvérisation cathodique diode [3].

IV.2.1.1 Principe de fonctionnement :

La pulvérisation cathodique est une technique d'élaboration de films minces sous pression réduite. Un gaz (généralement de l'argon) est introduit dans l'enceinte. Une décharge est produite par application d'une tension négative entre la cible (cathode) et le substrat (anode) ou la cible et l'enceinte du réacteur. Cette décharge entraîne l'ionisation du gaz, on parle alors de plasma. Les ions du plasma sont accélérés vers la cible.

Ils transfèrent, lors de collisions élastiques, leur énergie aux atomes de la cible. Ces derniers sont éjectés avec une énergie cinétique suffisante pour traverser le plasma et se condensent sur la première surface rencontrée, en particulier le substrat. Malgré des vitesses de croissance de films minces faibles et un coût élevé comparativement aux autres techniques PVD telles que l'évaporation par faisceau

d'électron, la pulvérisation cathodique est préférée dès lors que la qualité et la pureté des films revêtent une importance dans l'application visée [3] .

Les principaux modes de polarisation d'une cible sont les suivants

a) *La polarisation en courant continu ou DC (Direct Current)*

Utilisée pour les matériaux conducteurs et semi-conducteurs dopés. Les ions positifs du plasma sont attirés vers la cible polarisée négativement. Les générateurs DC permettent, en général, de fixer un courant constant, une tension constante (voir Figure I-4-a), ou une puissance constante. Le contrôle en courant est le plus souvent utilisé car c'est lui qui génère une décharge stable. Ce mode de polarisation permet les vitesses de dépôt les plus élevées puisque le flux pulvérisé est continu [3].

b) *La polarisation en courant continu pulsé :*

Ce type de polarisation possède deux principaux avantages. Il permet, dans certains cas, de pulvériser des cibles peu conductrices ou semi conductrice et il augmente la densité des revêtements élaborés. Le principe de cette alimentation est de polariser la cible négativement avec une forte tension mais pendant un laps de temps très court (voir Figure I- 4-b). La puissance ainsi injectée dans un pulse est élevée et confère aux espèces pulvérisées une plus grande énergie cinétique par rapport à une pulvérisation en courant direct. Ce surplus d'énergie est utilisé par les particules pulvérisées pour mieux s'arranger dans le réseau lors de la croissance du revêtement. Il en résulte une densité du film final accrue. De plus, la tension nulle ou légèrement positive imposée entre deux pulses successifs permet, dans le cas des cibles isolantes, d'assurer le retour des charges positives accumulées sur la cible dans le plasma. L'entretien de la décharge s'en trouve facilité. L'inconvénient de la décharge DC pulsé par rapport à une décharge DC classique est la diminution de la vitesse de croissance des revêtements en raison de l'interruption du flux pulvérisé entre deux pulses [3].

c) *La polarisation radio fréquence RF*

Utilisée pour les matériaux isolants et semi-conducteurs non dopés (voir forme du signal sur la Figure I- 4-c). Elle permet d'évacuer les charges qui s'accumulent au niveau des cibles durant la polarisation négative de celles-ci. La décharge est ainsi maintenue alors qu'une alimentation en DC mènerait à son extinction. Ce mode de pulvérisation peut être avantageusement utilisé dans la pulvérisation de cibles ferromagnétiques [3].

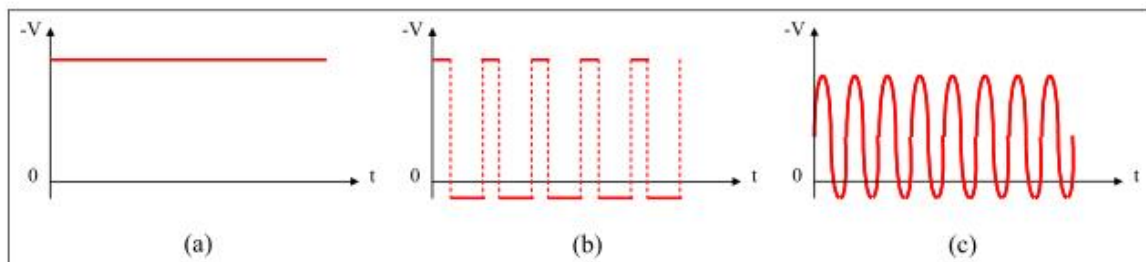


Figure I-4. Régime de polarisation possible d'une cible pulvérisée (a) courant continu, (b) courant continu pulsé, (c) radiofréquence [3].

IV.2.1.2 Interactions ions-cible, Pulvérisation et autres phénomènes :

Dans ce qui suit nous allons décrire le phénomène de pulvérisation ainsi que d'autres phénomènes résultant du bombardement ionique de la cible par le plasma (voir la Figure I-5). Chaque phénomène décrit pourrait faire à lui seul l'objet d'une étude approfondie. Cependant, une description simple suffit à la compréhension du présent manuscrit. Nous apportons une attention plus particulière au phénomène de la pulvérisation puisque c'est celui qui est mis à profit dans le procédé d'élaboration de couches minces [3].

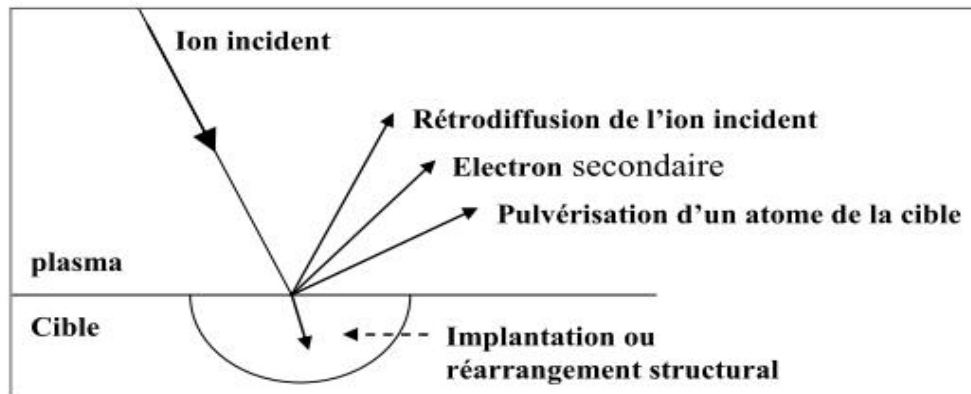


Figure I- 5. Différents phénomènes possibles suite au bombardement d'une cible par un ion énergétique [3].

IV.2.1.3 Pulvérisation de particules neutres (cas d'une décharge DC ou RF)

Lorsqu'une tension négative est appliquée à une cible, les ions présents dans le plasma sont accélérés par le champ électrique de la gaine cathodique et acquièrent une énergie cinétique qu'ils cèdent aux atomes de la cible lors de collisions élastiques, suite à quoi un ou plusieurs atomes sont éjectés de la cible avec une énergie cinétique. Trois régimes de collisions élastiques menant à cette éjection sont distingués en fonction de l'énergie des ions incidents selon le modèle de Sigmund (voir Figure I- 6) [3].

a. Régime de collision simple – Figure I- 6-(a):

L'énergie reçue par un atome de la cible est suffisante pour l'expulser mais pas pour entraîner une série de collisions. Ce mécanisme est le plus souvent rencontré lorsque les ions sont légers et faiblement énergétiques (<KeV).

b. Régime de cascades linéaires - Figure I- 6-(b) :

l'énergie mise en jeu dans ce mécanisme est suffisamment élevée pour créer une série de collisions binaires pouvant entraîner l'éjection d'un atome si une collision a lieu près de la surface. C'est le cas lorsque les ions ont des énergies allant du KeV au MeV

c. Régime de pointes – Figure I- 6-(c) :

L'énergie des ions est cédée dans un volume réduit (cas des ions lourds). Il en résulte de nombreuses collisions et un nombre d'atomes en mouvement important [3].

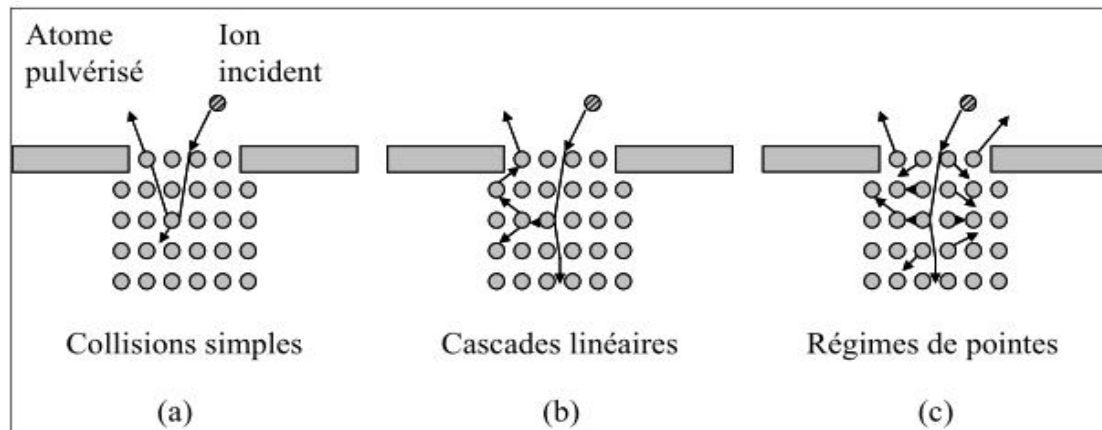


Figure I-6. Trois régimes de pulvérisation par collisions élastiques. (a) Collision simple. (b) Collision linéaire. (c) Collision de pointe [3].

Un atome pulvérisé de la cible ira se déposer sur la première surface rencontrée sur sa trajectoire. S'il atteint le substrat avec suffisamment d'énergie il se combinera aux autres atomes pulvérisés. Nous verrons par la suite les étapes qui mènent à la formation d'un revêtement.

D'autres phénomènes ont lieu lors du bombardement. Ils sont brièvement décrits dans ce qui suit:

✓ Emission d'électrons secondaires :

La collision entre un ion et la cible peut donner lieu à l'émission d'électrons appelés électrons secondaires. C'est un phénomène primordial en pulvérisation cathodique. En effet, ce sont les électrons secondaires qui garantissent le maintien d'une décharge en ionisant les atomes de gaz présents dans la chambre de réaction.

✓ Rétrodiffusion de l'ion incident :

Lorsque l'énergie des ions n'est pas suffisante pour pénétrer dans la cible, ils seront réfléchis après avoir été neutralisés.

✓ **Implantation :**

Le phénomène d'implantation à lieu lorsque les ions n'ont plus assez d'énergie pour ressortir de la cible. Ce mécanisme est recherché dans certains cas tels que la nitruration par bombardement ionique. Il est favorisé lorsque l'énergie des ions est grande et que la profondeur de pénétration dans le matériau cible est élevée.

✓ **Réarrangement structural du matériau de la cible :**

L'énergie apportée par les ions peut entraîner des modifications structurales du matériau cible telles que des lacunes ou des interstitiels mais aussi des réarrangements d'atomes en surface[3].

IV.2.2 Évolution de la technique de la pulvérisation cathodique à la pulvérisation cathodique magnétron :

La pulvérisation cathodique nécessite de faire un compromis sur la valeur de la pression de pulvérisation. En effet une pression trop basse nuit à l'entretien de la décharge, tandis qu'une pression trop haute empêche les espèces pulvérisées d'atteindre le substrat. De plus l'absence d'un système favorisant l'ionisation du plasma rend nécessaire l'utilisation d'une tension très élevée pour maintenir la décharge.

Malgré cela, la vitesse de dépôt en pulvérisation cathodique reste médiocre, et exclut une utilisation industrielle du procédé. Aussi plusieurs améliorations ont été apportées à ce procédé dans le but d'en accroître le rendement et d'améliorer le contrôle de la qualité des revêtements[3].

IV.2.3 Pulvérisation triode

Dans ce procédé, la plupart des électrons qui entretiennent le plasma ne proviennent pas de la cible, mais d'une cathode chauffée, constituée d'un ruban de tungstène. Une anode dite anode primaire est placée en face du ruban de tungstène et portée à un potentiel suffisant pour ioniser le gaz plasmagène introduit dans l'enceinte. Les ions, ainsi créés, sont attirés par la cible qu'ils pulvérisent. Le porte substrat peut lui aussi être porté à un potentiel faiblement négatif afin d'attirer des ions du plasma Figure I-7. Ceci permet d'améliorer la qualité des films

CHAPITRE I : Généralité sur le dépôt de couche mince

déposés. L'efficacité de ce dispositif peut être améliorée par l'application d'un champ magnétique longitudinal. En effet, la trajectoire hélicoïdale des électrons autour des lignes de champs permet d'augmenter la probabilité d'une collision entre un électron et un atome du gaz [3].

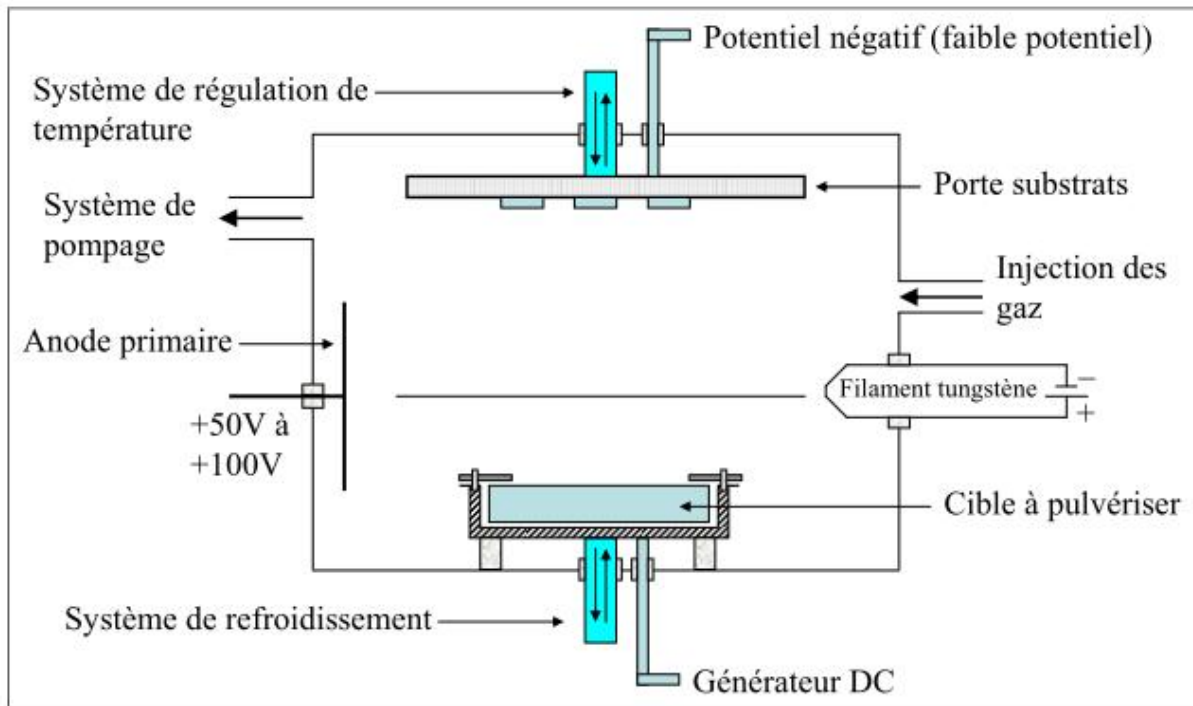


Figure I-7. Schéma du dispositif de pulvérisation cathodique triode [3].

La pulvérisation triode permet des vitesses de pulvérisation de l'ordre de 40 nm/min sous une pression de 0.1 Pa. De plus, elle rend possible le contrôle de la densité d'ions récoltés par la cible en agissant directement sur l'émission électronique, et sans avoir à modifier la tension de la cible ou la pression de gaz. Cependant, le système présente des inconvénients, et notamment, une vitesse de pulvérisation inhomogène (plus importante du côté du filament) ce qui implique une inhomogénéité dans l'épaisseur du film déposé. De plus, le temps de vie du filament est réduit lors de l'utilisation d'un gaz réactif (O_2 , N_2) en supplément du gaz plasmagène[3].

IV.2.4 Pulvérisation cathodique magnétron :

Ce dispositif reprend celui de la pulvérisation cathodique diode avec une cathode modifiée. Deux aimants permanents sont disposés à l'arrière de

CHAPITRE I : Généralité sur le dépôt de couche mince

la cible. L'induction magnétique, de l'ordre de 20 à 50 mT dans l'espace situé à l'avant de la cible, piège les électrons secondaires émis lors du bombardement de la cible par les ions du plasma - Figure I-8 et Figure I- 9. Le piégeage des électrons augmente la probabilité de collision entre un électron secondaire et un atome du gaz à proximité de la cible. Il en résulte un accroissement de la densité du plasma près de la cible et une augmentation de la vitesse de pulvérisation (Jusqu'à 50 fois plus élevée que dans le procédé diode). Il est donc possible de maintenir une vitesse de pulvérisation élevée à faible pression (0.1 Pa). L'abaissement de la pression nécessaire à maintenir une décharge participe également à l'augmentation de la vitesse de croissance des revêtements puisque le libre parcours moyen des particules augmente.

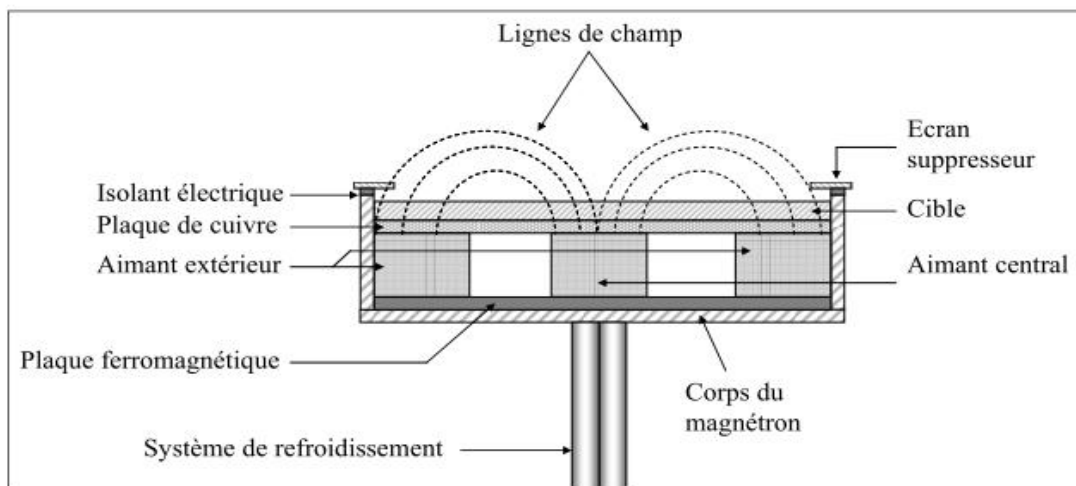


Figure I-8. Schéma d'une cathode équipée d'un système magnétron [3].

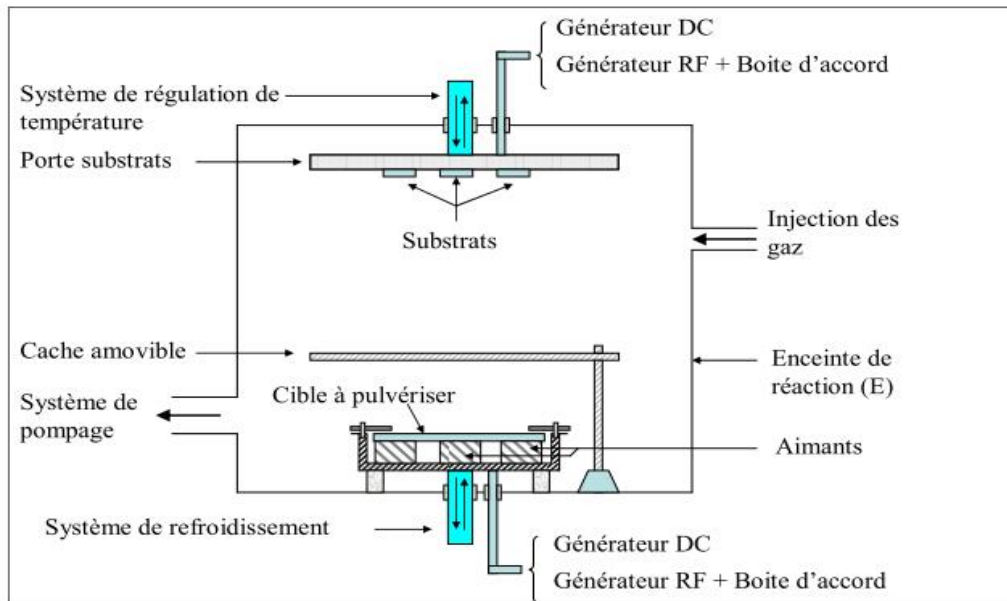


Figure I-9. Schéma du dispositif de pulvérisation cathodique magnétron [3].

Une autre différence entre le procédé magnétron et le procédé diode réside dans la manière de polariser la cible et le substrat. En effet, contrairement à la pulvérisation diode où la différence de potentiel est appliquée entre la cible et le porte substrat, dans la pulvérisation cathodique magnétron la différence de potentiel est appliquée entre la cible et l'enceinte du réacteur. Le porte substrat est quant à lui isolé électriquement du reste du réacteur et peut être polarisé indépendamment de la cible. Dans les faits il est, le plus souvent, polarisé négativement afin que la couche en cours de croissance soit bombardée par les ions du plasma. Ce bombardement augmente l'énergie des particules déposées et permet d'améliorer la qualité du film [3].

• Configurations du magnétron

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

✓ Magnétrons équilibrés :

Considérons le cas de 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

CHAPITRE I : Généralité sur le dépôt de couche mince

lignes de champ se referment sur elles-mêmes et forment un anneau (Figure I- 10-(a)).

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

✓ **Magnétrons déséquilibrés :**

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 I- 10-(b) et Figure I-10-(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.

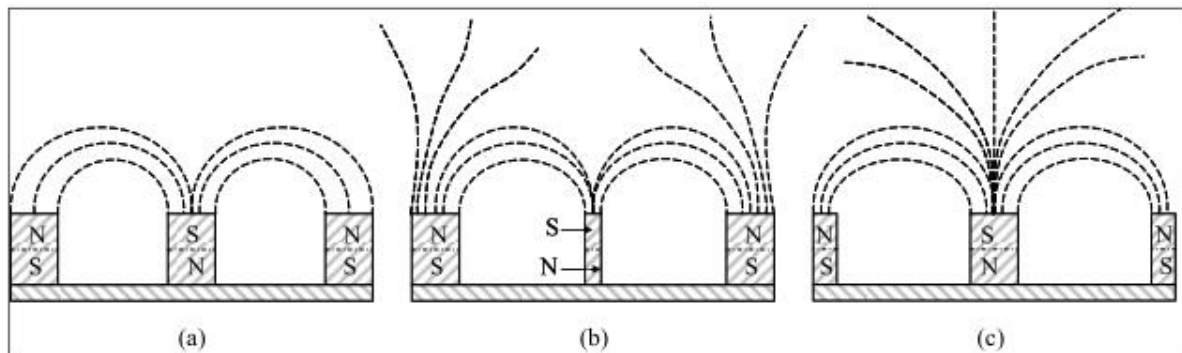


Figure I-10. Configurations possibles des magnétrons. (a) Équilibré, (b) et (c) Déséquilibrés [3].

La localisation du plasma dans l'entrefer des deux aimants mène à une usure inhomogène de la cible. Dans le cas de cibles circulaires une zone d'érosion en forme d'anneau apparaît [3]

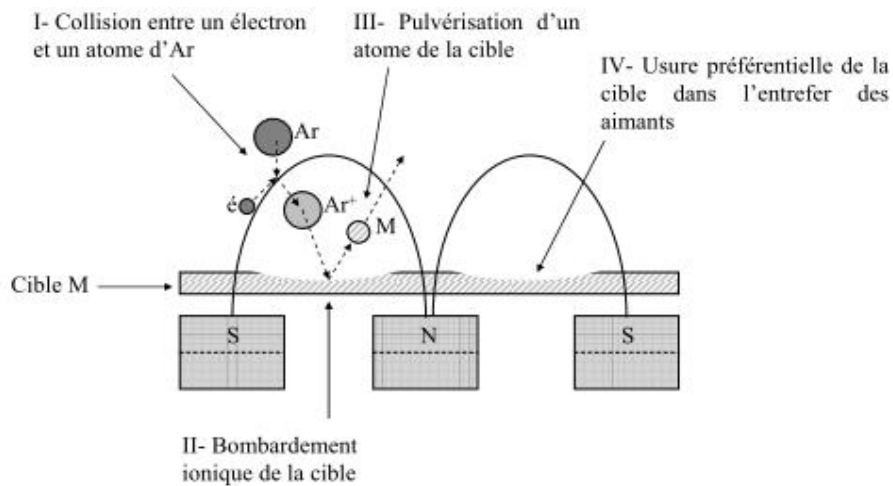


Figure I-11. Usure inhomogène de la cible dans le procédé magnétron [3].

IV.2.5 Le mécanisme de pulvérisation cathode magnétron

L'ion incident heurte les atomes de la cible et leur transfère une partie de sa quantité de mouvement. 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. Par ce processus, appelé pulvérisation, une vapeur composée des atomes de la cible se forme. 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. Les espèces pulvérisées par les ions incidents sont principalement des atomes. Lors de leur éjection ils ont une énergie de quelques eV. On peut aussi observer des groupes d'atomes, des fractions de molécules ainsi que des ions positifs ou négatifs.

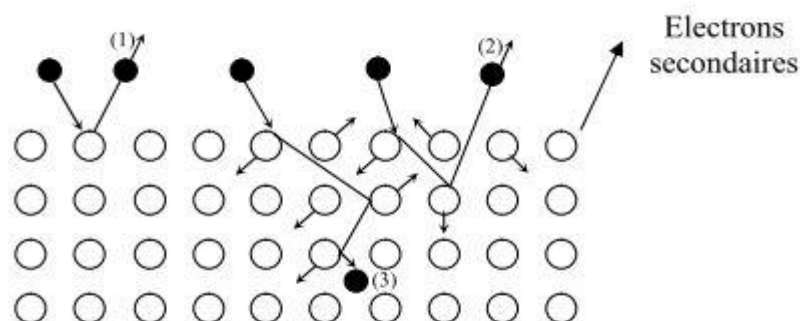


Fig. I-12: Interaction ion-solide et mécanisme de pulvérisation cathodique [4].

CHAPITRE I : Généralité sur le dépôt de couche mince

Les séquences de collisions ion-solide intervenant à la surface de la cible sont représentées schématiquement sur la fig. I-12: un ion de faible énergie (1) peut être réfléchi sur la surface. La fraction d'ions réfléchis dépend de l'énergie et de la masse de l'ion incident, ainsi que de la masse de l'atome cible. En effet, la plupart des ions incidents sont neutralisés en frappant la surface du solide et sont réfléchis sous forme de particules neutres. Si l'énergie de l'ion est plus élevée, la particule est neutralisée en arrivant à la surface de la cible et pénètre dans le solide; la particule déplace un certain nombre d'atomes de la cible, par transfert de quantité de mouvement ; elle perd de l'énergie et finit soit par ressortir du solide (2) soit par s'arrêter et rester implantée (3). Près de la surface, une partie des atomes de la cible mis en mouvement par la particule incidente se déplace vers la surface et certains d'entre eux sont pulvérisés. Les particules implantées dans le solide sont éjectées à leur tour sous forme d'atome au fur et à mesure que progresse l'abrasion de la cible.

Le bombardement ionique de la cible provoque aussi l'émission d'électrons secondaires caractérisée par le facteur γ_e . Ces derniers sont accélérés en traversant la gaine cathodique et acquièrent suffisamment d'énergie pour ioniser les atomes du gaz. Ces phénomènes d'ionisation du gaz par les électrons secondaires émis par la cible permettent d'avoir une décharge luminescente auto-entretenu. Cette émission d'électrons secondaires dépend principalement de la nature chimique de la surface de la cathode, de l'énergie cinétique des ions incidents et du type de métal constituant la cathode. γ_e Peut être estimé par la relation suivante [4]:

$$\gamma_e = 0,016(E_i - 2\phi) \quad (I.1)$$

Où E_i , en eV, représente l'énergie d'ionisation du métal et ϕ en eV est le travail d'extraction du métal.

Le rendement de pulvérisation, représente le nombre d'atomes éjectés de la cible par ion incident. Ce rendement dépend de :

- de la nature de la cible (matériau, état de surface),
- de la nature des ions incidents (gaz rares de masse plus ou moins élevée, ou gaz réactif).
- de l'énergie des ions incidents.
- de l'angle d'incidence.

CHAPITRE I : Généralité sur le dépôt de couche mince

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 du matériau à pulvériser[4].

IV.2.6 Le libre parcours moyen d'une particule et la thermalisation

Les particules pulvérisées traversent un plasma composé essentiellement d'atomes d'argon neutre, avant d'atteindre le substrat. En fonction de la distance parcourue et de la pression du gaz, elles vont induire un certain nombre de collisions qui vont modifier leur énergie cinétique et leur direction. Il en résulte généralement une thermalisation des atomes pulvérisés en même temps qu'une augmentation de la température moyenne du gaz. La probabilité de collision est souvent exprimée grâce au libre parcours moyen d'une particule qui représente la distance moyenne parcourue par celle-ci entre deux collisions successives [4].

Le libre parcours moyen d'une particule de masse M_s traversant un gaz constitué d'atomes de masse M_g est donné par la relation suivante:

$$\lambda^{-1} = 8,43 \cdot 10^{14} \cdot P \frac{(\sigma_s + \sigma_g)^2}{4} \sqrt{1 + \frac{M_s}{M_g}} \quad (1.2)$$

Où P : pression (Pa) du gaz,

σ_s : Diamètre atomique de l'atome de masse M_s ,

σ_g : Diamètre atomique de l'atome de masse M_g .

La fig. 1.9 représente la variation du libre parcours moyen de différents atomes en fonction de la pression d'argon. Le diamètre des différents atomes est donné dans le **tab 1.1**:

Élément	Ar	Ru	O	Sr	Ba	Ti
Diamètre atomique [Å]	3.84	2.7	1.48	4.3	4.44	2.94

Tab. I- 1 : Diamètres atomiques de quelques éléments et de l'argon [4]

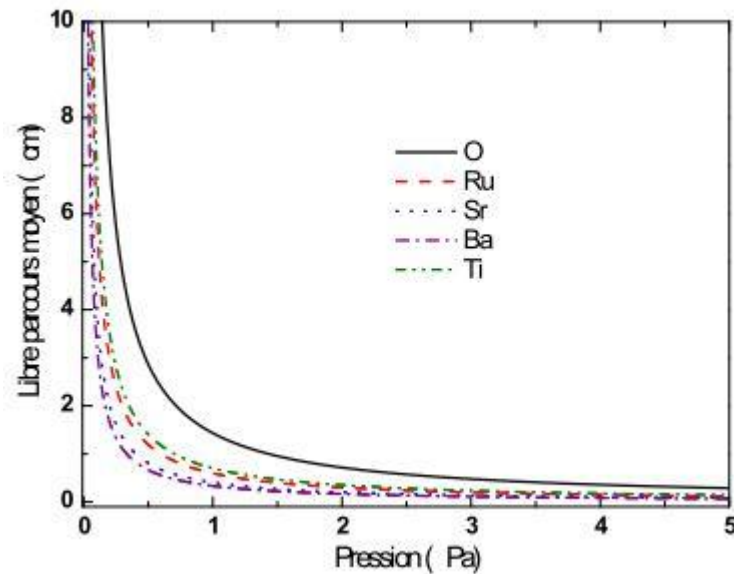


Figure I-13: Libre parcours moyen des atomes pulvérisés en fonction de la pression d'Ar [4].

- Lorsque $\lambda >$ distance inter-électrodes, les particules pulvérisées subissent, en moyenne, peu de collisions. Dans ce cas le transport de la particule au sein de l'enceinte se fait selon un régime dit balistique. La plus grande partie des particules atteignent le substrat en gardant leur énergie cinétique. Le matériau déposé est supposé être dense.
- Lorsque $\lambda <$ distance inter-électrodes, les particules pulvérisées subissent, en moyenne, une ou plusieurs collisions avec les atomes neutres. Après un certain nombre de collisions, les particules se thermalisent : leur énergie devient comparable à celle des neutres de la phase gazeuse, soit 0.04 eV. Dans ces conditions, les particules perdent leur direction initiale et leur transport vers le substrat s'effectue selon un régime diffusif. Le matériau déposé s'avère souvent être poreux.

Le nombre moyen de collisions N pour thermaliser un atome est donné par la relation suivante:

$$N = \frac{\ln\left(\frac{E_T}{E_P}\right)}{\ln(F_P)} \quad (1.3)$$

E_T : énergie thermique.

E_P : énergie initiale de la particule pulvérisée.

F_P : facteur de perte d'énergie.

CHAPITRE I : Généralité sur le dépôt de couche mince

La valeur moyenne du facteur de perte d'énergie est calculée à partir d'un modèle du type sphères dures :

$$F_p = \frac{1+M_c^2}{(1+M_c)^2} \quad (1.4)$$

Où M_c : est la masse de l'atome-cible.

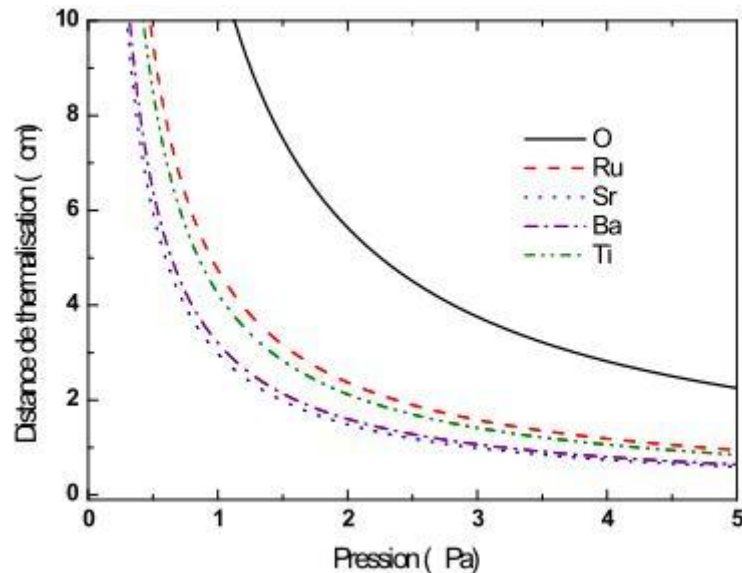


Figure. I-14 : Distance de thermalisation des atomes pulvérisés en fonction de la pression d'Ar [4].

Il est possible de calculer la distance de thermalisation ($\lambda \times N$) en fonction de la pression (figure I-14), en prenant les valeurs de libre parcours moyen calculées précédemment, une énergie E_p égale à 3eV (énergie moyenne des espèces pulvérisées de la cible) et les valeurs du tableau I-2 pour F_p et N [4].

Eléments	Ru	Ba	Sr	Ti	O
F_p	0.59	0.65	0.57	0.5	0.59
N	8	9.64	7.36	6.04	7.87

Tab. I-2 Valeur moyenne du facteur de perte d'énergie lors d'une collision entre un atome d'argon et différents atomes pulvérisés calculée à partir d'un modèle du type sphère dures, et nombre moyen de collisions pour thermaliser un atome déduit de la relation (I-4) [4].

A partir de la figure I-14 nous constatons, que même pour des pressions faibles, les espèces pulvérisées sont ralenties lors de leur passage dans le plasma pour arriver au substrat.

IV.3. La raréfaction du gaz

En parallèle au processus de thermalisation des atomes pulvérisés, le nombre de collisions induit une augmentation significative de la température du gaz porteur. Comme le renouvellement du gaz dans la chambre est faible, le chauffage local du gaz par les atomes pulvérisés induit une diminution locale de la densité du gaz. L'effet de raréfaction du gaz a d'abord été observé par une dynamique appelé « le vent magnétron » [4] : les particules pulvérisées sont énergétiques et leurs collisions avec les atomes du gaz (argon) tendent à entraîner l'argon loin du magnétron. Donc la pression partielle d'argon diminue localement au profit des atomes pulvérisés énergétiques. Des mesures faites par Hoffman et al [4] ont montré une diminution du gaz porteur (argon) d'environ 10% pour une pression de quelques Pa et un courant magnétron de 10 A. D'autre part, Rossnagel et al ont montré une raréfaction significative de la densité moyenne du gaz (une diminution allant jusqu'à 85%), due à l'effet de chauffage par les atomes pulvérisés. La raréfaction est d'autant plus importante que le taux de pulvérisation et la densité de courant auprès de la cible sont élevée (davantage d'atomes susceptibles de chauffer le gaz sont induits dans le réacteur) [4].

IV.4. L'effet magnétron

Dans le cas d'une décharge de type diode, et pour de basses pressions, le libre, parcours moyen des électrons secondaires émis par la cible est suffisamment important pour ne pas leur permettre d'ioniser efficacement les atomes du gaz. Par conséquent, ce type de décharge ne peut fonctionner qu'avec des pressions élevées. Ainsi, le transport de la vapeur pulvérisée vers le substrat s'effectue selon un régime diffusif, qui sera responsable d'une faible vitesse et d'une mauvaise qualité du dépôt. De plus, ce type de configuration nécessite une tension d'amorçage assez élevée.

Pour remédier à ce problème, les cathodes magnétrons ont été développées pour piéger les électrons secondaires à leur voisinage afin d'augmenter le taux d'ionisation du gaz, et donc le rendement de pulvérisation, ce qui permet également de diminuer la tension d'amorçage et d'entretien de la décharge[4].

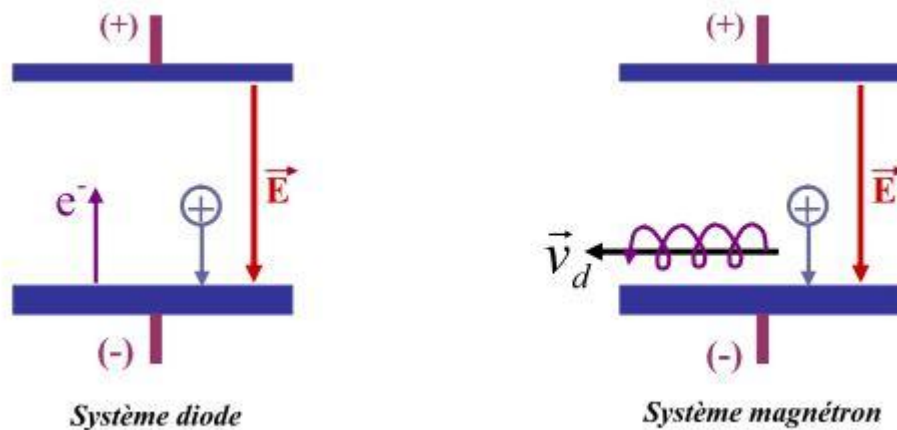


Figure I-15 : Comparaison des trajectoires des électrons dans le cas d'un système diode et d'un système magnétron [4].

Cet effet magnétron, est obtenu par l'implantation de deux aimants permanents de polarité inverse situés derrière la cible, de telle sorte que l'action combinée du champ électrique \vec{E} (perpendiculaire à la surface de la cathode) et du champ magnétique \vec{B} (parallèle à la surface de la cathode), permette de confiner les électrons. Au voisinage de la cathode, les deux champs donnent aux électrons des trajectoires complexes (cycloïde), superposition d'une trajectoire circulaire autour des lignes de champ magnétique et d'une vitesse de dérive orthogonale à \vec{E} et à \vec{B} (figure I-15). Cette vitesse est définie par [4]. :

$$\vec{v}_d = \frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{B^2} \quad (1.5)$$

La trajectoire cycloïdale augmente considérablement la du parcours longueur effectif des électrons secondaires dans le plasma (proche de la cathode). Ceci favorise une augmentation de l'ionisation des atomes du gaz, et par conséquent du rendement de pulvérisation de la cible[4].

L'allure des lignes de champ magnétique pour une cathode circulaire est présentée sur la figure I-16 Les lignes de champ (en noir sur la figure) sont radiales au niveau de la cathode. La vitesse de dérive est orthogonale. Le plasma est alors plus dense à l'endroit où le champ magnétique est plus intense.

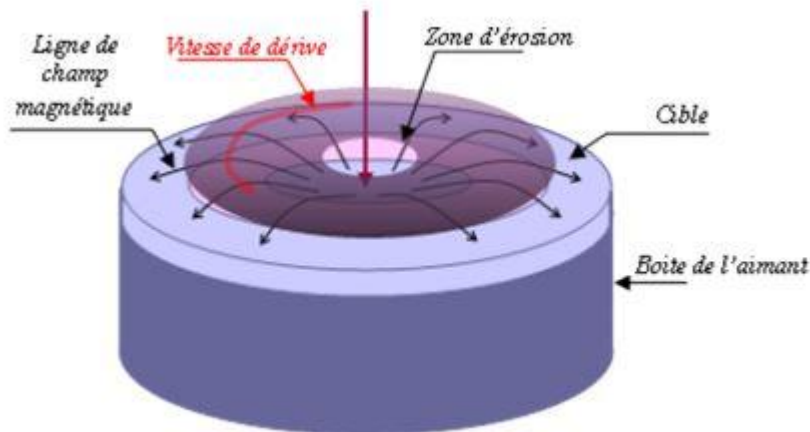


Figure I-16 : Allure typique des lignes de champ magnétique sur la cathode magnétron circulaire [4].

VI. Le plasma :

A l'état solide, les atomes sont fermement emprisonnés dans un réseau rigide (comme dans la glace par exemple). Lorsque l'on monte en température, on passe à l'état liquide (la glace se liquéfie), où les atomes peuvent glisser les uns par rapport aux autres, ce qui permet au liquide d'épouser la forme d'un récipient. Si on chauffe encore, on arrive à l'état gazeux : les atomes se déplacent alors librement, indépendamment les uns des autres (typiquement plusieurs millions de degrés !), les constituants de l'atome se séparent, noyaux et électrons se déplacent indépendamment et forment un mélange globalement neutre : c'est un plasma (voir la figure I-17). Le plasma, aussi appelé gaz ionisé, ressemble à une « soupe » constituée de deux ingrédients fondamentaux : les ions, chargés positivement, et les électrons, chargés négativement. La force attractive entre les particules des deux types est telle que les charges positives et négatives tendent à se mêler en un ensemble quasi neutre à l'échelle macroscopique [5].

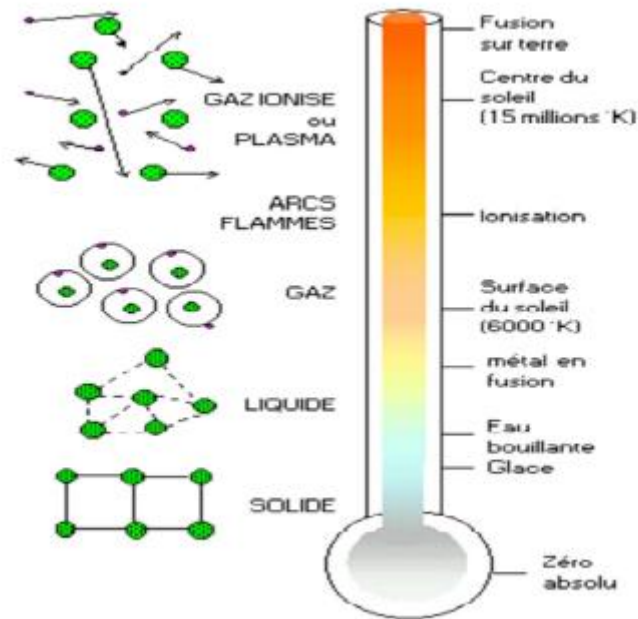


Figure I-17: Etats de la matière en fonction de la température (chauffage) [5].

Suivant la température, les atomes peuvent être partiellement ou totalement ionisés (c'est-à-dire que le noyau est partiellement ou totalement «épluché» de ses électrons) un plasma peut donc être considéré comme un mélange d'ions chargés positivement et d'électrons chargés négativement, coexistant éventuellement avec des atomes et des molécules neutres. Par exemple, dans un tube luminescent, les ions et les électrons sont peu nombreux par rapport aux atomes et aux molécules (voir figure I-18). Par contre, dans les plasmas produits pour les expériences de fusion, le gaz est fortement ionisé, et les atomes et molécules sont faibles proportions, voire totalement absents dans le cœur de la charge. (dans les deux cas, la description des plasmas s'inspire de la physique des gaz et de la mécanique des fluides, et utilise des grandeurs macroscopiques habituelles, telles que densité, température, pression, vitesse d'écoulement [5].

Les trois conditions que doit satisfaire un gaz ionisé pour être un plasma sont les suivantes :

1- la somme totale des charges est nulle dans un volume macroscopique. c'est la quasi-neutralité qui exige que les dimensions du système L soient beaucoup plus grandes que λ_D , la longueur de Debye, $\lambda_D \ll L$: par définition λ_D est la plus petite distance au-delà de laquelle le champ électrique produit par une charge est écranté.

2- les effets collectifs des particules doivent être plus importants que les effets dus aux forces coulombiennes entre particules. ces effets collectifs peuvent être

CHAPITRE I : Généralité sur le dépôt de couche mince

quantifiés par le nombre de particules N_D , compris dans une sphère de rayon

$$N_D = \frac{4}{3} n \pi \lambda_D^3 \text{ donc } N_D \gg 1$$

3-finalement, il Ya un critère concernant les collisions. Par exemple ,un gaz faiblement ionisé n'est pas un plasma car les particules chargées subissent tellement de collisions avec les atomes neutres que le mouvement du gaz est influencé par les forces hydrodynamiques plutôt que par des forces électromagnétiques .ainsi ,si ω est la fréquence typique d'oscillations de plasma et T est le temps moyen entre collisions avec des neutres, il faut exiger que $\omega t < 1$ pour que le comportement du gaz soit celui d'un plasma plutôt que celui d'un gaz neutre.

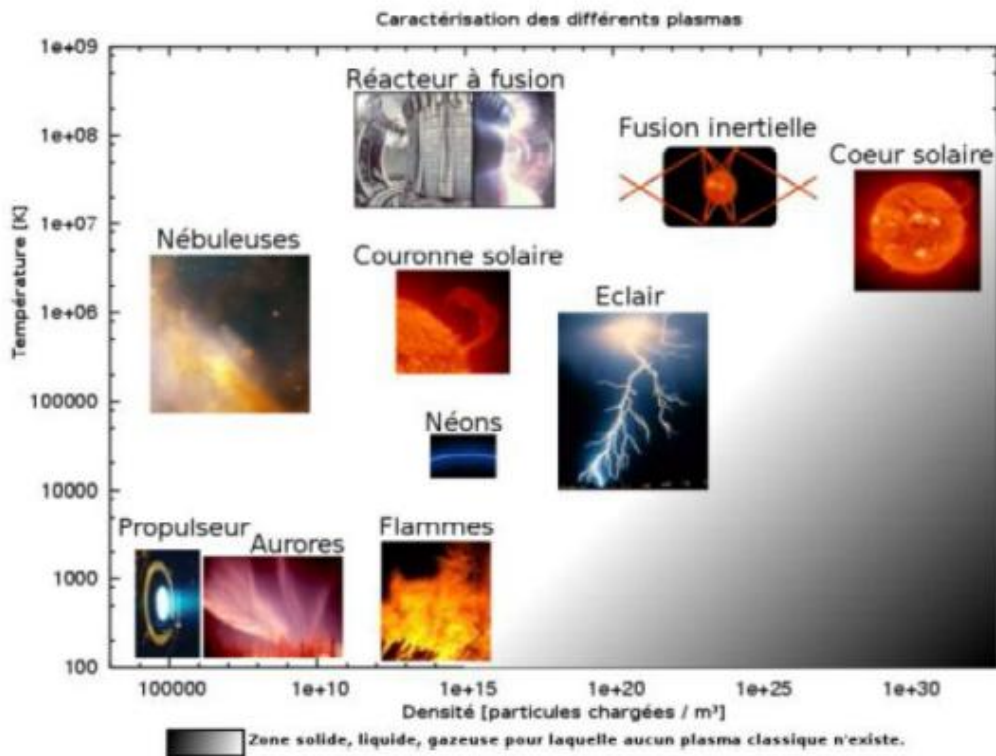


Figure I-18: types de plasma en fonction de leur température par rapport à leur densité [5]

VI.1. Paramètres caractéristiques de plasma :

Les plasmas sont constitués de population d'électron, d'ions et des neutres dont les interactions peuvent être décrites par les principales quantités de densité et température [5].

- **La densité :**

En spécifiant la densité des ions ou d'électrons, nous définissons la densité comme le nombre d'électrons par unité de volume, soit n_e si les ions ont une charge $+z_e$, la densité ionique n_i est obtenue par la condition de neutralité de charge $n_e^c = n_i z_e$; c'est l'hypothèse de quasi-neutralité ou $n_i = \frac{n_e}{z}$ si Z vaut 1 nous avons alors : $n_e = n_i$.

- **La température :**

Bien que les deux gaz d'électrons et d'ions soient mélangés ; il faudra distinguer entre température électronique t_e et température ionique t_i : A l'équilibre thermique ces deux quantités sont égales. Cependant lorsqu'on calcule les temps d'équilibres d'énergie, on constate les échelles de temps suivantes :

- les électrons se thermalisent entre eux .
- les ions se thermalisent entre eux
- finalement ,ces deux gaz se thermalisent entre eux.

Dans beaucoup de cas, le temps de confinement est trop court pour que le troisième processus ait lieu ,d'où une température électronique et une température ionique qui sont différentes.

Signalons qu'il y a également lieu dans certains cas de tenir en compte d'une anisotropie de température .en effet ,dans beaucoup de cas ,le plasma est immergé dans un champ magnétique : les propriétés de transport de l'énergie diffèrent dans la direction du champ et celle perpendiculaire au champ.

En plus de la densité et la température ,il y a d'autres paramètres caractérisant le plasma ;

- **les longueur caractéristiques :**

Le libre moyen est distance moyennes entre deux collisions ;la longeuere de Debey est la distance critique d'interaction collective c'est-à-dire la plus petit distance au dela de la quelle le champ élecrtique est écrané ;le rayon de giration est le rayon caractéristique du movemnet hélicoidal des particules dans un champ magnitique.

- **Les friquence caratéristiques :**

La fréquence de collision est la friquence moyenne entre deux collisions successives ,on distingue les collision :électron-ion(w_{ei}) ,électron-neutre (w_{en}) et ion neutre (w_{ei}) :la température des électron est très supérieure à la température des ions et des neutres .la fréquence plasma est la friquence d'oscillation d'un plasma soumis a une perturbation locale de densité électrique.

- **Les vitesse caractérisriques :**

Les vitesse D'Alvén ,la vitesse de son .

La grandeur β :Pour un plasma magnétisé ,le paramètre β représente le rapport de la pression thermique,Cinitique $p = nk_B T$ et de la pression magnitique

$B^2 / 2\mu_0$:

$$\beta = \frac{nk_B T}{B^2 / 2\mu_0} \quad (1.6)$$

Avec k_B est la constante de boltzman($k_B = 1.38. 10^{-23}$ Joules/Kelvin).

Les ions et les électrons sont supposés être aux mêmes températures T et la densité n des électrons du plasma. \vec{B} est le champ magnétique et μ_0 la perméabilité magnétique de vide .en effet, le confinement magnétique d'un plasma n'est pas possible que s la valeur β de est inférieure à un, ($\beta \ll 1$).

- **Ecrantage de Debye :**

La plus petite distance au-delà de laquelle le champ électrique produit par une charge est écranté s'appelle la longueur de Debye. Elle apparaît en résolvant l'équation de Poisson autour d'une charge q_t :

$$\nabla^2 \phi = \frac{\rho}{\epsilon_0} = \frac{q}{\epsilon_0} (n_e - n_i) - q_t \delta(r) \quad (1.7)$$

Et en prenant une distribution de Boltzmann pour la densité des électrons et des ions qui entourent la charge q_t est

$$n_s = n_0 \exp\left(\frac{q_s \phi}{2\pi k_B T}\right) \quad (1.8)$$

Où n_0 est la densité électronique à l'équilibre ($s=e$ électronique ou i ionique). Ainsi, on trouve le potentiel électrique produit par la charge s'écrit :

$$\phi = \frac{q_t}{4\pi\epsilon_0 r} \exp\left(-\frac{r}{\lambda_D}\right) \quad (1.9)$$

Où r est la distance par rapport à la charge q_t est λ_D est la longueur de Debye donnée par :

$$\lambda_{D_s} = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T_s}{n_0 q_s^2}} \quad (1.10)$$

- **Paramètre de couplage :**

Dans un plasma, il faut prendre en compte deux propriétés :

1-la tendance de désordre due à l'agitation thermique.

2-la tendance à l'organisation due à l'aspect dynamique et collectif de l'interaction coulombienne.

Un équilibre s'établit entre l'ordre et le désordre quantifié par le paramètre plasma ou paramètre de couplage donné par :

$$\Lambda = \left[\frac{v_{th}}{\frac{n_e^2}{me_0}} \right]^3 \quad (I.11)$$

Nous identifions deux limites pour Λ : le cas fortement couplés $\Lambda \ll 1$; dans laquelle l'énergie potentielle de l'interaction particules est plus importante que leurs mouvement cinétiques et le cas faiblement couplés $\Lambda \gg 1$; ou le mouvement thermique des particules sont plus importants .c'est le cas presque toujours rencontré des plasmas naturels et artificiels .en terme de la longueur de Debye, le paramètre plasma devient [5]

$$\Lambda = n\lambda_D^3 \quad (I.12)$$

IV.2. les différents types de plasma :

L'état plasma regroupe donc des milieux très différents et les exemples de plasma d'état naturel sont nombreux, on peut citer [5] :

1) les plasmas spatiaux

Se trouvent dans les nébuleuses, dans les nuages d'hydrogène composant le milieu interstellaire dans les étoiles. Le cœur des étoiles, exemples de plasma chaud et très dense (l'ionisation est totale).

2) les plasmas terrestres

se trouvent dans la foudre ,la magnétosphère, l'ionosphère terrestres (plasma partiellement ionisé) , A l'état artificielle, il Ya aussi une grande gamme de paramètre accessibles, suivant que l'on considère les plasmas des flammes ou des décharges (ex les tubes a néon et le phénomène de la foudre).enfin, les plasmas sont au cœur des recherches sur la production d'énergie par fusion thermonucléaire « plasma de fusion », plasma portés à des températures très élevées Le tableau regroupe les ordres de grandeur caractéristiques de quelques plasmas afin de fixer les idées sur ce que peut être un « plasma ». à titre de comparaison on peut se rappeler que l'atmosphère dans laquelle nous vivons a une densité (de neutres) d'environ $3.10^{25} m^{-3}$ Pour une température de 273^0k .les

CHAPITRE I : Généralité sur le dépôt de couche mince

plasmas d'intérêt pour la fusion thermonucléaire ont une densité de l'ordre de 10^{19} - 10^{21} particules/ m^3 .les températures sont de 1 keV à 10keV (1 eV = 11605^0 K) [5]

Type de plasma	Densité	Température (eV)
Plasma interstellaire	10^5 - 10^7	10^{-2} - 10
Plasma Ionosphérique	10^{10} - 10^{12}	10^{-1} - 1
Décharge Gazeuse	10^{12} - 10^{19}	Quelque eV
Plasmas Industriels	10^{16} - 10^{19}	1 - 100
Plasma de fusion	10^{19} - 10^{21}	$\sim 10^7$

Tableau I-3 caractéristiques de quelque plasma [5]

3) **Plasma réactifs** : dans certains plasmas, les rayons ULTRA-VIOLETS, ou les flux d'électrons énergétiques ne contribuent pas seulement à l'ionisation. Ils engendrent des réactions chimiques. Ces plasmas sont appelés des plasmas de l'ionosphère sont réactifs. Leur chimie est très étudiée, en particulier la chimie de couche d'ozone [5].

4) **Plasmas thermiques** :

Les collisions entre particules peuvent provoquer de l'ionisation si la différence d'énergie entre les particules est assez grande, ou bien de la recombinaison si la différence d'énergie est assez faible. Dans un gaz ionisé, les deux formes de collisions peuvent se produire, alors un équilibre peut s'établir. Le plasma peut maintenir, sans qu'il soit nécessaire d'envoyer des rayonnements UV. Il suffit pour maintenir cet équilibre que le plasma soit assez chaud (quelques eV) [5].

Exemple : les plasmas thermiques dans les explosions nucléaires et dans les étoiles.

5) **Plasma relativiste** :

Plus un plasma est chaud, plus les écarts de vitesse entre les particules qui le composent peuvent atteindre de grandes valeurs. Lorsque les vitesses de certaines particules deviennent relativistes de nouveaux effets se produisent on dit que ces plasmas sont relativistes. Généralement les électrons sont les particules les plus rapides ; c'est donc les électrons qui produisent des effets relativistes [5].

6) **Plasma collisionnel :**

Un plasma collisionnel comme les gaz ordinaires, les collisions entre particules sont extrêmement fréquentes. On mesure la quantité de collision soit en comptant le nombre de collision qu'une particule subira en moyenne à chaque seconde, c'est la fréquence de collision ou par la distance moyenne parcourue entre deux collisions c'est le libre parcours moyen.

Une propriété importante de ces plasmas collisionnels est la répartition statique de l'énergie des particules selon une loi de la forme $\frac{1}{v^3}$. Cette loi permet de décrire complètement le plasma ainsi son mouvement en connaissant sa densité, sa vitesse et sa température. La définition locale de la température à l'aide de la loi de BOLZMANN permet de dire que le plasma est en équilibre et les plasmas industriels [5].

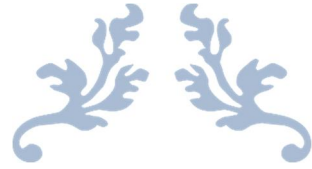
7) **Plasma non collisionnel :**

Un plasma non collisionnel est un plasma où les collisions sont rares, elles peuvent être négligées. Cela se produit par exemple lorsque le libre parcours moyen est de l'ordre ou plus grand que les dimensions caractéristiques du plasma. Dans ce cas, la loi de BOLZMANN n'est plus valable. La connaissance de la densité, de la vitesse et de la température ne suffit plus pour décrire un plasma non collisionnel ; pour prévoir son évolution on dit que de tels plasmas sont hors équilibre thermodynamique local.

Pour qu'un plasma soit réactif ou thermique, il faut qu'il y ait des collisions entre les particules. Un plasma non collisionnel n'est réactif, ni thermique [5].

Conclusion :

Dans ce chapitre on a présenté des généralités à propos des différentes méthodes de dépôt de films minces. Et tout un aperçu des divers plasmas et les lois qui régissent ce milieu.



CHAPITRE II : ELECTROMAGNETISME ET LES MATERIAUX



I. Introduction :

Dans ce chapitre on présente le formalisme et les grandeurs physiques de l'électromagnétisme qui sont en relation avec le développement du modèle de la cathode magnétron, objet de notre étude. Egalement on présente la procédure de résolution de l'équation électromagnétique par la méthode des éléments finis. Le chapitre développe aussi la technologie, le type et les caractéristiques des matériaux magnétiques utilisés dans les différents domaines d'applications.

II. notions fondamentales :

II.1 Notion de champ :

Toutes les particules de l'univers sont soumises à l'influence combinée de toutes les autres, qui se manifeste par des forces d'origine gravitationnelle (mécanique), électromagnétique ou encore nucléaire. Pour déterminer le mouvement d'une particule, il faudrait en principe connaître les forces produites par toutes les autres.

Il est fondamental de limiter l'étude à la résolution de l'effet global, en un point de l'espace, pour chaque modèle d'interaction (on considère ici les influences électriques et magnétiques uniquement). En plaçant une particule de propriétés connues en un point de l'espace et en mesurant les forces qui s'exercent sur elle, on peut déterminer les propriétés locales de l'espace en ce point, que l'on appelle du nom de « champs ».

a. Champ électrique :

L'ensemble des charges électriques exerce sur une charge immobile q ($A \cdot s =$ Coulomb) une force F_e (newton). Cette force étant proportionnelle à la charge, il en résulte que le rapport q / F_e est un invariant, qui représente une propriété locale de l'espace : on l'appelle le **champ électrique** défini par :

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_e}{q} \quad [V/m] \quad (II.1)$$

V : volte

m : mètre

b. Densité de charge :

L'étude des phénomènes électriques ne considère pas seulement des charges ponctuelles, mais aussi des distributions continues de charge sur 1, 2 ou 3 dimensions. Ces distributions sont définies par les trois types suivants de densités :

- ρ densité de charge volumique, (C/m³)
- ρ_s densité de charge surfacique, (C/m²)
- ρ_l densité de charge linéique, (C/m)

Les densités de charge sont définies par la valeur limite que prend le rapport entre la charge contenue dans un volume (sur une surface, sur une ligne) et ce volume (surface, longueur de ligne) lorsque ces éléments deviennent très petits (mais restent néanmoins suffisamment grands par rapport aux dimensions atomiques pour que l'électromagnétisme classique soit encore valable).

II.2 Densité de courant \vec{j} :

Dans tous les milieux contenant des charges libres, l'application d'un champ électrique produit une force sur chacune des charges. Par conséquent, celles-ci se déplacent dans la direction du champ, ce qui produit un courant électrique circulant dans le volume du milieu considéré.

La densité de courant est définie par :

$$\vec{j} = \int_i \rho_i * \vec{v}_i \quad [\text{A/m}^2] \quad (\text{II.2})$$

La sommation porte sur **tous** les types de charges libres présents dans le milieu, la charge de type **i** étant caractérisée par une densité volumique ρ_i et une vitesse moyenne \vec{v}_i . Comme cette dernière est proportionnelle au champ électrique et que les densités de charge sont une propriété du milieu considéré, nous pouvons alors écrire :

$$\vec{j} = \sigma * \vec{E} \quad [\text{A/m}^2] \quad (\text{II.3})$$

Cette relation est connue sous le nom de « loi d'Ohm ». Le facteur de proportionnalité est la conductivité σ (s/m).

II.3 Induction magnétique \vec{B} :

Une particule chargée en mouvement subit, en plus des forces d'origine électrique, gravitationnelle et nucléaire, une force d'origine magnétique \vec{F}_m qui est proportionnelle à la charge **q**, au module de la vitesse \vec{V} de la particule et qui

CHAPITRE II : Electromagnétisme et les matériaux

s'exerce perpendiculairement à cette dernière. Cette force est proportionnelle et perpendiculaire à l'induction \vec{B} existant en ce point de l'espace, satisfaisant à la relation :

$$\vec{F}_m = q * (\vec{v} \wedge \vec{B}) \quad [\text{N}] \quad \text{II.4}$$

L'unité du champ d'induction est le **tesla (T)**

II.4 Aimantation \vec{M} :

Dans la plupart des matériaux, les atomes possèdent le même nombre d'électrons à moment magnétique positif et d'électrons à moment magnétique négatif : il y a compensation des deux effets et ces atomes ne possèdent pas de propriétés magnétiques notoires dues aux électrons.

Certains matériaux de transition, que l'on appelle ferromagnétiques ou ferrimagnétiques, font exception à cette règle. Il s'agit principalement du fer, du cobalt, du nickel, de certaines terres rares, ainsi que de leurs alliages, composés et oxydes. Les atomes de ces éléments possèdent des nombres différents d'électrons à moment magnétique positif et à moment magnétique négatif ; ce déséquilibre provoque l'apparition d'une aimantation, définie par la densité volumique de moments magnétiques résultants et mesurée en ampère par mètre. Nous reviendrons sur ces définitions par la suite.

II.5 Champ magnétique \vec{H} , perméabilité μ :

Le champ magnétique est défini à partir de l'induction \vec{B} et de l'aimantation \vec{M} par la relation

$$\vec{H} = \vec{B}/\mu_0 - \vec{M} \dots \dots \dots [\text{A/m}] \quad (\text{II.5})$$

Où : μ_0 est la constante magnétique ou perméabilité absolue du vide, qui vaut :

$$\mu_0 = 4 * \pi * 10^{-7} \dots \dots \dots [\text{Vs/Am}]$$

Dans un matériau linéaire, il existe une relation de proportionnalité entre \vec{B} et \vec{M} on peut alors écrire :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \dots \dots \dots [\text{T}] \quad (\text{II.6})$$

Le coefficient constant μ est appelé la perméabilité du matériau.

II.6 Déplacement électrique \vec{D} , champ de polarisation \vec{P} permittivité ϵ :

Les milieux matériels sont formés de charges, positives et négatives, liées à l'intérieur d'atomes et de molécules. Lorsque le centre de gravité des charges positives d'une molécule et celui de ses charges négatives coïncident,

CHAPITRE II : Electromagnétisme et les matériaux

l'ensemble est électriquement neutre. Si ces centres ne coïncident pas dans l'espace, la molécule se comporte comme deux charges de même amplitude mais de signe opposé, séparées par une distance déterminée par la géométrie de la molécule. Cet assemblage de deux charges de signe opposé est appelé un dipôle permanent.

Lorsqu'on applique un champ électrique \vec{E} à un milieu matériel, les dipôles permanents qu'il contient s'alignent dans la direction du champ.

D'autre part, les charges liées positives et négatives des molécules neutres se déplacent légèrement et en sens opposé le long du champ, par suite des forces électriques appliquées ; le champ provoque l'apparition de dipôles induits. Tous ces dipôles sont caractérisés par un moment dipolaire dont l'amplitude est le produit de la charge par la distance séparant les charges. Le champ de polarisation \vec{P} est défini par la densité volumique de moments dipolaires lorsque l'élément de volume devient très petit.

L'effet du champ électrique est représenté par le déplacement électrique \vec{D} qui est défini par :

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} + \vec{P} \dots \dots \dots [\text{As/m}^2] \quad (\text{II.7})$$

III. Equations de l'électromagnétisme :

III.1. Equation de Maxwell :

Les équations de Maxwell spécifient que toute variation spatiale d'un champ (électrique ou magnétique) en un point de l'espace entraîne (ou est due à) l'existence, ou la variation temporelle, d'un autre champ au même point de l'espace. Il s'agit là de leur forme locale ou différentielle : nous avons un système de quatre équations vectorielles aux dérivées partielles .

$$\text{Maxwell-gauss: } \text{div } \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \dots \dots \dots (1) \quad (\text{II.8})$$

$$\text{Maxwell-Faraday: } \text{rot } \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt} \dots \dots \dots (2) \quad (\text{II.9})$$

$$\text{Conservation de flux : } \text{div } \vec{B} = 0 \dots \dots \dots (3) \quad (\text{II.10})$$

$$\text{Maxwell Ampère : } \text{rot } \vec{H} = \vec{j}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \dots \dots \dots (4) \quad (\text{II.11})$$

- $\vec{E}[\text{V/m}]$, $\vec{H}[\text{A/m}]$: Champ électrique et magnétique.
- $\vec{D}[\text{C/m}^2]$, $\vec{B}[\text{T}]$: Induction électrique et magnétique .
- $\vec{j}[\text{A/m}^2]$, $\rho[\text{C/m}^3]$: Densité de courants de conduction et de charge électrique.

CHAPITRE II : Electromagnétisme et les matériaux

L'équation (4) est une généralisation du théorème d'Ampère. Elle permet d'établir la relation entre le champ électromagnétique et les courants électriques. Elle traduit la création d'un champ magnétique par les courants électriques de conduction et de déplacement.

L'équation (2) correspond à la loi Faraday, qui établit le lien entre un champ électrique et un flux magnétique. Cette loi traduit le phénomène inductif qui se produit dans un conducteur soumis à un champ magnétique variable ou dans un conducteur en mouvement soumis à un champ magnétique constant.

Les équations (2), (4) définissent la relation entre les champs et leurs sources.

Les équations (1), (3) traduisent la respectivement la conservation de la charge électrique et du champ magnétique.

III.2. Lois de comportement des milieux :

$$\vec{B} = \mu(\vec{H}) \cdot \vec{H} \dots \dots \dots (5) \quad (\text{II.12})$$

$$\vec{D} = \varepsilon(\vec{E}) \cdot \vec{E} \dots \dots \dots (6) \quad (\text{II.13})$$

Dans les cas linéaire nous avons :

$$\mu = \mu_0 \mu_r = C^{te} \dots \dots \dots (7)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r = C^{te} \dots \dots \dots (8)$$

μ : Perméabilité magnétique [H/m].

$\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7}$: Perméabilité du vide [H/m].

μ_r : Perméabilité magnétique relative du milieu considéré

ε : Permittivité électrique

ε_0 : Permittivité électrique du vide $\varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9}$

ε_r : Permittivité relative du milieu considéré.

III.3. Loi d'Ohm :

Elle exprime la relation liant la densité du courant \vec{J} au champ électrique \vec{E} à travers la conductivité σ , elle est donnée par :

$$\vec{J} = \sigma * \vec{E} \dots \dots \dots (9) \quad (\text{II.14})$$

σ : Conductivité électrique $[(\Omega \cdot m)^{-1}]$.

III.4. Equation de continuité :

L'équation de la continuité appelée aussi équation de la conservation de la charge électrique est donnée par :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \dots \dots \dots \quad (\text{II.15})$$

III.5. Potentiel vecteur magnétique :

Sachant que la divergence de l'induction \vec{B} est nulle, et que d'autre part la divergence d'un rotationnel est toujours identiquement nulle, on peut en tout point de l'espace identifier l'induction avec le rotationnel d'une grandeur vectorielle \vec{A} [A/m]

$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A} \dots \dots \dots \quad [\text{T}] \quad (\text{II.16})$$

Nous disons que l'induction \vec{B} dérive de \vec{A} , que nous appelons le potentiel vecteur magnétique. Il faut noter ici que la relation précédente ne définit \vec{A} qu'à un vecteur irrotationnel près. L'emploi du potentiel vecteur permet de simplifier la résolution de problèmes électromagnétiques, notamment ceux de magnétostatiques.

III.6. Potentiel scalaire (en régime statique) :

Dans un système électrique dont les grandeurs ne varient pas dans le temps, que l'on appelle par conséquent statique, toutes les dérivées par rapport au temps sont nulles. Il en résulte que le rotationnel du champ \vec{E} est égal à zéro. Comme le rotationnel d'un gradient est toujours identiquement nul, il est possible ici d'identifier le champ \vec{E} au gradient d'une fonction scalaire V que l'on appelle potentiel.

$$\vec{E} = -\text{grad } V \dots \dots \dots \quad [\text{V/m}] \quad (\text{II.17})$$

IV. Méthode numérique :

Les méthodes numériques permettent d'étudier des configurations sonde-pièce plus variées. L'envol de l'informatique, dans les années 50, a permis de mettre au point plusieurs méthodes numériques dans le domaine de l'électromagnétisme. Celles-ci sont d'autant plus utilisées que les configurations à traiter sont complexes que ce soit du côté géométrie ou phénoménologiquement hétérogène et non linéaire.

CHAPITRE II : Electromagnétisme et les matériaux

Parmi ces méthodes, on pourra citer la méthode des différences finies, la méthode des éléments de frontières, la méthode des intégrales de volume et la méthode des éléments finis (MEF)

IV.1. Méthodes des éléments finis :

La méthode des éléments finis est fondée sur la transformation des équations aux dérivées partielles en un système d'équations algébriques. Elle se joint très bien aux milieux hétérogènes et aux domaines de formes complexes.

IV.2. Etapes de résolution par la MEF :

En générale, la résolution par la MEF inclut les étapes suivantes :

- la formulation variationnelle du problème de définition des espaces fonctionnels de solutions valables.
- Réalisation d'un maillage, correspondant à la discrétisation du domaine d'étude en élément (triangulaire, tétraèdre, hexaèdres...) sur les quelles champ sont écrits en terme d'un nombre fini de degrés de liberté et de fonctions de base à un support local
- Calcul des matrices élémentaires qui, après assemblage, génèrent un système matriciel creux.
- Résolution du système algébrique pour l'obtention d'une solution approchée du problème.

IV.3. Principe de la méthode variationnelle :

La méthode variationnelle nécessite a priori la connaissance de la fonctionnelle d'énergie du système à étudier. Celle-ci est déterminée à partir du principe de l'action Hamiltonienne qui formule l'existence d'une fonctionnelle type intégrale définie par :

$$f(A) = \int_{\Omega} L. d\Omega \dots\dots (II.18)$$

Avec :

Ω : Domaine d'étude.

L : Fonction de Lagrange déduite de la différence entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle du système.

Dans le cas d'un phénomène magnétique, la fonction L est donnée par :

$$L = \int_0^B v \cdot b db - JA \dots\dots\dots \quad (II.19)$$

La fonctionnelle d'énergie est donne alors comme suit :

$$f(A) = \int_{\Omega} [\int_0^B v \cdot b db - JA] \cdot d\Omega \quad (II.20)$$

Où :

L : Fonction de Lagrange.

A : Potentiel vecteur magnétique [**T.m**]

J : Densité de courant [**A/m²**]

v : Réductivité magnétique [**H/m**]⁻¹

B : Induction magnétique [**T**].

La résolution du problème variationnelle ainsi défini, revient à minimiser la fonctionnelle d'énergie F(A) .La minimisation est effectuée en utilisant la méthode de Rayleigh-Ritz qui consiste à écrire :

$$\frac{\partial F(A)}{\partial A_i} = \mathbf{0} \dots\dots\dots \quad (II.21)$$

Ou :

$$\frac{\partial F(A)}{\partial A_1} = \frac{\partial F(A)}{\partial A_2} = \dots = \frac{\partial F(A)}{\partial A_n} = \mathbf{0} \quad (II.22)$$

N : Nombre de nœuds du domaine d'étude.

A_i : Est l'inconnu aux nœuds i du domaine.

IV.4. Méthode des résidus pondérés :

a) Principe de la méthode :

La méthode des résidus pondérés est basée sur la détermination du résidu par :

$$R = L(A) - F_v \quad (II.23)$$

Avec :

R : représente le résidu de l'approximation.

L(A) : Opérateur différentiel.

CHAPITRE II : Electromagnétisme et les matériaux

F_v : Fonction définie sur le domaine d'étude Ω

A : L'inconnue du problème.

A l'aide de fonction de pondération bien choisies on impose à l'intégrale du résidu de s'annuler en n points du domaine Ω :

$$\int_{\Omega} R_i \cdot \phi_i d\Omega = 0 \quad (II.24)$$

ϕ_i : Fonction de projection.

Les valeurs de A qui permettent s'annuler l'intégrale, sont solution du système algébrique obtenu.

b) Différentes méthode déduites des résidus pondérés :

Le choix des fonctions de pondération nommées aussi fonction de projection, conduit à plusieurs méthodes, Parmi celles-ci nous mentionnerons :

- La méthode de collocation par point.
- La méthode des moindres carrés.
- La méthode de Galerkin.

La méthode de collocation par point utilise par fonction de Dirac comme fonction de pondération, la méthode des moindres carrés est basée sur la minimisation de la norme quadratique de l'erreur sur l'équation et les équation et les condition ou limites. La méthode de Galerkin consiste à choisir des fonctions de projection identique aux fonctions d'approximation.

Contrairement à la méthode variationnelle. La méthode des résidus pondérés ne nécessite pas la connaissance au préalable, la fonctionnelle d'énergie du système.

Dans le cas de l'utilisation de la méthode de Galerkin, on obtient un système algébrique symétrique facile à résoudre.

• La discrétisation :

L'approche de base de la méthode des éléments finis est de subdiviser le domaine d'étude en un nombre finis de sous domaines appelés éléments. L'approximation de l'inconnue se fait en chaque élément à l'aide des fonctions

CHAPITRE II : Electromagnétisme et les matériaux

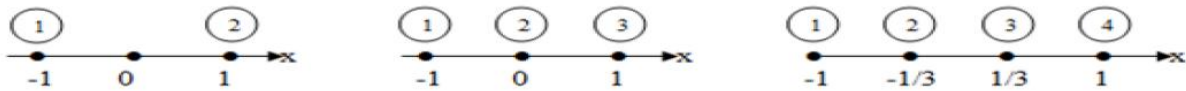
d'interpolation. La fonction d'interpolation est aussi définie en fonction de la géométrie de l'élément qu'on choisit préalablement et coïncide avec les nœuds de cet élément relatif aux valeurs de l'inconnue. On parle alors d'interpolation nodal.

a) *Eléments fini réels* :

Pour des domaines d'étude à une, deux ou trois dimensions, des éléments classiques peuvent être définies selon de degré de la courbe d'interpolation qui lui est associés. On rencontre généralement des éléments linéaires quadratiques ou cubiques :

Nous présenterons dans ce qui suit quelques éléments :

- **Elément à une dimension**

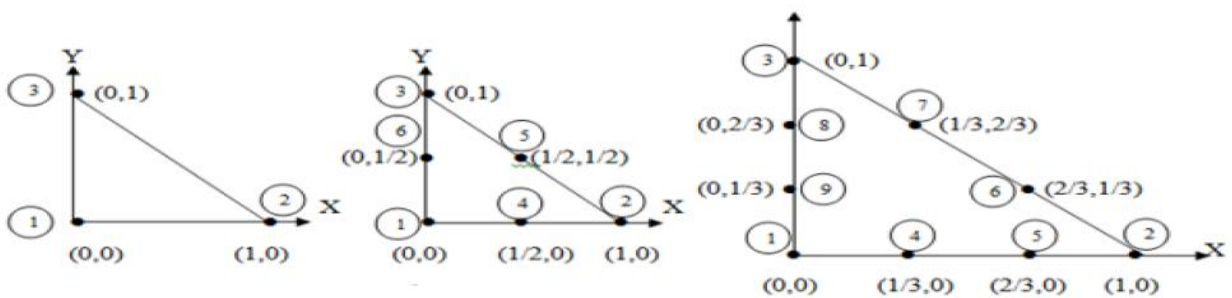


Elément linéaire (2 nœuds) Quadratique (3 nœuds)

Cubique (4 nœuds)

- **Eléments à deux dimensions :**

- **Eléments triangulaires :**



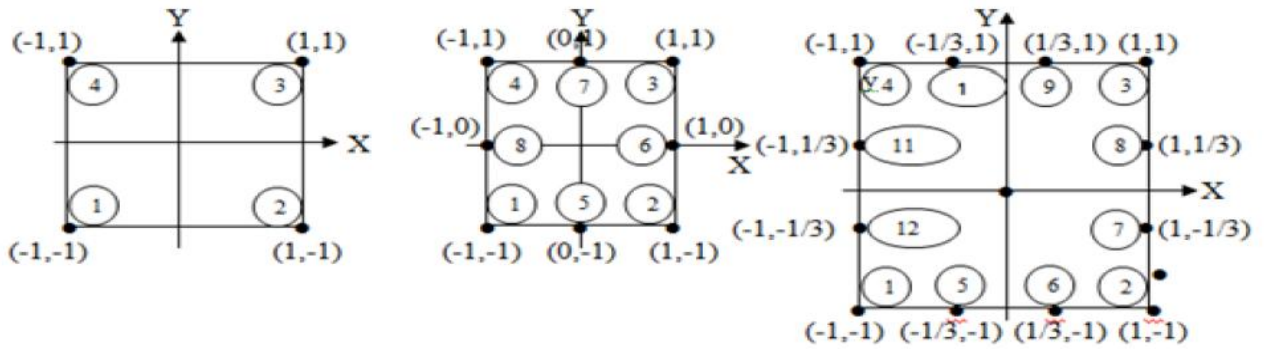
Linéaire (3 nœuds)

Quadratique (6 nœuds)

Cubique (9 nœuds)

CHAPITRE II : Electromagnétisme et les matériaux

○ **Eléments carrés :**

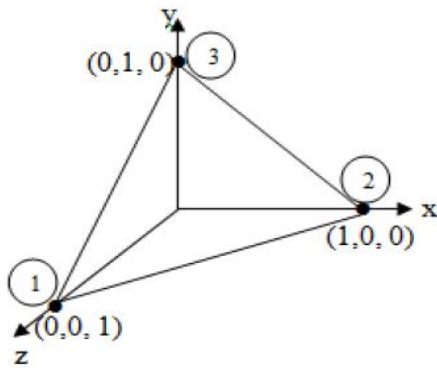


Linéaire (4noeuds)

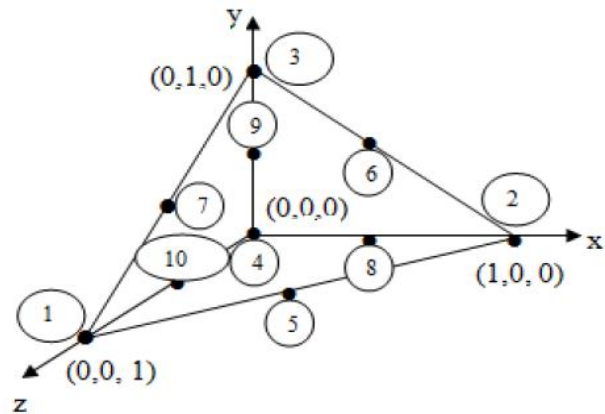
Quadratique (8noeuds)

Cubique (12noeuds)

○ **Eléments à trois dimensions :**



Linéaire (4noeuds)



Quadratique (10noeuds)

Fonction d'interpolation :

Les fonctions d'interpolation sont obtenues à partir du triangle de pascal, donné ci-dessous :

1	—	ordre 0
U V	—	ordre 1
U^2 UV V^2	—	ordre 2
U^3 U^2V UV^2 V^3	—	ordre 3

Triangle de pascal

CHAPITRE II : Electromagnétisme et les matériaux

Ces fonctions sont construites de telle sorte à concéder à deux principes.

1. Principe de l'état complet :

- Le nombre de termes de la fonction de l'interpolation doit être égale au nombre de nœuds de l'élément.
- La fonction doit contenir un terme constant.

2. Principe de compatibilité :

Celui-ci est expliqué par continuité de la fonction.

Dans le cas d'un élément triangulaire linéaire .la fonction d'interpolation est donnée par :

$$U(x, y) = a \cdot x + b \cdot y + c \dots \dots \dots \quad (\text{II.25})$$

b) Fonction d'interpolation sur l'élément :

Dans le cas d'un élément triangulaire linéaire, l'approximation d'une fonction $u(x, y)$ de valeur u_1, u_2 et u_3 respectivement aux sommets 1,2 et 3 de forme suivante :

$$u(x, y) = [N_1(x, y) \ N_2(x, y) \ N_3(x, y)] \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \dots \dots \dots \quad (\text{II.26})$$

Avec :

$$N_1(x, y) = \frac{1}{2 \cdot T} \cdot [(y_3 - y_2) \cdot (x_2 - x) - (x_3 - x_2) \cdot (y_2 - y)]$$

$$N_2(x, y) = \frac{1}{2 \cdot T} \cdot [(y_1 - y_3) \cdot (x_3 - x) - (x_1 - x_3) \cdot (y_3 - y)]$$

$$N_3(x, y) = \frac{1}{2 \cdot T} \cdot [(y_2 - y_1) \cdot (x_1 - x) - (x_2 - x_1) \cdot (y_1 - y)]$$

Ou : T est la surface de triangle décrit par les sommets (1), (2) et (3)

On remarque que :

$$N_1(x, y) = 1$$

$$N_2(x, y) = 0$$

$$N_3(x, y) = 0$$

c) Fonction d'approximation sur le domaine :

Dans le domaine global contenant N nœuds, l'inconnue alors :

$$A = \sum_{j=1}^N \alpha_j A_j \dots \dots \dots \quad (\text{II.27})$$

N : Nombre de nœuds

A_j : Valeur de l'inconnue au nœud j

α_j : Fonction d'interpolation au nœud j

V. Formulation élément finis des équations électromagnétiques :

V.1. Equation magnétostatique :

a) Cas cartésien :

L'équation magnétostatique dans ce cas, est donnée par l'expression suivante :

$$-\left(\frac{d}{dx} \left(\nu \cdot \frac{dA_z}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left(\nu \cdot \frac{dA_z}{dy} \right) \right) = J_z \dots \dots \dots \quad (\text{II.28})$$

La formulation intégrale de l'équation (II.28) est donnée comme suit :

$$\iint_{\Omega} \alpha_i \left(\left(\frac{d}{dx} \left(\nu \cdot \frac{dA_z}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left(\nu \cdot \frac{dA_z}{dy} \right) \right) + J_z \right) \cdot dx \cdot dy = 0 \dots \dots \dots \quad (\text{II.29})$$

L'équation (II.30) peut être réécrite sous la forme suivante :

$$\iint_{\Omega} \alpha_i \left(\left(\frac{d}{dx} \left(\nu \cdot \frac{dA_z}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left(\nu \cdot \frac{dA_z}{dy} \right) \right) \right) \cdot dx \cdot dy = \iint_{\Omega} \nu \left(\frac{d\alpha_i}{dx} \cdot \frac{dA_z}{dx} + \frac{d\alpha_i}{dy} \cdot \frac{dA_z}{dy} \right) \cdot dx \cdot dy + \int_{\Gamma} \nu \cdot \left(\frac{dA_z}{dx} \cdot \cos(n, x) + \frac{dA_z}{dy} \cdot \cos(n, y) \right) \alpha_i \cdot d\Gamma \quad (\text{II.30})$$

Où $\cos(n, x)$ et $\cos(n, y)$ sont les cosinus directeurs au point considéré de la fonction de la frontière Γ .

VI. Le magnétisme à l'échelle atomique :

Le modèle proposé par Niels Bohr décrit l'atome la plus simple (hydrogène) comme étant un noyau de charge positive de masse m et un électron négative de masse m' qui gravite autour du noyau.

CHAPITRE II : Electromagnétisme et les matériaux

Le moment magnétique atomique résulte des mouvements des électrons qui gravitent autour du noyau dans une trajectoire elliptique et qui en même temps tourne eux-mêmes.

La rotation de l'électron (-e), charge électrique négative, autour du noyau provoque un moment magnétique dit orbital m_l .

Dans ce cas l'électron est équivalent à un courant électrique i , et sa trajectoire est assimilée à une spire traversée par ce courant, ce qui génère un moment atomique orbital m_l

$$i = -\frac{e \cdot \omega_l}{2 \cdot \pi} \quad (\text{II.31})$$

$$m_l = -\frac{e \cdot \omega_l}{2} \cdot r^2 \quad (\text{II.32})$$

Avec :

e : est la charge de l'électron, sa valeur $1.619 \cdot 10^{-19}$ C.

m : est la masse de l'électron, sa valeur $9.11 \cdot 10^{-31}$ Kg.

Dans son mouvement l'électron possède un moment cinétique orbitale note L

$$L = m \cdot \omega_l \cdot r^2 \quad (\text{II.33})$$

De l'équation (1) et (2) le moment orbital atomique s'écrit :

$$m_l = -\frac{e \cdot h}{2} \cdot L \quad (\text{II.34})$$

La quantification du module du moment cinétique orbitale nous donne :

$$L = \hbar \cdot \ell \quad (\text{II.35})$$

Avec :

$$\hbar = \frac{h}{2 \cdot \pi}$$

Ou h désigne la constante de Planck et ℓ est un nombre entier qui prend les valeurs (0,1, 2,3...).

Le moment magnétique orbital est un multiple entier d'un moment unité appelé magnéton de Bohr noté :

$$m_b = \frac{e \cdot \hbar}{2 \cdot m} = 9,273 \cdot 10^{-34} \text{ Am} \quad (\text{II.36})$$

En plus de la rotation autour du noyau l'électron tourne sur lui-même provoquant magnétique appelle **spin** m_s .

$$m_s = \frac{e \cdot \hbar}{2 \cdot m} s \quad (\text{II.37})$$

Les modules des moments magnétique orbitaux et spin sont donnés par :

$$|m_l| = m_b \cdot \sqrt{l(l+1)} \quad (\text{II.37})$$

$$|m_s| = 2 \cdot m_b \cdot \sqrt{s(s+1)} \quad (\text{II.38})$$

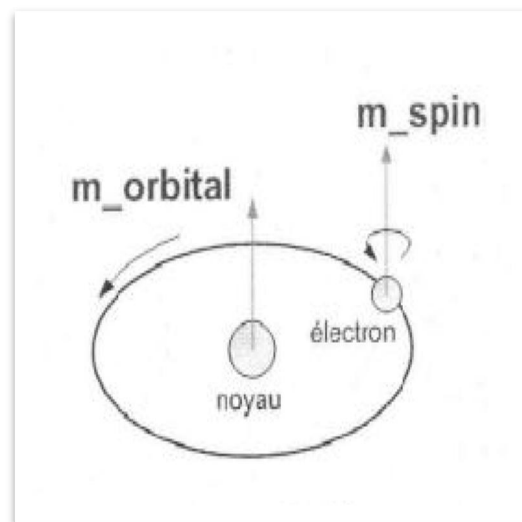


Figure II.1 Moment dipolaire atomique.

Dans un atome, ces différents moments magnétiques se composent pour donner le moment magnétique atomique.

VI.1 .Système a plusieurs électrons :

Dans un atome à plusieurs électrons, le moment magnétique total de cet atome est la somme des moments de chaque électron.

Pour les atomes présentant des couches électronique pleines, les moments atomique se compense globalement, mais si l'atome présente des sous couches incomplètes, la compensation n'est pas globale alors l'atome est dit magnétique $\neq 0$, donc la répartition des électrons sur les orbitales atomique est pertinente.

CHAPITRE II : Electromagnétisme et les matériaux

L'existence des électrons de spin up ($s=+1/2$) et des électrons de spin down ($s=-1/2$) explique cette différence, de ce fait on prendra en considération que les couches électronique incomplètes ou les moments orbitaux et de spin s'associe pour donner le moment atomique total m_A de module :

$$|m_A| = g \cdot m_b \cdot \sqrt{J(J+1)} \quad (\text{II.39})$$

Ou :

g : désigne le facteur de Lande qui entre 1 et 2.

$$g = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)} \quad (\text{II.40})$$

Ou :

J : moment cinétique total du module

$$|J| = |L + S| \quad (\text{II.41})$$

Ou :

$$|j| = |L + S|$$

VII. Les types du magnétisme :

VII.1 Le diamagnétisme :

Le diamagnétisme est une attitude (propriété) général de la matière, il se traduit par le fait que la plongé dans un champ d'excitation magnétique H le matériau acquiert une polarisation proportionnelle à H , qui s'exprime par l'équation qui suit :

$$J = \mu_0 \cdot \chi \cdot H \quad (\text{II.42})$$

Ou χ désigne la susceptibilité diamagnétique qui est une grandeur négative et très faible de l'ordre 10^{-5} , on ne peut la designer que dans les substances ne présentant aucun moment magnétique intrinsèque.

Donc on ne qualifie de diamagnétique que les substances pour lesquelles ce caractère est dominant, celle-ci présente obligatoirement des sous coches électroniques pleines.

CHAPITRE II : Electromagnétisme et les matériaux

Ce comportement s'explique par le fait que les électrons en mouvement autour du noyau atomique se comportent comme des spires traversées par un courant, qui plongé dans un champ magnétique vont sous l'action de la loi de Lenz générer un flux qui s'oppose à la variation du flux appliqué qui lui a donné naissance.

Malgré la faiblesse du comportement diamagnétique, mais il est très significatif dans les matériaux supra conducteurs qui possèdent une susceptibilité de (-1).

VII.2 Le paramagnétisme de Langevin :

On considère une population comportant N par unité de volume porteurs de moments magnétique m , et on se propose de caractériser le comportement de cette population plongé dans un champ appliqué.

En l'absence d'un champ extérieur, les moments atomiques se présentent dans toutes les orientations possibles, et le résultat à l'échelle de toute la population est nul.

En présence d'un champ extérieur B le moment atomique acquiert l'énergie potentielle :

$$u_i = m \cdot B \quad (\text{II.43})$$

Mais l'agitation thermique s'oppose à un alignement parfait des atomiques.

Dans l'état d'énergie libre minimale, la répartition des moments obéit à une statistique de MAXWELL-Boltzmann et la loi de répartition de l'écran angulaire θ entre l'orientation des moments et le champ appliqué.

Il est régi par une densité de probabilité tel que :

$$P(\theta) = C \cdot \exp(m \cdot B \cdot \cos(\theta) / K \cdot T) \quad (\text{II.44})$$

$K=1.3807 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ désigne la constante de Boltzmann.

T : la température absolue en Kelvin

θ : l'angle que fait le moment magnétique avec le champ appliqué.

B : champ appliqué.

CHAPITRE II : Electromagnétisme et les matériaux

M : moment magnétique atomique.

C : la constante de curie, elle vaut $\mu_0 \cdot N \cdot m^2 / 3 \cdot K$

En physique classique ou tous les orientations de moment atomique sont possible ($0 < \theta < \pi$) on obtient une polarisation parallèle à B et d'amplitude par unité de volume :

$$N = \int_0^\pi N_0 \cdot e^{\frac{m \cdot B \cdot \cos \theta}{K \cdot T}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \sin \theta \cdot d\theta \quad (\text{II.45})$$

Avec

N_0 : est le nombre d'atomes contenu dans l'angle solide.

$$J = \mu_0 \cdot N \cdot m \cdot L(x) \quad (\text{II.46})$$

$$X = \frac{m \cdot B}{K \cdot T} \quad (\text{II.47})$$

$$L(X) = \coth(X) - 1/X \quad (\text{II.48})$$

Est la fonction de Langevin.

La théorie de Langevin ne prend pas en considération la quantification des moments magnétiques.

Une approche plus complète consiste à tenir compte de la quantification des orientations des moments atomiques justifiée par la mécanique quantique, et qui impose que la projection des moments atomiques dans la direction du champ B ne peut prendre que $2J + 1$ valeurs.

Donc la fonction de Langevin peut être remplacé par la fonction Brillouin donnée par :

$$B_J(X) = \frac{2J+1}{2J} \cdot \coth\left(\frac{2J+1}{2J} \cdot x\right) - \frac{1}{2J} \coth \frac{x}{2J} \quad (\text{II.49})$$

A température ambiante les valeurs de $\frac{mB}{KT}$ sont très faible, donc la fonction de Langevin (ou Brillouin) peut être approximer par son développement limité au voisinage de 0 à la fonction suivante :

$$L(x) = x/3 \quad (II.50)$$

De telles sortes que la polarisation finale s'écrit :

$$J = \mu_0 \cdot N \cdot m \cdot \frac{x}{3} = \mu_0 \cdot \frac{N \cdot m^2 \cdot B}{3 \cdot K \cdot T} \quad (II.51)$$

La susceptibilité magnétique est alors :

$$\chi = \frac{J}{\mu_0 \cdot H} = \frac{J}{B} = \frac{N \cdot m^2 \cdot B}{3 \cdot K \cdot T} = \frac{C}{T} \quad (II.52)$$

$\chi = \frac{C}{T}$: est la loi de Curie.

$C = \frac{N \cdot m^2}{K \cdot T}$: est la constante de Curie

VII.3 -Le ferromagnétisme :

Le ferromagnétisme est un comportement associé aux matériaux magnétiquement ordonnés, cette caractéristique est décernée aux matériaux dont les distances entre les atomes sont suffisamment petite (de l'ordre de \AA) pour qu'ils interagissent, ils sont caractérisé par une susceptibilité élevé ($\gg 1$), positive et variable avec l'excitation magnétique, d'autre part les ferromagnétique présente une polarisation même en champ nul, cette polarisation est qualifié de spontané , elle est dû au fait que les moments atomiques ont tendance à s'orienter parallèlement les uns les autres , cette orientation est dépendante de la température, puisque au-delà d'un certaine température appelé température de Curie , la polarisation est qualifié spontané disparaît totalement , cette disparition est progressive , elle est traduite par une susceptibilité inversement proportionnelle a $T - T_c$, on parle alors de paramagnétisme de Curie-Weiss .

VII.4 Ferromagnétisme et matériaux ferromagnétiques :

A la différence du paramagnétisme et du diamagnétisme qui sont les propriétés individuelles des atomes les propriétés ferromagnétique sont liés aux particularités des structures cristallines de ces substances, le ferromagnétisme de définie comme étant la propriété du fer cristallin qui est une structure dont les atomes forment des arrangements réguliers et périodiques ; il est une propriété manifesté par le moment

CHAPITRE II : Electromagnétisme et les matériaux

magnétique de spin qui résulte des électrons libres (non couplés) dans les sous couches électroniques incomplètes comme la 3d pour les éléments de transition (Fe, Ni, Co.....) et la 4f pour les terres rares tel (Sm, Pr, Nd.....)

Elements de transition 3d

1 H 1.008																	2 He 4.003										
3 Li 6.941	4 Be 9.012	Elements de transition 3d										5 B 10.81	6 C 12.01	7 N 14.01	8 O 16.00	9 F 19.00	10 Ne 20.18										
11 Na 22.99	12 Mg 24.31	25 Mn 54.94	26 Fe 55.85	27 Co 58.93	28 Ni 58.70	13 Al 26.98	14 Si 28.09	15 P 30.97	16 S 32.06	17 Cl 35.45	18 Ar 39.95	19 K 39.10	20 Ca 40.08	21 Sc 44.96	22 Ti 47.90	23 V 50.94	24 Cr 52.00	29 Cu 63.55	30 Zn 65.38	31 Ga 69.72	32 Ge 72.59	33 As 74.92	34 Se 78.96	35 Br 79.90	36 Kr 83.80		
37 Rb 85.47	38 Sr 87.62	39 Y 88.91	40 Zr 91.22	41 Nb 92.91	42 Mo 95.94	43 Tc (98)	44 Ru 101.1	45 Rh 102.9	46 Pd 106.4	47 Ag 107.9	48 Cd 112.4	49 In 114.8	50 Sn 118.7	51 Sb 121.8	52 Te 127.6	53 I 126.9	54 Xe 131.3	55 Cs 132.9	56 Ba 137.3								
87 Fr (223)	88 Ra (226)	Terres rares																86 Rn (222)									
		57 La 138.9	58 Ce 140.1	59 Pr 140.9	60 Nd 144.2	61 Pm (145)	62 Sm 150.4	63 Eu 152.0	64 Gd 157.3	65 Tb 158.9	66 Dy 162.5	67 Ho 164.9	68 Er 167.3	69 Tm 168.9	70 Yb 173.0												
		Actinides														89 Ac (227)											
		89 Ac (227)	90 Th 232.0	91 Pa (231)	92 U 238.0	93 Np (237)	94 Pu (240)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (251)	98 Cf (252)	99 Es (257)	100 Fm (258)	101 Md (258)	102 No (259)												

Figure II.2 Tableau de Mendeleïev.

VII.5 .Domaine magnétique

Un domaine magnétique est une région où les moments magnétiques forment un assemblage localisé et orienté dans la même direction, et le moment résultant dans ces régions est la somme de ces moments de même direction que les moments la constituant, ces régions sont séparées par des parois appelées de Bloch ; il existe une alimentation à l'intérieur des domaines sans l'application d'un champ extérieur, on dit qu'il existe une aimantation spontanée, mais comme les moments magnétiques sont orientés différemment d'un domaine à l'autre, alors il n'existe aucune aimantation résultante à l'échelle macroscopique.

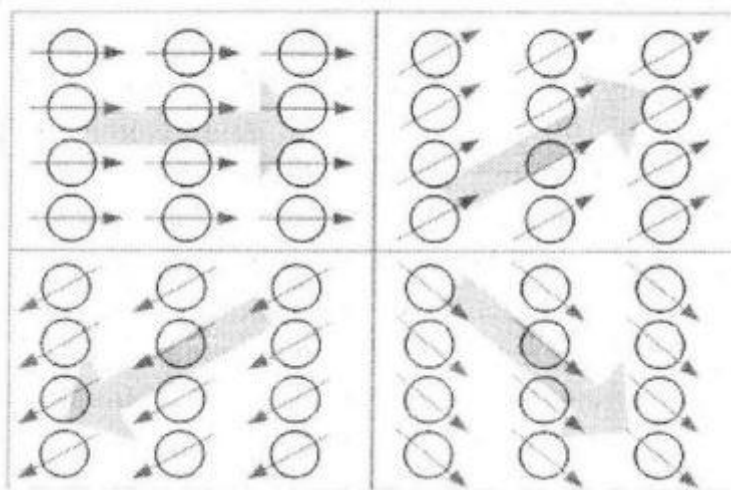


Figure II.3- Schéma simplifié de domaines.

VII.6 matériaux magnétiques :

Lorsque ces matériaux sont soumis à un champ magnétique extérieur, un champ magnétique induit est engendré par le corps magnétique lui-même. La direction de l'aimantation moyenne obtenue suite à l'application du champ extérieur, dépend de la nature magnétique du matériau constituant ce corps. La susceptibilité magnétique χ est une grandeur caractéristique des matériaux magnétiques. Elle prend des valeurs différentes, positives ou négatives, d'un matériau magnétique à l'autre. D'un matériau à l'autre, la susceptibilité magnétique peut prendre une valeur constante ou varier en fonction du champ magnétique d'excitation \vec{H} appliqué (figure). En fonction de cette susceptibilité magnétique, les matériaux sont classés en trois grandes familles : ferromagnétiques, paramagnétiques et diamagnétiques.

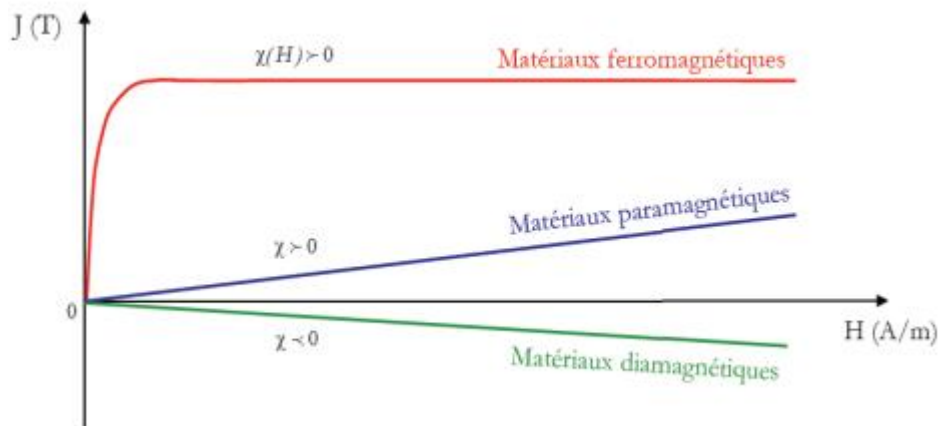


Figure II.4 - Illustration du comportement magnétique des corps magnétiques : La courbe $J(H)$ est linéaire le cas des matériaux paramagnétiques et diamagnétiques et non linéaire dans le cas des matériaux ferromagnétiques

VII.7 : Matériaux diamagnétiques :

En 1847, lors d'une expérience de magnéto-optique, FARADAY découvre les corps diamagnétiques. En effet, la plupart des entités présentes dans la nature sont diamagnétiques, en particulier l'eau, le vivant et la quasi-totalité de la matière biologique et organique.

Les substances diamagnétiques s'aimantent faiblement dans le sens opposé au champ magnétisant. Leur aimantation cesse dès que le champ magnétisant est supprimé. Dans cette catégorie, la valeur de la susceptibilité magnétique est négative

CHAPITRE II : Electromagnétisme et les matériaux

est très faible en module ($< 10^{-3}$) par rapport aux matériaux ferromagnétiques. Cela implique que le champ magnétique produit par ces substances diamagnétiques de la présence d'un champ magnétique extérieur est très négligeables à son regard .ce groupe inclut également plusieurs minéraux qui ne contiennent pas de fer tel que : quartz, le carbonate et le calcium .cette catégorie contient aussi des non minéraux come la matière organique et plastiques.

Dans une substance diamagnétique soumise à un champ magnétique, il se produit une circulation d'électrons provoquant une aimantation globale alignée en sens inverse du champ magnétique appliqué. A l'encontre des matériaux ferromagnétiques et paramagnétiques, la substance diamagnétique est légèrement repoussée par le champ magnétique et également les lignes de densité du flux magnétique à l'extérieur (figure VI.2).cet effet provient cette fois-ci des moments magnétique net (il n'ya aucun électron dépareille).il est dû au comportement non coopératif des électrons orbitaux une fois exposés à un champ magnétique extérieur

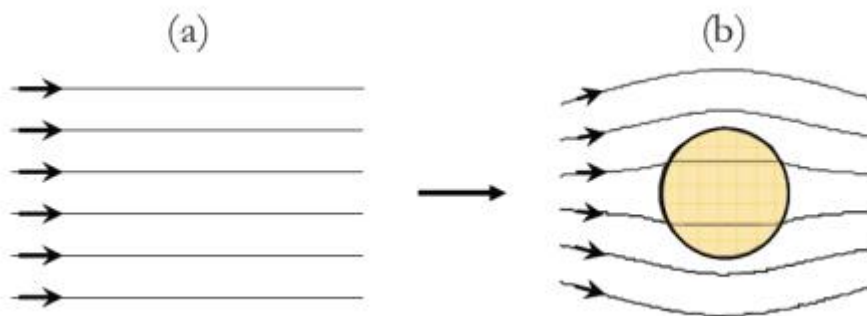


Figure II.5-iso valeurs de la densité du flux magnétique issu d'une source magnétique seul, (b) modification la cartographie initiale suite à la présence d'un corps diamagnétique

Dans le tableau (II.1) nous présentons la susceptibilité de quelques diamagnétiques :

Matériaux diamagnétiques	Susceptibilité magnétique
Latex	-8.21×10^{-6}
Silice	-14×10^{-6}
Bismuth	-175×10^{-6}
Eau	-9.06×10^{-6}

Tableau II.1 : valeur de la susceptibilité magnétique de quelques matériaux diamagnétiques

VII.8 matériaux paramagnétiques :

Les corps dits paramagnétiques, ont été caractérisés par Pierre Curie. Ce dernier constate que certains matériaux possèdent deux particularités : leur susceptibilité est positive d'une part et elle varie comme l'inverse de la température.

Les matériaux paramagnétiques possèdent des moments permanents libres de s'orienter dans toute la direction. Ainsi en l'absence de champ magnétique, aucune direction n'est privilégiée et l'aimantation globale est nulle.

Sous l'action d'un champ appliqué \vec{H} et à température non nulle, les moments tendent à s'aligner le long des lignes de champ, dans le sens de \vec{H} , mais l'agitation thermique limite cet effet : la susceptibilité magnétique est donc faible.

A température ambiante, la susceptibilité de tels matériaux varie de 10^{-3} à 10^{-5} soit environ 10^8 fois inférieure aux matériaux ferromagnétiques leur susceptibilité très légèrement supérieure à 0 les rend plus faciles à traverser par le champ magnétique que le vide ou l'air figure (VI.3). Par voie de conséquence, ils sont légèrement attirés par les zones de champ important.

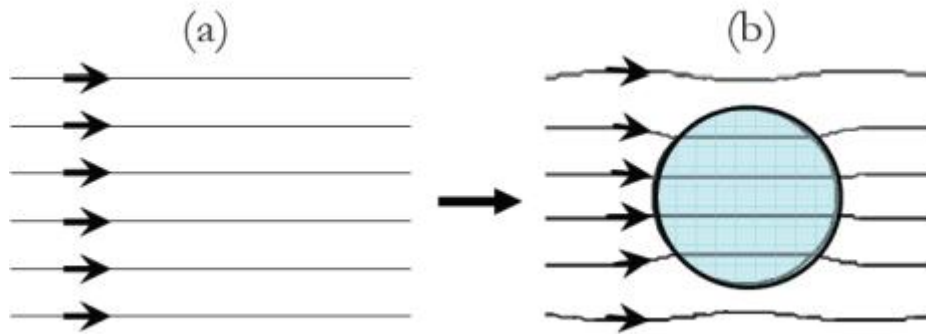


Figure 11.6 (a) Isovaleurs de la densité du flux magnétique issu d'une source magnétique seul, (b) modification de la cartographie de la densité du flux magnétique suite à la présence d'un corps paramagnétique

Dans le tableau (II.2) nous présentons la susceptibilité de quelques paramagnétiques :

Matériaux paramagnétiques	Susceptibilité magnétique
Sodium	8.6×10^{-6}
Aluminium	7.7×10^{-6}
Manganèse	1.2×10^{-6}
Tantale	1.1×10^{-6}
tungstène	3.5×10^{-6}

Tableau II.2 : valeur de susceptibilité magnétique de quelques matériaux paramagnétiques

VII.9 Matériaux ferromagnétiques :

Les atomes des matériaux ferromagnétiques possèdent des moments magnétiques permanents. De fait des fortes interactions entre moments proches, l'orientation du moment d'un atome est liée à celle de ses atomes voisins. On observe alors le regroupement des atomes en domaines microscopiques dans lesquels le moment atomique de tous les atomes s'oriente dans la même direction (figure VI.4). Ces domaines sont appelés domaines de Weiss.

En l'absence de champ, ces domaines s'orientent de sorte à minimiser l'énergie magnétostatique globale, c'est à dire que les matériaux présentent tend à

CHAPITRE II : Electromagnétisme et les matériaux

s'aligner facilement dans la direction du champ et y est maintenu par ses voisins. Les matériaux ferromagnétique sont donc faciles a aimanter, même en présence d'un champ faible.

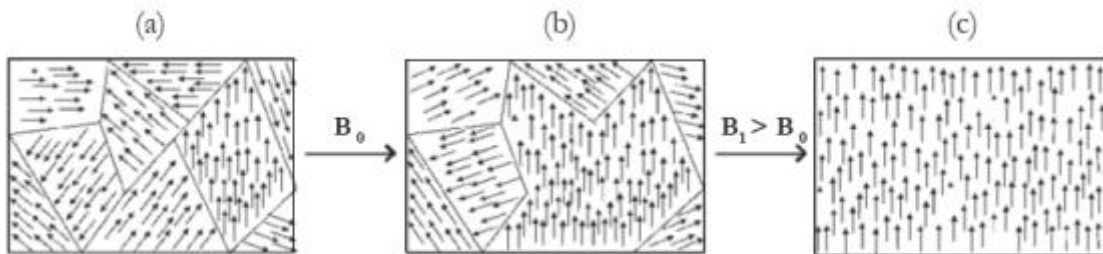


Figure 11.7 - l'orientation des domaines de Weiss dans les matériaux ferromagnétiques, (a) sans champ d'excitation externe, (b) en présence d'un champ extérieur, (c) saturation du matériau soumis à un champ magnétique extérieur de forte intensité

A cause des valeurs très élevées de la successibilité magnétique des matériaux ferromagnétiques, celle-ci pourrait être assimilée à la valeur de leur perméabilité. Les matériaux ferromagnétiques ont aussi la propriété de canalisation et/ou de concentration du champ d'induction magnétique (figure 11.7). La présence d'un corps ferromagnétique dans un champ magnétique par la concentration des lignes de la densité du flux à l'intérieur du corps ferromagnétique

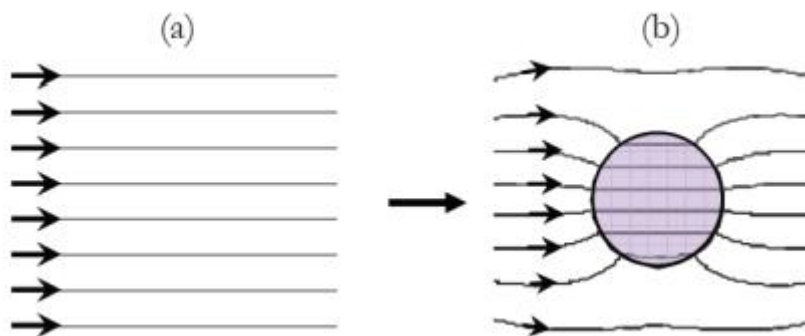


Figure 11.8 – (a) Isovaleurs de la densité du flux magnétique issu d'une source magnétique seul, (b) modification de la catographie de la densité du flux magnétique suite à la présence d'un corps ferromagnétique.

CHAPITRE II : Electromagnétisme et les matériaux

La susceptibilité des matériaux ferromagnétiques n'est pas constante et dépend du champ magnétique. Elle peut redevenir unitaire au-delà d'un certain seuil de champ d'excitation en raison d'une saturation (on parle de saturation magnétique). Nous indiquons dans le tableau ci-dessous les valeurs maximales de susceptibilité de quelques matériaux ferromagnétiques (tableau II.3)

Matériaux paramagnétiques	Susceptibilité magnétique
Cobalt	250
fer	1000
Mu métal	100000
nickel	600

Tableau II.3 Susceptibilité magnétique de quelques matériaux ferromagnétiques

Lors de suppression du champ magnétique extérieur, l'aimantation persiste plus ou moins. A ce stade, plusieurs types de comportements sont possibles : durs ou doux.

VII.9.1 matériaux ferromagnétiques doux :

Les matériaux magnétiques doux ont une réponse unique à un niveau d'excitation et lorsque cette excitation est supprimée, ils perdent leur aimantation. Dit autrement, l'orientation des moments revient dans un état comparable à l'état initial. Aimantés, l'influence de ces matériaux sur le champ extérieur est importante.

En effet, il est énergétiquement beaucoup plus facile pour le champ magnétique de les traverser que de traverser le vide ou l'air (figure II.9). Ils sont donc très couramment utilisés pour canaliser ou concentrer le champ.

VII.9.2 matériaux ferromagnétiques durs :

Les matériaux magnétiques durs, communément appelés aimants, présentent une forte hystérésis. Ainsi, lorsque le champ exciteur est retiré, de nombreux moments restent orientés (effet mémoire). Ces matériaux créent alors leur propre champ magnétique, dit permanent. Ils sont donc utilisés en tant que sources de champ magnétiques. Tous les matériaux ferromagnétiques sont fortement attirés par

CHAPITRE II : Electromagnétisme et les matériaux

les zones de champs forts. En effet, leur présence diminue significativement l'énergie magnétostatique requise pour aimanter le milieu.

Traditionnellement, les matériaux ferromagnétiques possédant un champ coercitif inférieur à 10^3 A/m (12.5Oe) sont dits ferromagnétiques durs.

La différence entre ces deux types de matériaux ferromagnétiques est bien illustrée par la figure (II.9) qui représente leurs cycles d'hystérésis.

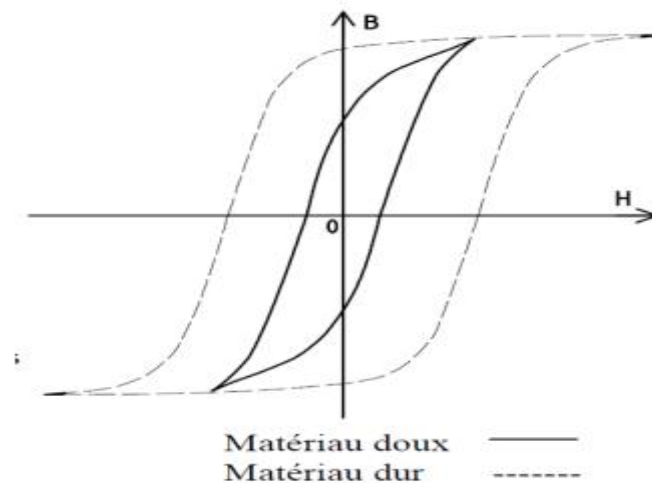


Figure II.9 : Cycle d'hystérésis des matériaux doux et durs .

Les matériaux magnétiques, notamment, les ferromagnétiques ont de nombreuses applications dans les microsystèmes. Bien que les matériaux magnétiques doux ont trouvés la plus grande utilité dans les MEMS, l'amélioration des procédés d'intégration dans les micros actionneurs et les micros capteurs.

VII.10. aimants permanents :

Les aimants permanents font partie de la famille des matériaux ferromagnétiques durs. Ils sont connus à l'état naturel de puis longtemps. La pierre d'aimant (aimant naturel) a été découverte dans la ville de magnésie en Asie mineure. Ces matériaux conservent une magnétisation magnétique permanente dont l'effet le plus sensible est d'attirer un morceau de fer. Le premier ouvrage : essai de créer des aimants artificiels, en utilisant le champ magnétique terrestre pour magnétiser des barres de fer.

CHAPITRE II : Electromagnétisme et les matériaux

Les aimants permanents ont été utilisés dans les actionneurs et les capteurs pour fournir un champ magnétique sans consommation d'énergie électrique et sans production de chaleur. Ils peuvent atteindre une densité d'énergie relativement élevée dans les microstructures. Pour magnétiques durs à savoir, les aimants permanents dans les dispositifs MEMS.

VII.10.1 propriétés magnétiques des aimants :

Les aimants sont caractérisés par la courbe d'hystérésis : connue aussi par la courbe $J(H)$ qui caractérise l'évolution de la polarisation magnétique J en fonction du champ d'excitation H (figure II.10 (a)). La courbe de la première aimantation révèle la non – linéarité de là ces matériaux. la courbe d'hystérésis dans le second cadrent (J positif, H négatif) permet de déduire des informations sur la désaimantation des aimants permanents. Cette partie de la courbe est communément appelée courbe de désaimantation (figure II.10.(b)). On constate que la polarisation magnétique diminue légèrement le long du tronçon AB. Cet effet est totalement réversible tant que la valeur du champ d'excitation magnétique reste inférieure à H_k . Appelé champ critique .au-delà de cette valeur, les moments magnétiques commencent à s'orienter d'une manière irréversible dans le sens opposé. si par exemple le champ d'excitation magnétique est annulé en C, la polarisation magnétique va revenir en D, en suivant une ligne quasiment parallèle à la droite AB. la valeur du champ H_k est importante car elle caractérise la limite de réversibilité au-delà de laquelle les moments magnétiques s'orientent car d'une manière irréversible. Autrement dit, c'est stade au-delà de la quel l'aimant commence à perdre d'une manière irréversible son aimantation initiale.

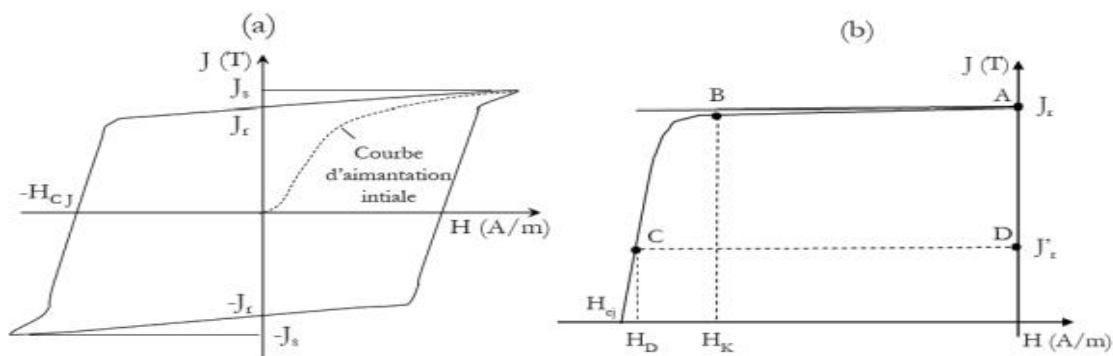


Figure 10; (a) courbe d'hystérésis d'un aimant permanent, (b) la courbe de désaimantation.

VII.10.2 variation du champ avec le temps et la température-point de curie :

Les champs magnétiques créés par les aimants permanents modernes sont très stable. Bien que tout aimant ait tendance à perdre sa force avec le temps, cette diminution est si lente qu'elle est presque imperceptible. Par exemple, on estime qu'un aimant en Alnico retient 99% de son aimantation origine après 100 ans d'utilisation. On peut, par des méthodes spéciales, stabiliser l'aimant encore davantage.

La température joue également un rôle important. A mesure qu'elle augmente, la densité de flux produite par l'aimant diminue et, à une température élevé, appelée point de curie, il perd complètement sa perméabilité de même que ses propriétés d'aimant permanent. Cette haute températures provoque en effet une vibration atomique intense qui détruit l'orientation des domaines .le point de curie varie avec les matériaux, mais il se situe habituellement entre 700°C et 900°C.

VII.10.3 principaux matériaux constitutifs des aimants permanents :

Les principaux matériaux dans la fabrication des aimants permanents sont les alliages alnico, les ferrites durs et les composés terres rares.

- **les alnico :**

On désigne sous le nom d'alnico les alliages qui comportent en plus du fer, du cobalt et du nickel, puis, des proportions plus restreintes de l'aluminium et du cuivre. On peut citer les variétés les plus connues sous le nom d'alnico 5 ou de ticonal 600 qui possèdent une induction rémanente de 1,25T avec un champ coercitif d'environ 50 KA/m e une énergie spécifique de 40KJ/m³



Figure II.11: Aimant en Alnico

- **les ferrites dures :**

Les ferrites sont des composés d'oxydes métalliques comprenant, avec l'oxyde ferrite (oxyde de fer 3) Fe_2O_3 un ou plusieurs oxydes Mo (ou M peut être le baryum, le strontium, le plomb ou le calcium). ils possèdent une faible induction rémanente de l'ordre de 0,22T avec un champ coercitif de 145KA/m et une énergie spécifique de $7.5KJ/m^3$



Figure II.12:Aimant en ferrites

Les ferrites de baryum ont une induction rémanente comprise entre 0,36et 0,4 T avec un champ coercitif de 180 à200KA/m. l'énergie spécifique est comprise entre 25 et 30 KJ/m^3 ; tandis que, les ferrites de strontium possèdent une induction rémanente de 0,38 et 0,43 T avec un champ coercitif de 200 à 256 KA/m et une énergie spécifique pouvant atteindre $35 KJ/m^3$.

- **les composés terre rares :**

CHAPITRE II : Electromagnétisme et les matériaux

Les métaux terres rares sont les éléments du groupe de lanthane ou lanthanides. Contrairement à ce que leur nom pourrait laisser croire, ces éléments sont abondants dans le sol ou ils existent en quantités très importante que le plomb, l'étain ou le bismuth.

a) Les cobalt-terres rares :

Ce sont seulement le composés TR_xCO_y dans les quels TR est une terre rare légère (samarium). Ils sont connue principalement sous les formes $SmCO_5$ et Sm_2CO_{17} possédant un champ coercitif élevé de l'ordre de 1500 à 2000KA/m et une induction à saturation de 0,97T

b) les fer-terre rares :

Les aimants de types NdFeB (néodyme fer bore) sont développés depuis une vingtaine d'années ; à l'échelle industrielle ils sont constitués de la phase $Nd_2Fe_{14}B$. Ils sont moins couteux que les SmCo et présentent des propriétés magnétiques supérieures leur énergie spécifique est de $400KJ/m^3$ à température ambiante et un champ coercitif de 800 à 950 KA/m, ainsi qu'une induction à saturation pouvant atteindre 1,6 T. malheureusement, ils sont utilisables à des températures supérieures à $100^\circ C$ car leur point de curie avoisine $310^\circ C$ et très sensible à l'oxydation de l'air, il est donc recommandé de les métallisés



Figurell.13: aimant de type NdFeB

VII.10.1 différents types de micros aimants permanents :

- **aimant massifs :**

CHAPITRE II : Electromagnétisme et les matériaux

Des aimants massifs, mécaniquement usinés, sont utilisés en électrotechnique puisqu'il s'agit ici des aimants frittés, leur aimantation ne se réalise qu'après le processus de frittage. Ces aimants sont relativement faciles à fabriquer, ils ont les meilleures propriétés magnétiques et de très bonnes propriétés mécaniques. Ils ont aussi été utilisés dans certains microsystèmes magnétiques ; ils y sont donc micro-usinés en cubes ou des cylindres submillimétriques.

Les caractéristiques magnétiques à la surface de l'aimant peuvent être considérablement affectées par l'effet du micro usinage, lorsqu'il s'agit de géométries très fines. Les dimensions minimales de ces aimants atteignent environ $500\ \mu\text{m}$ pour le NdFeB et $250\ \mu\text{m}$ pour le SmCo. au-delà de ces dimensions, la mise en œuvre d'une part, la détérioration des propriétés magnétiques de l'autre, rendent pratiquement impossible leur utilisation.

Pour certains prototypes, par exemple les miroirs adaptatifs utilisent des micros aimants réalisés en technique classique par Comadur, une société suisse spécialisée dans les aimants pour l'industrie. Il s'agit du micro-usinage d'aimants SmCo massifs par électroérosion. Bien que très bien adaptée à la fabrication de montres, dont le montage est toujours unitaire, cette technique reste efficace pour la réalisation de prototypes mais est peu adaptée à la fabrication collective de microsystèmes.

- ***Aimant en poudre :***

Une autre approche de fabrication de micro aimant consiste à mélanger de la poudre d'aimant permanent dans une résine époxy. Des aimants cylindriques sont aussi créés, de $90\ \mu\text{m}$ d'épaisseur et de 4 mm de diamètre typique. Lorsque l'aimant est magnétisé dans l'axe de l'épaisseur, la coercivité est de 320KA/m et l'induction rémanente est de 60 mT. L'induction rémanente est donc très faible et très inférieure à la la coercivité. Suivant la direction de la couche mince l'induction rémanente est de 0,3T. L'induction atteint conséquemment une valeur proche de la coercivité du matériau ; cette performance magnétique est, en elle seule, encourageante. La différence entre ces deux valeurs d'induction rémanente s'explique par l'importance du champ démagnétisant à l'intérieure de l'aimant.

CHAPITRE II : Electromagnétisme et les matériaux

L'élaboration des aimants moulus NdFeB peut offrir de nouvelles applications aux micros technologies magnétiques. Afin de conserver de bonnes propriétés magnétiques du matériau, il est nécessaire d'utiliser des poudres nanostructures. Les aimants moulus sont donc directement obtenus à partir d'un mélange entre la poudre d'aimant et la résine d'époxy, l'étape de frittage étant ainsi éliminée. Ces premiers aimants ont donc été réalisés à partir de NdFeB. La taille typique des grains de poudre est de quelques $30\ \mu\text{m}$ et le coefficient de concentration du matériau magnétique dans la poudre est estimé à environ 60%. L'aimantation rémanente du matériau est d'environ 0,4T.

- ***Aimants en couches minces :***

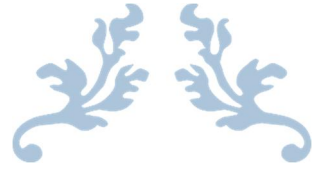
Le dépôt des matériaux en couches minces constitue et continue à être l'un des principaux axes qui ont permis le développement des microsystemes. Des métaux purs d'abord, suivis des alliages complexes, ont été déposés en couches par des techniques des lithographies (dépôt, gravure, LIGA), permettant ainsi de créer des systèmes mécaniques à l'échelle microscopique. Plusieurs laboratoires maîtrisent les techniques de dépôts de matériaux magnétostrictifs et ferromagnétiques doux en couches par pulvérisation cathodique .cependant, le dépôt d'aimant permanents est bien plus difficile. Les propriétés des aimants déposés actuellement sont médiocres (épaisseur, coercivité, rémanence). C'est grâce aux techniques de dépositions par laser que les aimants permanents déposés en couche minces sont, eux aussi, actuellement développés ; le développement de ces types d'aimants constitue un de base dans les microsystemes magnétiques,

Toutefois les propriétés de ces aimants restent limités, les épaisseurs déposées sont toujours limitées à quelques micromètres ; à partir de $1,5\ \mu\text{m}$ et jusqu'à $300\ \mu\text{m}$.

Nous signalons finalement que, ces couches ayant une taille proche de celle des magnétiques, les cycles d'hystérésis en sont directement perturbés et la performance magnétique de l'aimant qui en résulte affectée.

- ***Aimants électro déposés :***

Plusieurs laboratoires ont commencé à développer l'électroformage d'alliage magnétique dur platine-cobalt. L'électroformage des aimants est très intéressant car il est compatible avec la fabrication collective. Mais une des limitations vient du fait que seuls les alliages métalliques sont actuellement électro formables, et non pas les aimants les plus performants (alliages aux terres rares ; NdFeB et (SmCo) du fait de leur structure cristalline complexe.



CHAPITRE III : RESULTAT ET INTERPRETTION



Introduction :

Dans ce chapitre on présente la modélisation du système de pulvérisation cathodique, développé par l'unité de recherche UR-MPE/Boumerdes en contribution avec le Centre de Recherche Nucléaire de Birine, par le logiciel de simulation Maxwell Ansys. Les résultats de l'étude paramétrique (géométrie, dimension, matériau, tension d'alimentation, distance inter-électrode,...) menée sont également explicités dans ce chapitre.

I. Présentation de logiciel CAO Maxwell Ansys:

I.1. Définitions du Maxwell Ansys :

Maxwell Ansys est le logiciel de simulation de champ électromagnétique ; le choix pour les ingénieurs chargés de la conception et l'analyse des dispositifs électromagnétiques et électromécaniques 3-D et 2-D, y compris les moteurs, actionneurs, les transformateurs, les capteurs et bobines. [13]

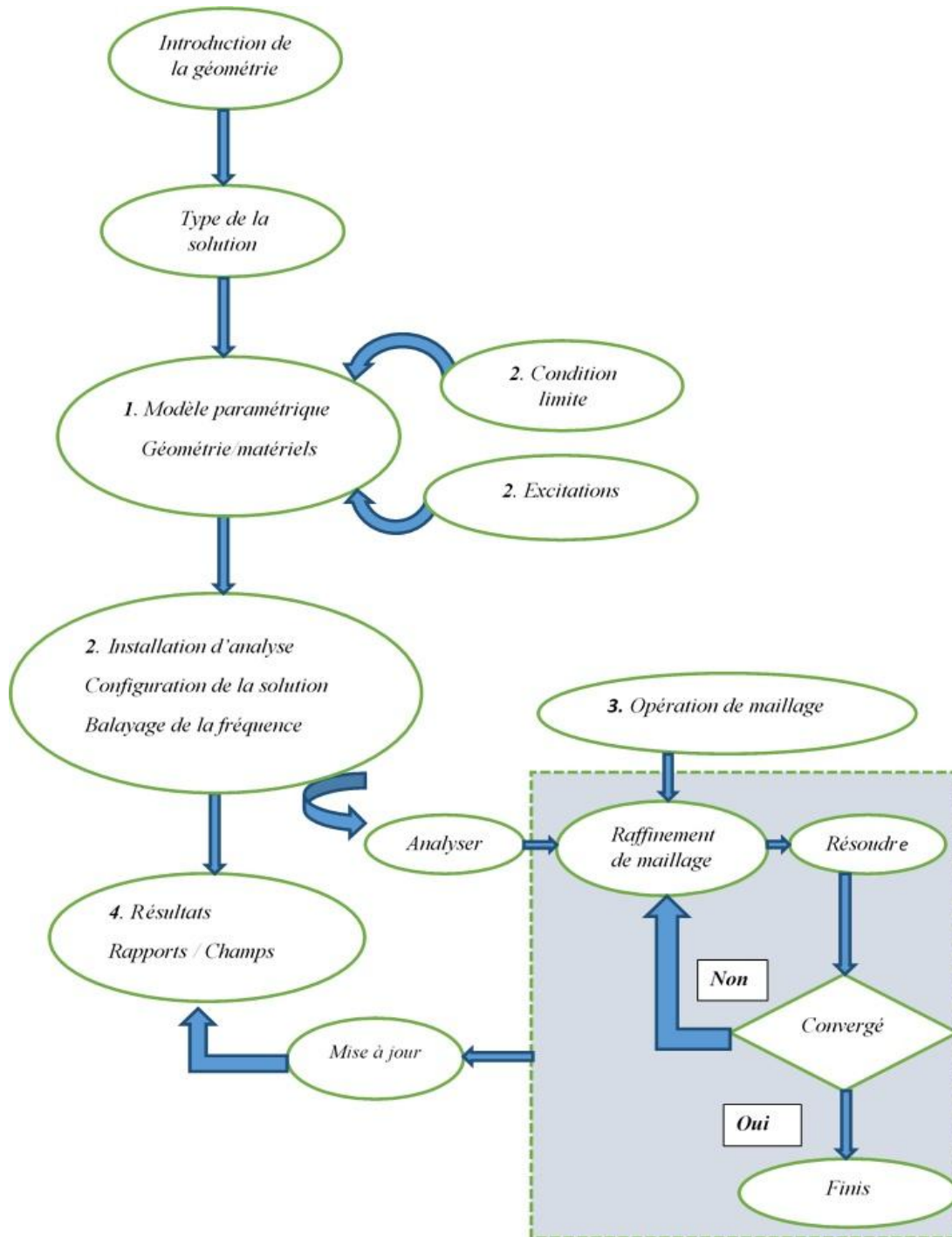
Maxwell utilise la méthode des éléments finis précis. Dans le domaine fréquentiel, et les champs électromagnétiques et électriques variant dans le temps.

Un des principaux avantages d'ANSYS Maxwell est son processus de solution automatisée, pour lesquels nous devons spécifier que la géométrie, les propriétés des matériaux et la sortie désirée. De ce point, Maxwell génère automatiquement un maillage approprié, efficace et précis pour résoudre le problème. Ce processus éprouvé de maillage adaptatif automatique élimine la complexité du processus d'analyse et nous permet de bénéficier d'un flux de conception faciles à utiliser. [13]

Un élément clé dans ANSYS Maxwell est la capacité de générer de haute-fidélité, des modes d'ordre réduit à partir de la solution par éléments finis.

Maxwell permet de combiner des circuits complexes avec des modèles de composants précis pour la conception de systèmes électroniques complets et électromécanique de haute performance, mécatroniques et de puissance, Ce qui crée un puissant flux de conception électromagnétique.

I.2. Organigramme de fonctionnement de Maxwell ansys



II. Présentation des composants de l'enceinte PVD :

II.1. L'enceinte PVD sous environnement Maxwell Ansys :

La Figure 1 présente le modèle de l'enceinte PVD faite avec le logiciel de conception Maxwell Ansys.

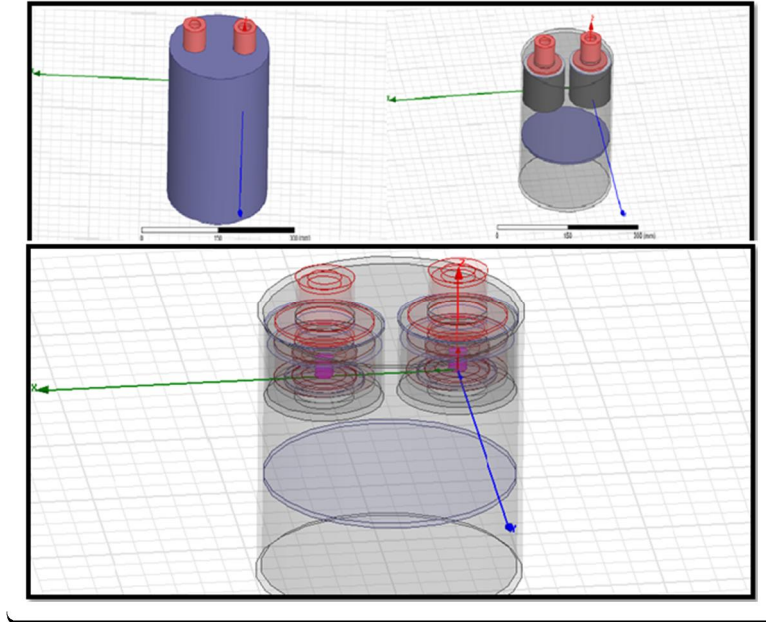


Figure 1: Une vue générale de l'enceinte de dépôt PVD au complet

L'enceinte *PVD* est constituée de deux cathodes magnétrons qui sont similaires. Elles ont les mêmes constituants et le même dimensionnement, sur les quelle se base notre étude.

II.2. La cathode magnétron sous environnement Maxwell Ansys :

La figure (2) (a) présente la structure de la cathode cylindrique sur différente vue qui a été conçue en utilisant le Maxwell Ansys

La figure (2) (b) présente les diverses pièces de la cathode qu'on va définir par la suite et citer le rôle de chaqu'une de ces composantes.

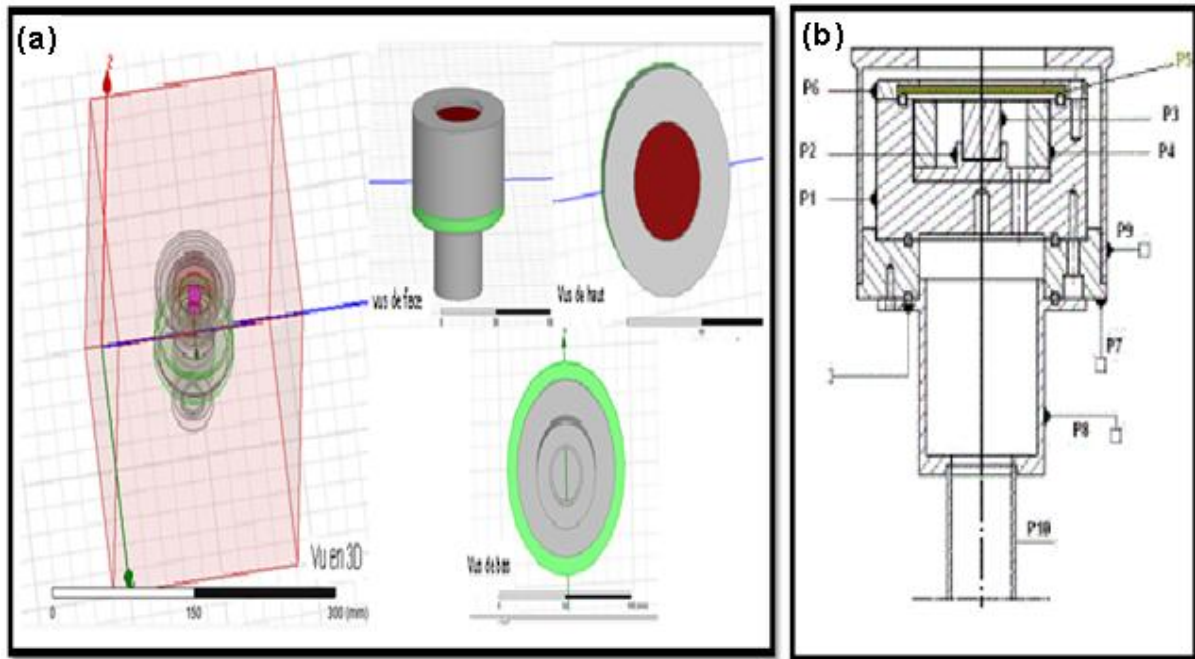


Figure 2: (a) Différente vue de la cathode, et (b) les pièces constituant de la cathode magnétron.

III. Les composantes de la cathode magnétron :

Le tableau (01) résume les composantes de l'enceinte PVD, les noms et les matériaux qui constituent chaque une de ces pièces P (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9), (figure (2) (b)).

Pièce	Figure	La désignation de la pièce	Le nom du matériau
P1	III.3	Le port aimant	Acier inoxydable
P2	III.5	Limiteur de champ	Fer
P3	III.6	Aimant permanent	Aimant permanât
P4	III.7	Aimant permanent	Aimant permanât
P5	III.8	La cible	Nickel(Ni) ou titane (Ti)
P6	III.9	couvercle cible	Acier inox
P7	III.10	Support port aimants	Téflon
P8	III.14	Support cathode	Acier inox
P9	III.16	Cache externe	Acier inox

Tableau 1: les composantes de la cathode magnétron

CHAPITRE III : RESULTAT ET INTERPRETTION

III.1 le Port aimants P1:

La figure (3) présente « le Port aimants », il est fait en acier inoxydable, il sert comme support pour les trois pièces les plus importantes «Limiteur de champ (P2), aimants permanents (P3 et P4) ».

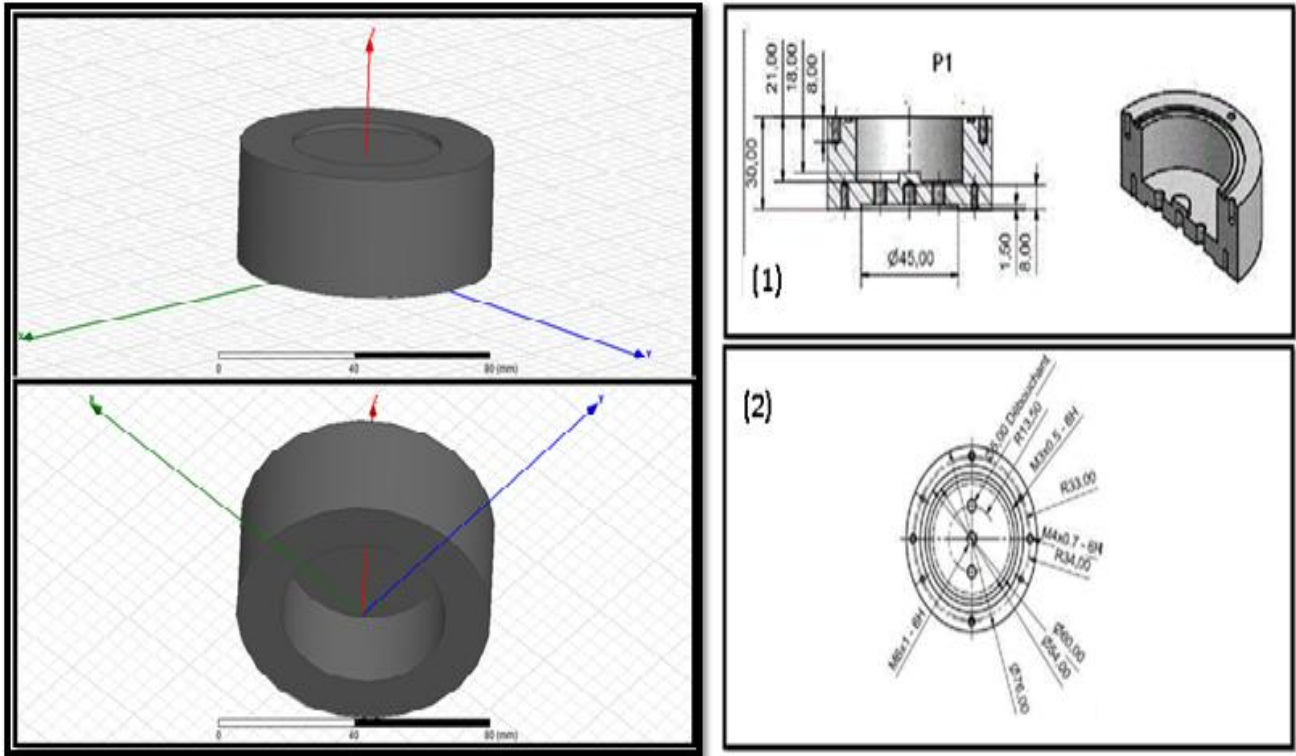


Figure 3: Les dimensions du Port aimants (La Pièce (P1))

III.2 Limiteur de champ P2 :

La figure (4) donne les différentes dimensions de la géométrie de la pièce P2 (rayon et sa hauteur).

Le limiteur de champ porte les deux aimants permanents (P3) et (P4), c'est un matériau ferromagnétique (nickel, fer, cobalt, ferrite,etc.) son rôle est d'assurer l'acheminement des lignes du champ magnétiques.

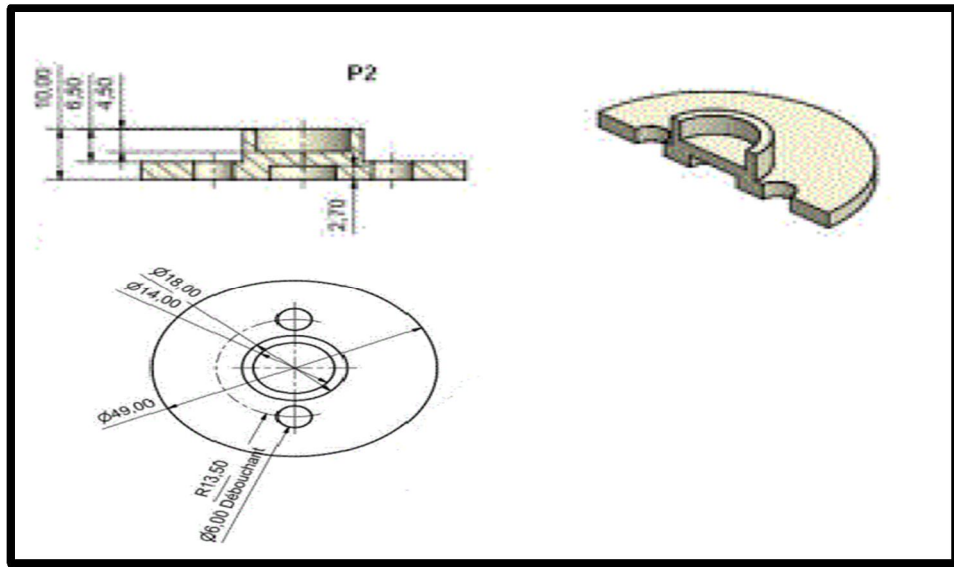


Figure 4: Démentions de Limiteur de champs la pièce P2

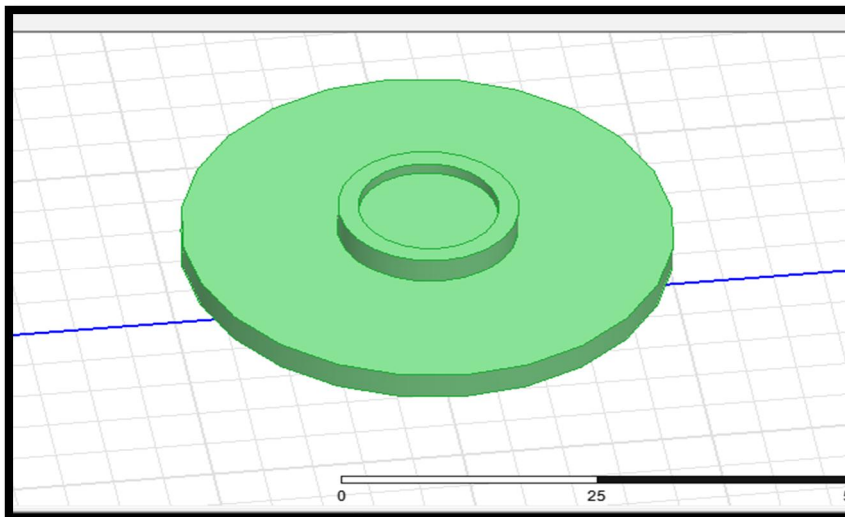


Figure 5: « Limiteur de champ P2 »

III.3 Aimant permanent (P3) (P4)

« Figure (6) et (7) » sont deux aimants permanents, utilisés comme un générateur de champs magnétique.

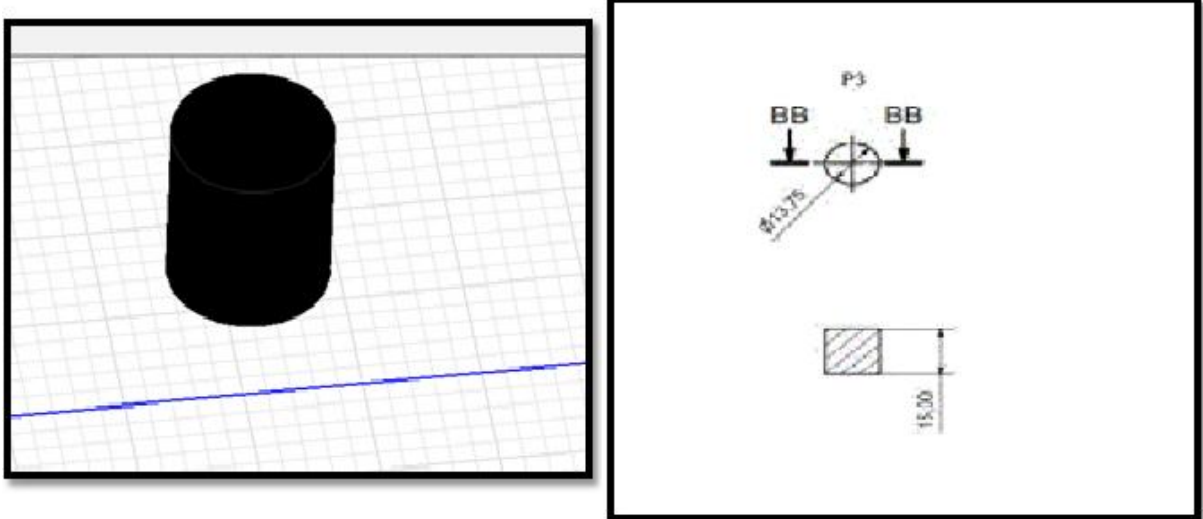


Figure 6: Aimant permanent La Pièce (P3)

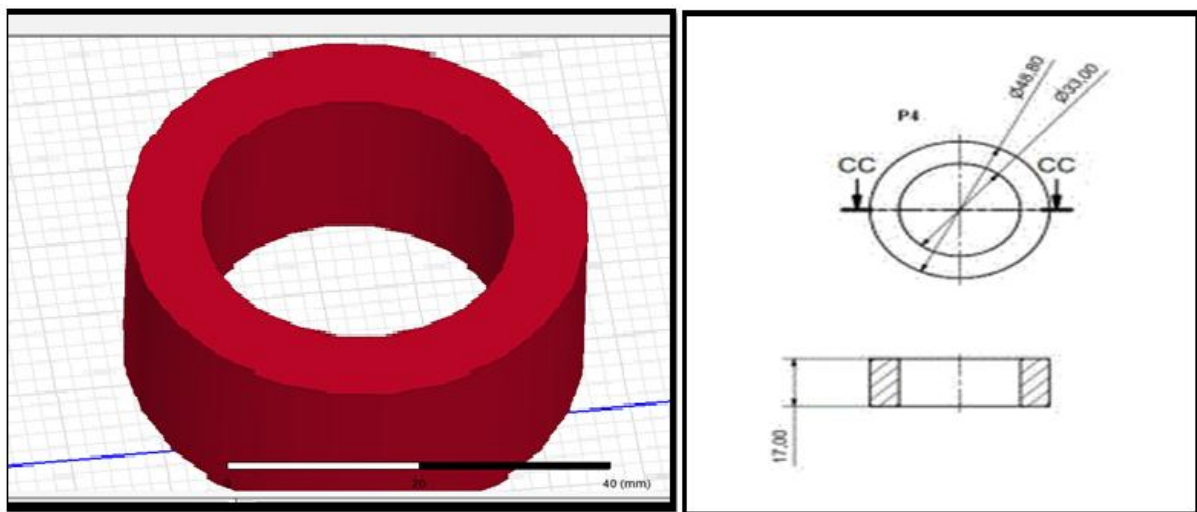


Figure 7: Aimant permanant La Pièce (P4)

III.4 La cible (P5) :

La cible figure (8) sert comme objectif à bombarder avec les électrons qui devient par la suite une couche mince pour le substrat, dans notre cas les matériaux utilisés pour cette pièce sont le **Nickel(Ni)** et le **titane (Ti)**.

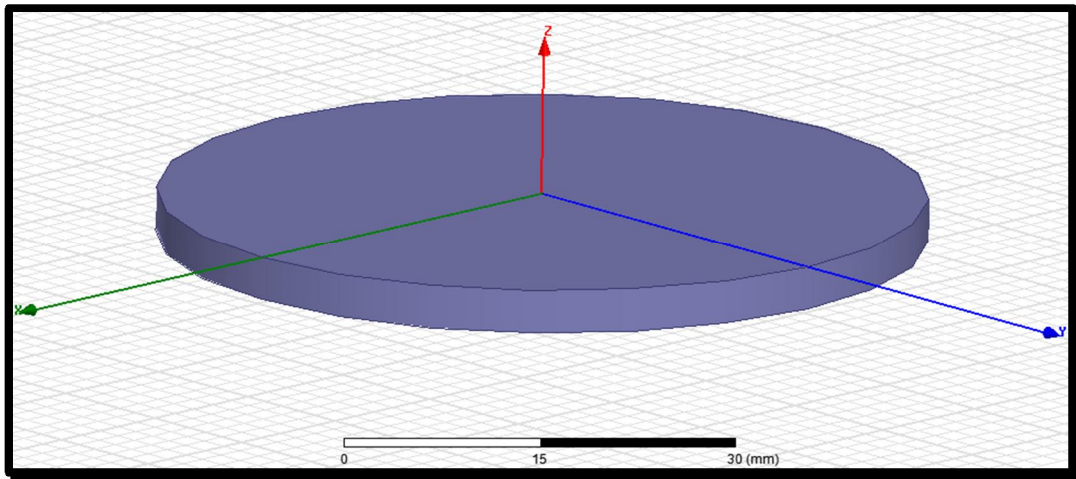


Figure 8: La cible Pièce (P5)

III.5 couvercle cible P6:

Figure (10) présente le couvercle cible (P6), il est en acier inoxydable, il sert comme support pour la cible.

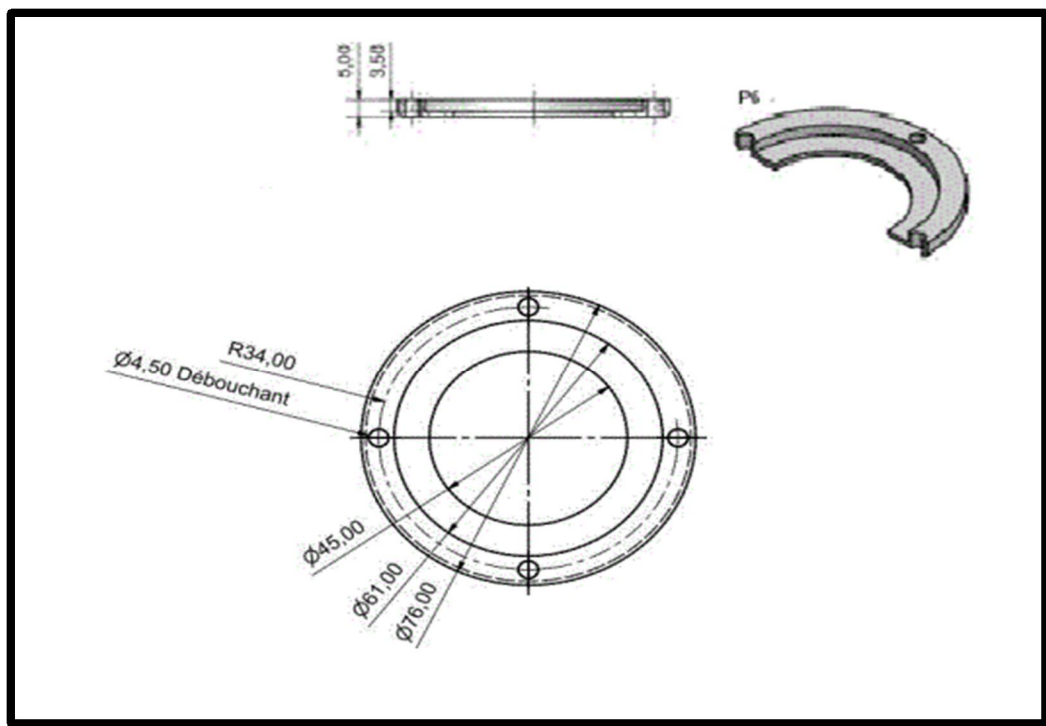


Figure 9: Dimension du couvercle cible

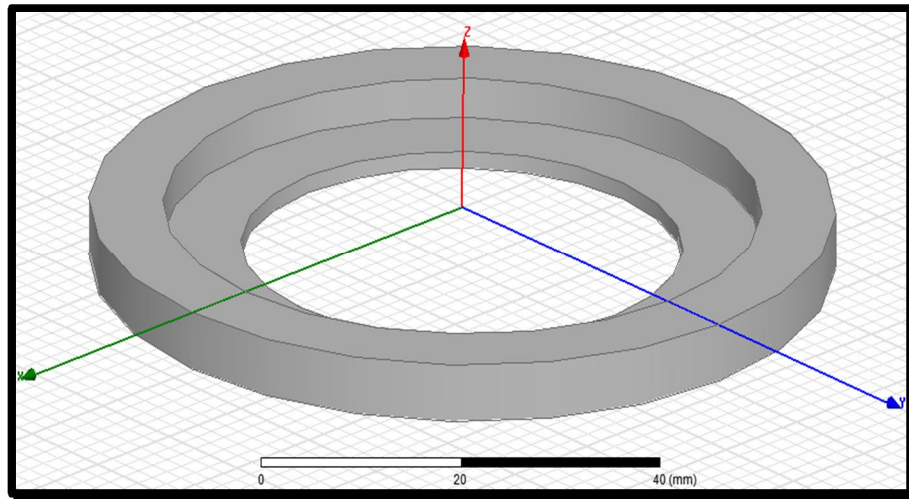


Figure 10: couvercle cible Pièce (P6)

III.6 Support port aimant P7:

Figure (12) conçue avec une matière isolante qui est le Téflon, un matériau plastique dont la résistance à la corrosion chimique et à la chaleur est remarquable.

La figure (11) montre une coupe et vue de bas qui exposent les différentes dimensions de cette géométrie.

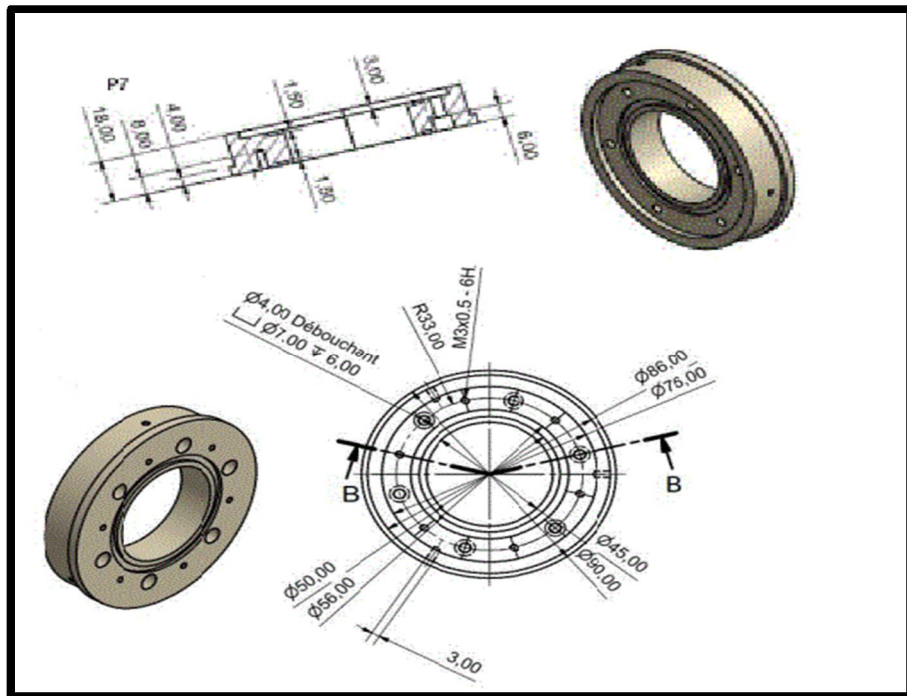


Figure 11: Dimension la pièce P7

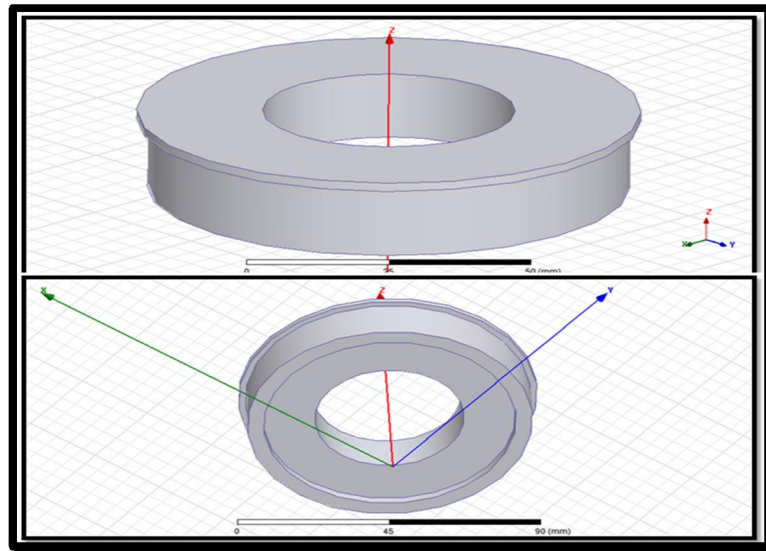


Figure 12: Support port aimants Pièce(P7)

III.7 Support cathode P8 :

Figure (14) qui assiste la cathode pour bien la fixé, il enveloppe les conduites du système de refroidissement et les câble d'alimentation.

La figure (13) présente le dimensionnement de la pièce (P8)

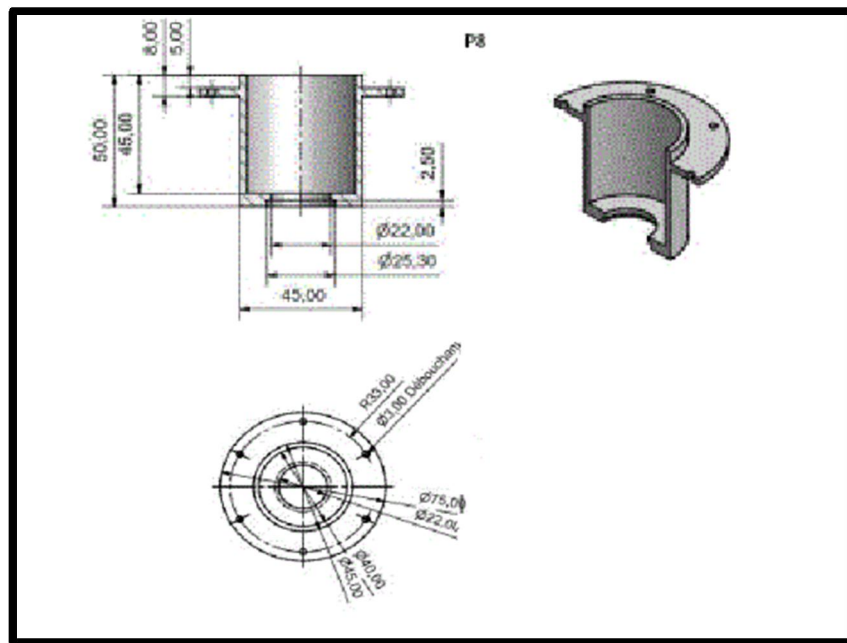


Figure 13: Dimension Pièce P8 Support cathode.

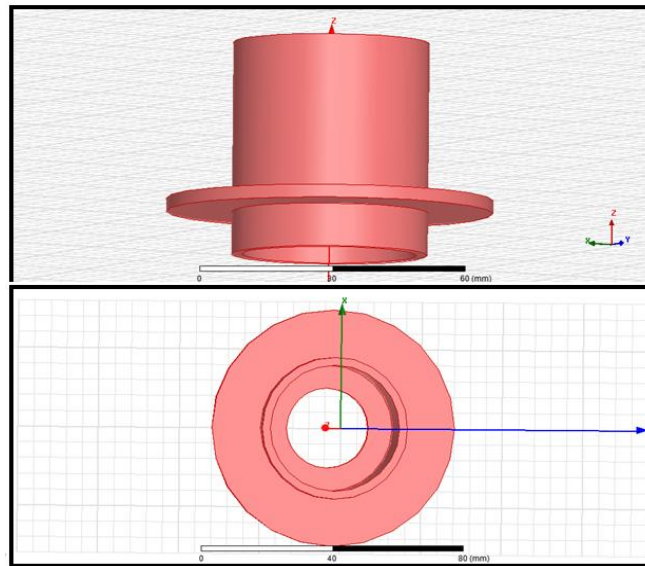


Figure 14: Support cathode Pièce P8.

III.8 Cache externe P9 :

Figure (16) c'est la pièce qui couvre toute les autres pièces de la cathode, elle est en acier inoxydable.

La figure (15) présente les différentes dimensions du cache externe

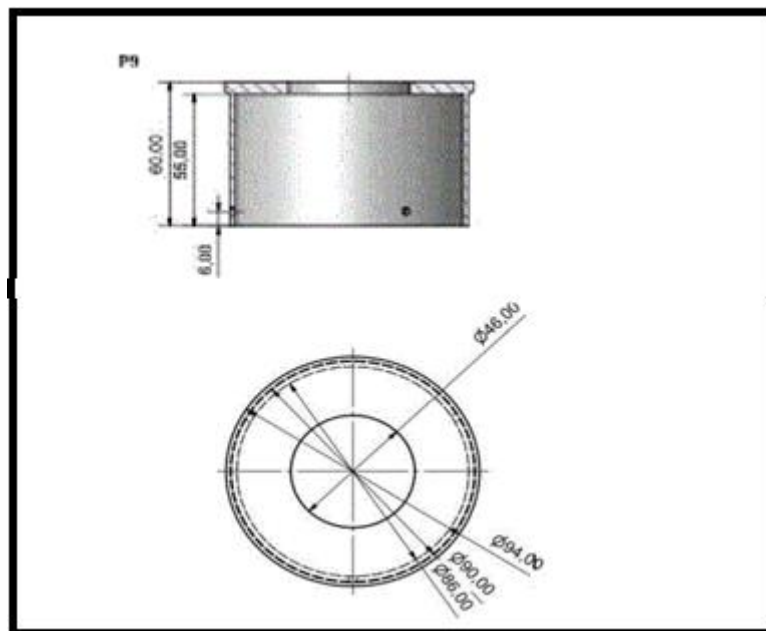


Figure 15: Dimension de la pièce P9

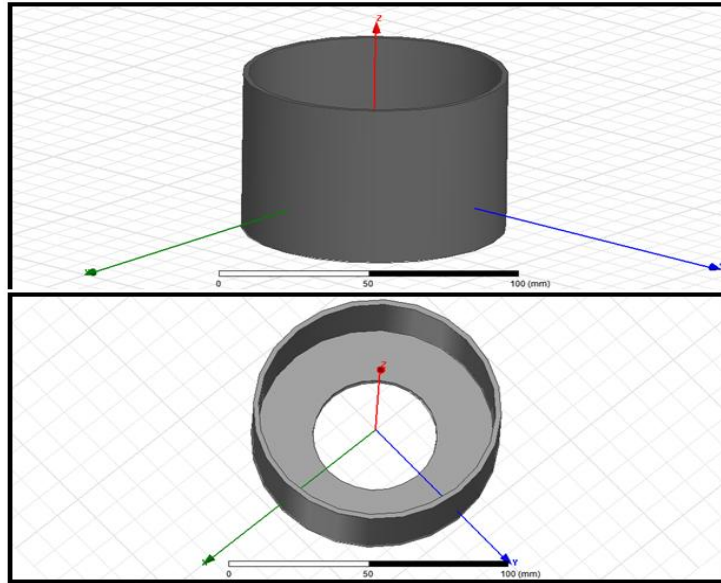


Figure 16: Cache externe La Pièce P 9

III.9 Port substrat (P11) :

Figure (17) appelée aussi l'anode elle est faite en acier inoxydable. Sans rôle est de porter le substrat, pour faire le dépôt de la couche mince.

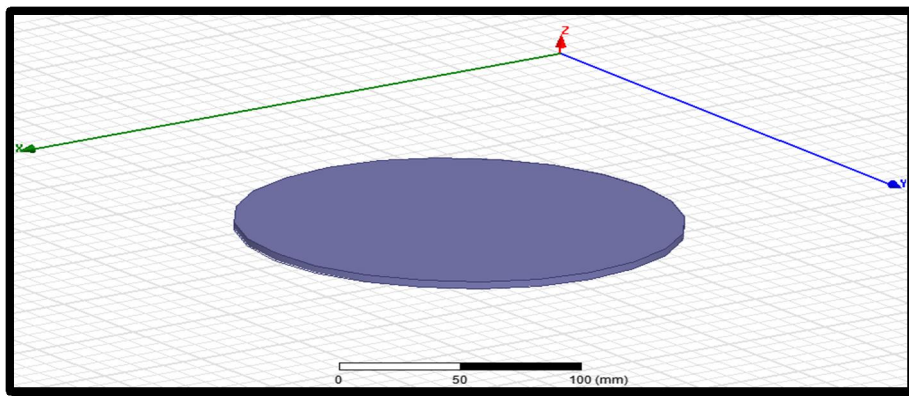


Figure 17: «Port substrat ou Anode »

III.10 Chambre de réaction P 10 :

Figure (18) présente l'Enceinte de réaction ou les deux cathodes et l'anode sont placés.

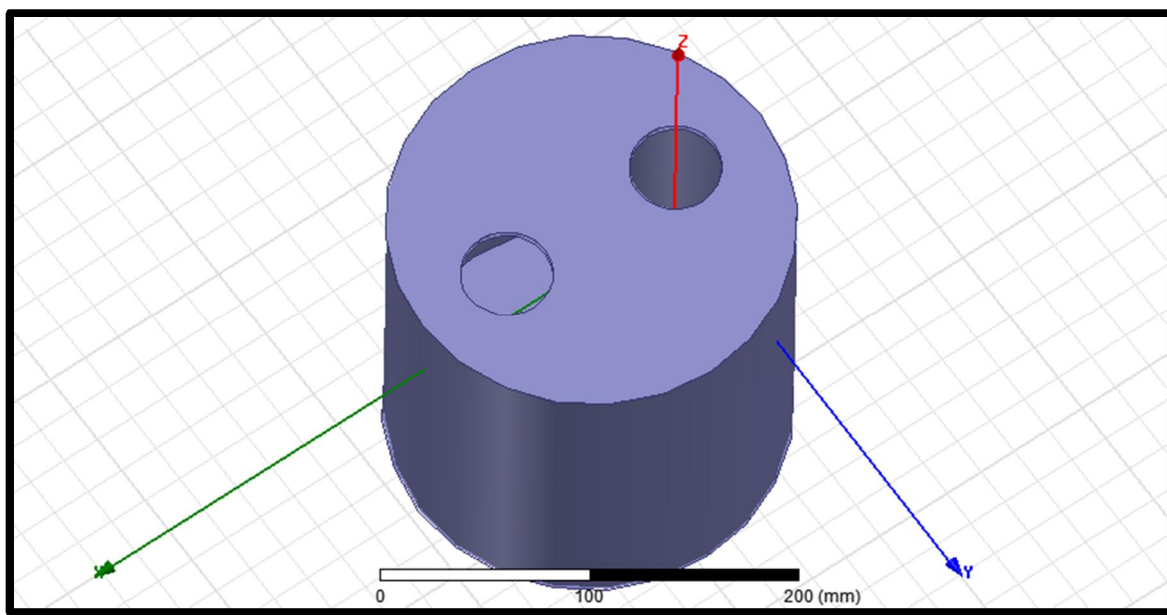


Figure 18: Chambre de réaction P 10

IV. Résultat et interprétation :

IV.1. Etude magnétostatique :

IV.1.1. Variation des paramètres géométriques :

Vue les travaux qui ont été réalisés, à titre d'exemple pour voir l'influence des paramètres géométriques du magnétron sur le comportement du champ magnétique, la qualité du film mince a déposé et son homogénéité qui est parmi les inconvénients majeure de la pulvérisation cathode magnétron.

Dans cette partie nous allons voir l'influence des paramètres géométriques (dans notre cas le rayon de l'aimant permanent P3 et P4) et les différents matériaux utilisés pour les aimants permanents et la cible sur le comportement du champ magnétique.

A) Variation du Rayon de l'aimant P3 :

A.1) la cible en nickel (P5) :

La cible utilisée est le nickel, nous avons varié le rayon (P3).ou on a représenté la distribution de l'induction magnétique suivant 3 arêtes (figure19).

CHAPITRE III : RESULTAT ET INTERPRETTION

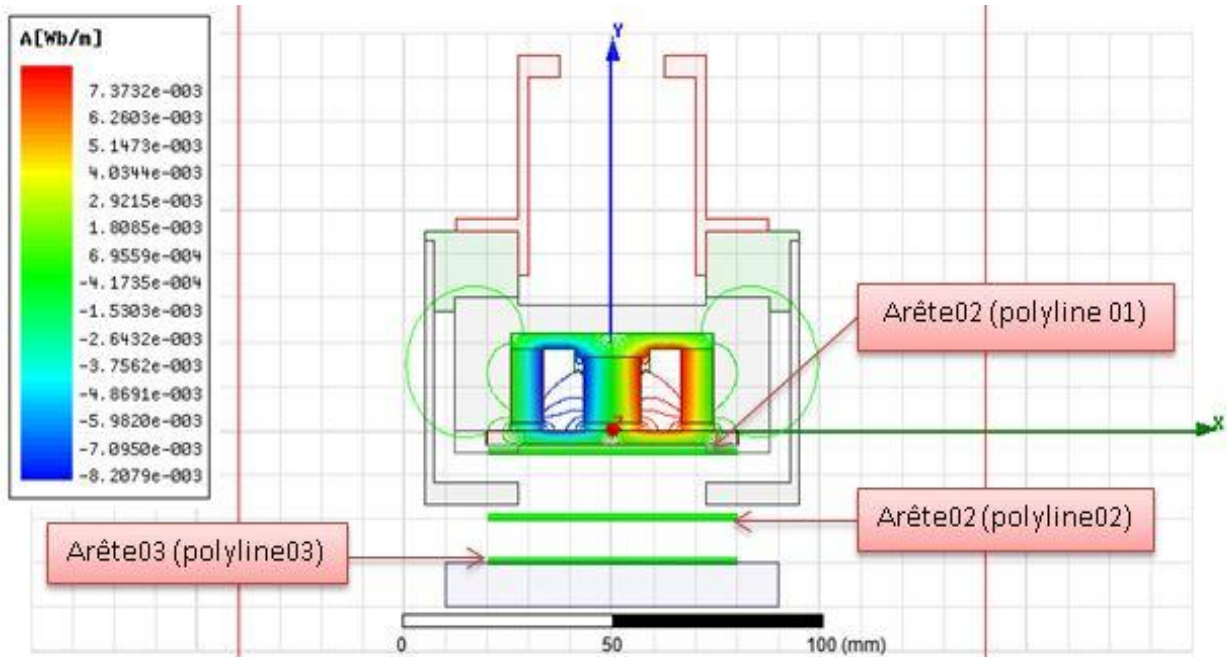


Figure 19: L'allure des valeurs du potentiel vecteur magnétique pour cible en Nickel

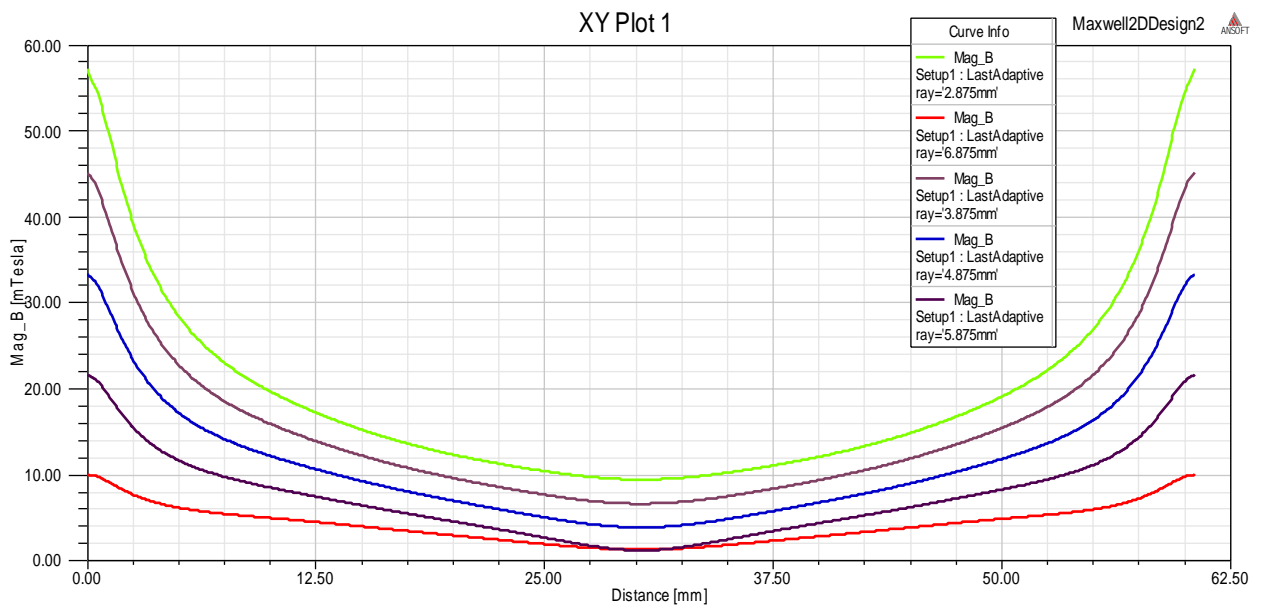


Figure 20: Distribution de l'induction Magnétique $B^{\vec{}}$ selon la distance de l'arête (01).

CHAPITRE III : RESULTAT ET INTERPRETTION

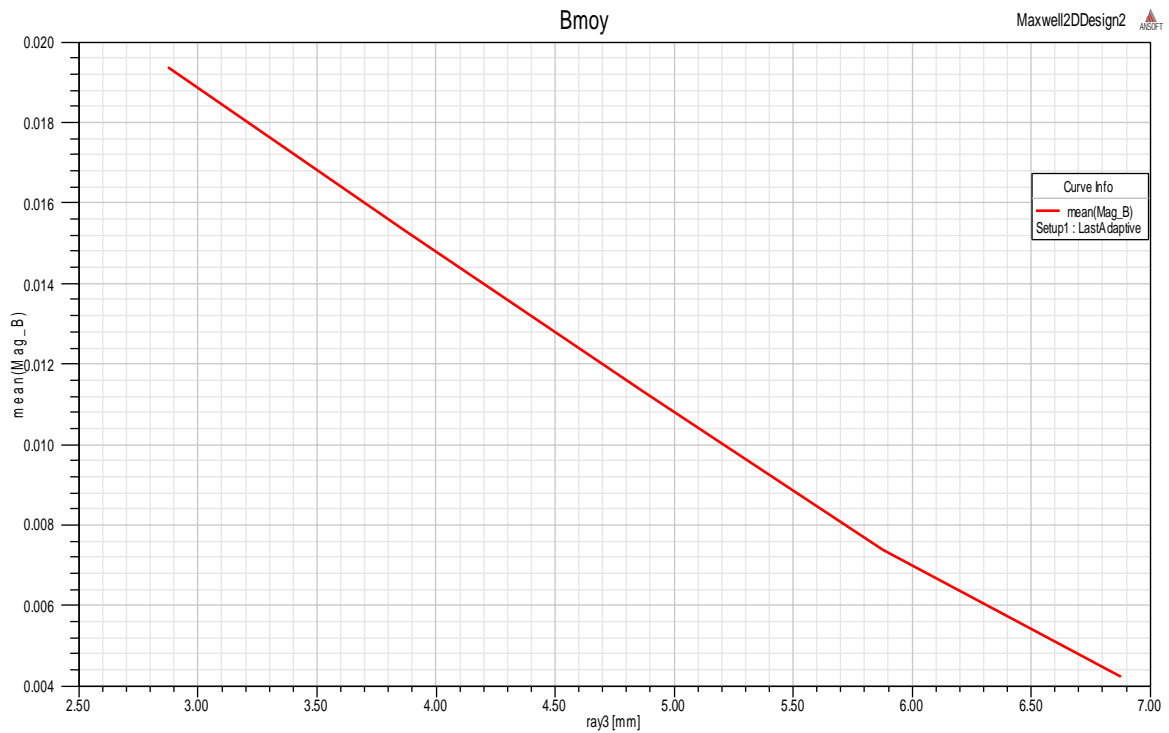


Figure 21: l'allure de la valeur moyenne de l'induction (B [tesla]) en fonction de rayon de l'aimant P3

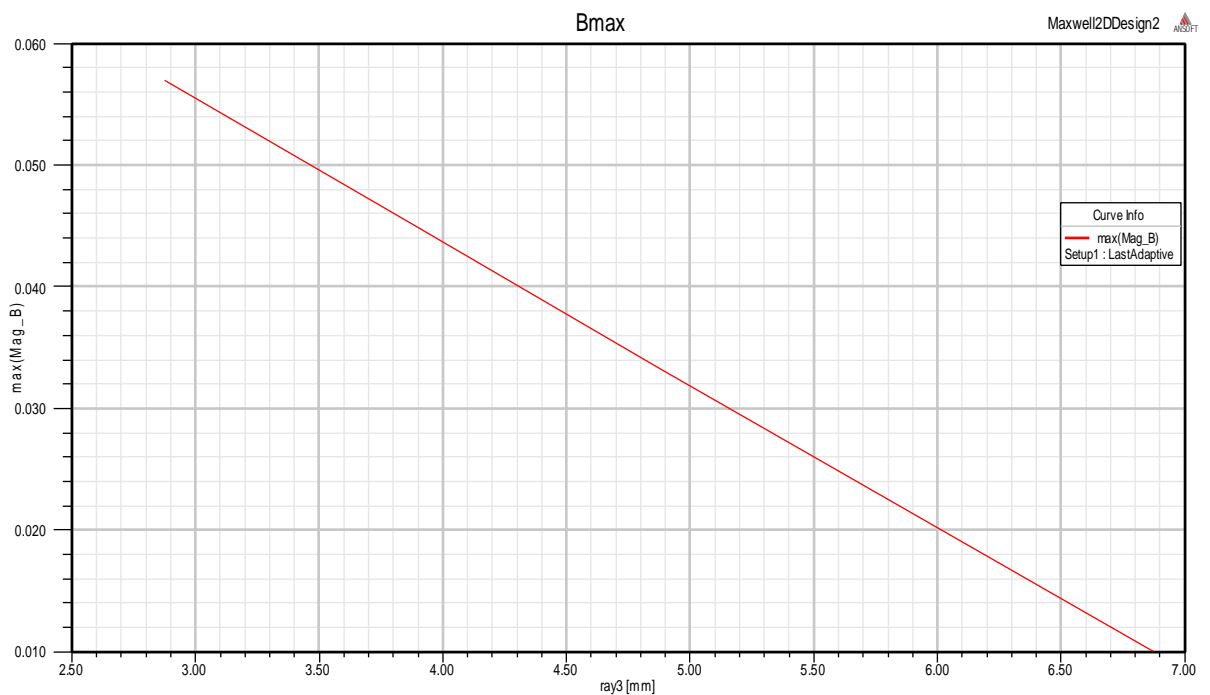


Figure 22: l'allure de la valeur maximale de l'induction en fonction de rayon de l'aimant P3

CHAPITRE III : RESULTAT ET INTERPRETTION

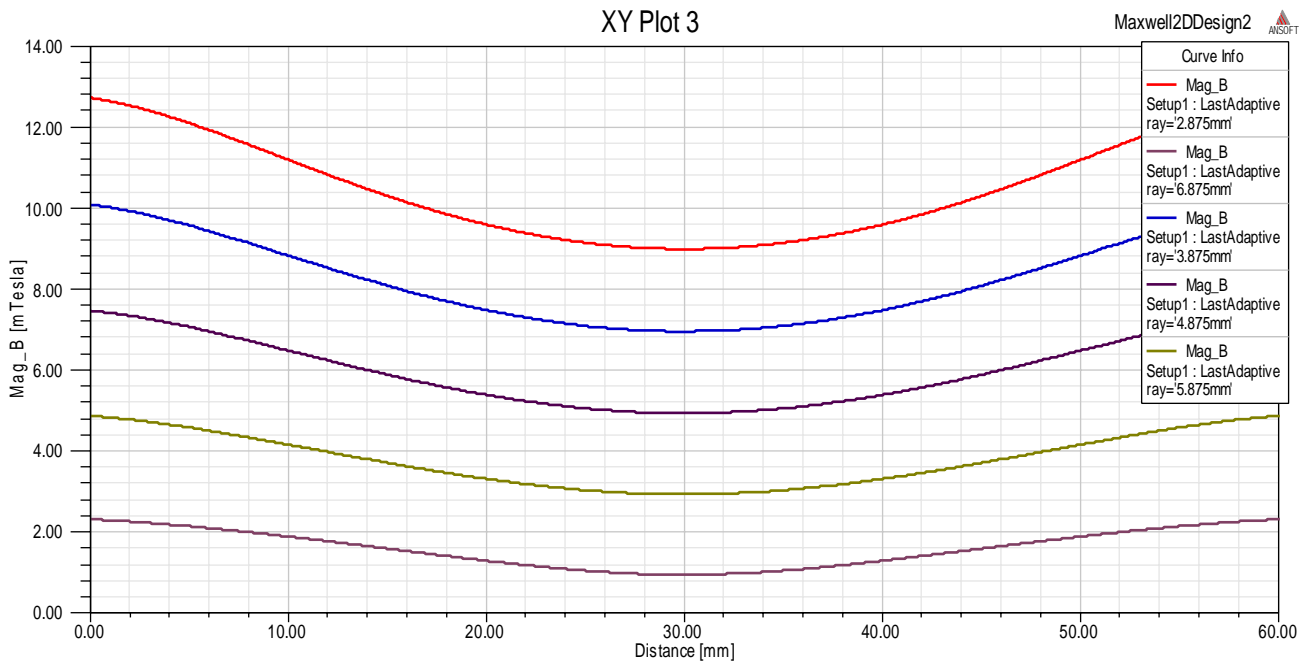


Figure 23: Distribution de l'induction Magnétique $B \vec{}$ selon l'arête (02).

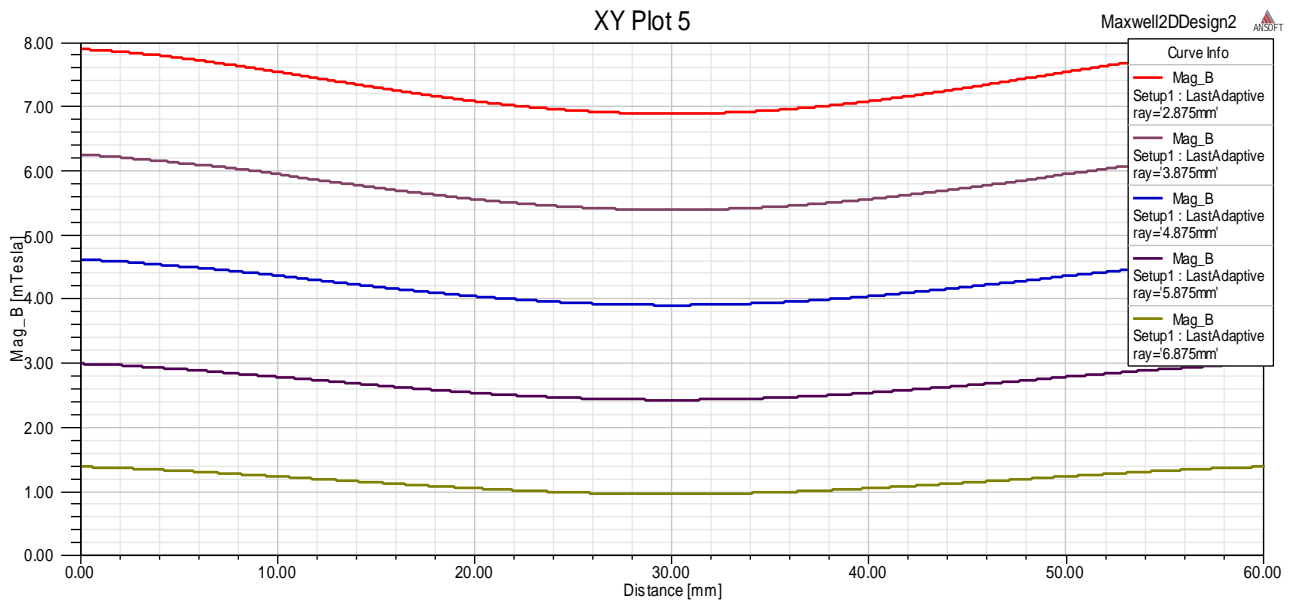


Figure 24: Distribution de l'induction Magnétique $B \vec{}$ suivant l'arête (03).

On remarque que le champ magnétique a des difficultés à traverser la cible P5, (figure (19)), et la valeur de champ est plus importante sur les extrémités de la cible qu'au milieu, figures (20, 23, 24), nous apercevons à chaque fois que le rayon de la pièce P3 s'accroît ; une diminution importante de l'induction magnétique (figure 21 et 22). Cela est dû aux propriétés physiques du matériau utilisé pour la cible

CHAPITRE III : RESULTAT ET INTERPRETTION

(nickel). ce qui va nuire à la réalisation du dépôt de couche mince et les valeurs de l'induction, en raison des conditions pour le maintien de la décharge pour un matériau ferromagnétique (notons bien qu'une induction magnétique d'une valeur minimum de 20 mTesla est essentielle pour maintenir la décharge plasma à une pression 0.1 Pa) [3] ce qui va influencer directement sur la vitesse de dérive des électrons, la vitesse de dépôt et qualité de film mince.

$$\vec{v}_d = \frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{B^2} \quad (\text{Chapitre I équation « I.5 »})$$

A.2) La cible (P5) en titane (Ti) :

Dans un deuxième cas nous allons changer le matériau utilisé pour la cible (pièce P5). On remplace le nickel par le titane Ti, puis nous allons reproduire les mêmes modifications sur le rayon de l'aimant permanent (P3).

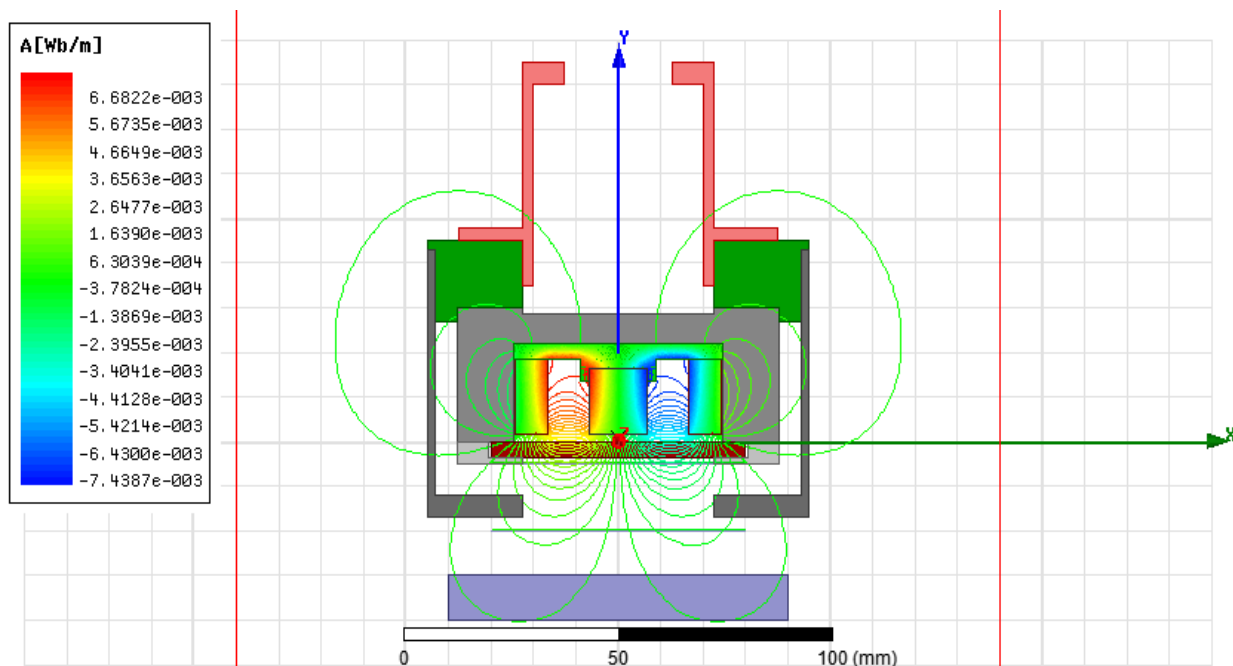


Figure 25: L'allure des lignes du champ magnétique selon la variation du rayon de l'aimant permanent (P3) pour une cible en (Ti)

CHAPITRE III : RESULTAT ET INTERPRETTION



Figure 26: Répartition de l'induction Magnétique B [tesla] en fonction de la distance de l'arête (01)

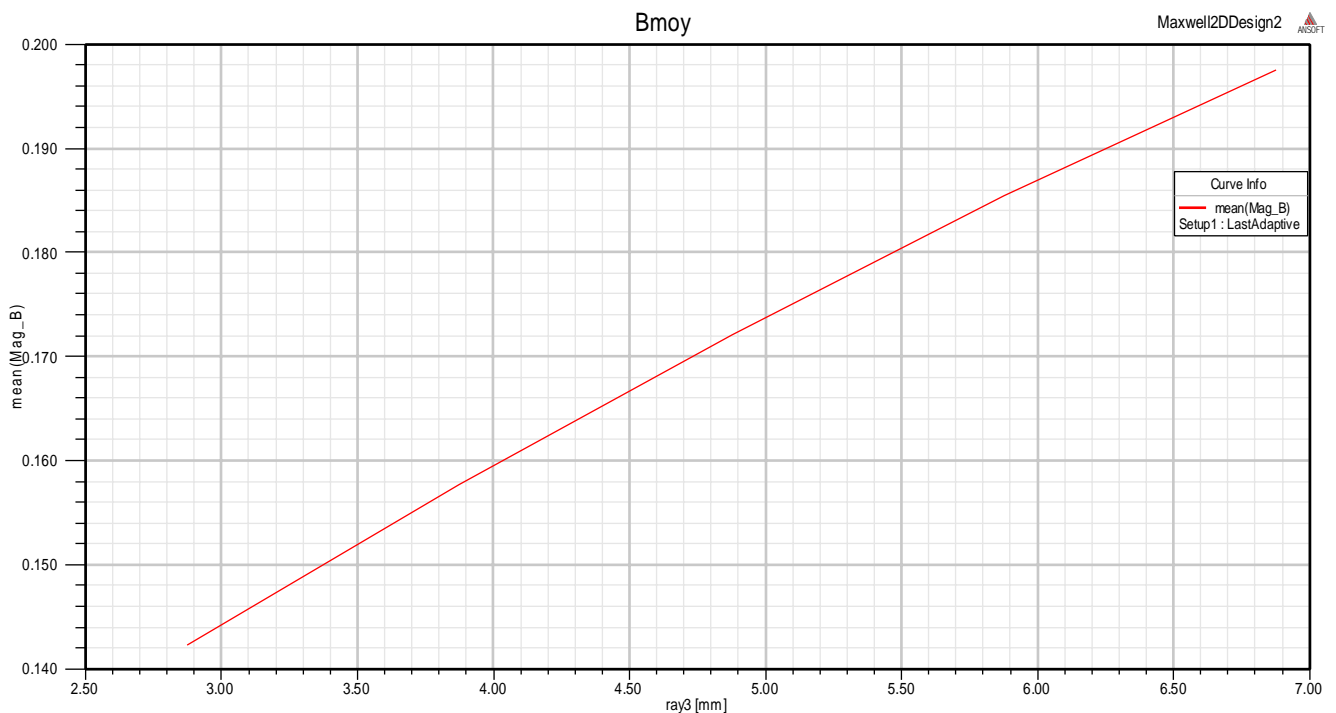


Figure 27: l'allure de la valeur moyenne de l'induction Magnétique B [tesla] en fonction de rayon de l'aimant P3.

CHAPITRE III : RESULTAT ET INTERPRETTION

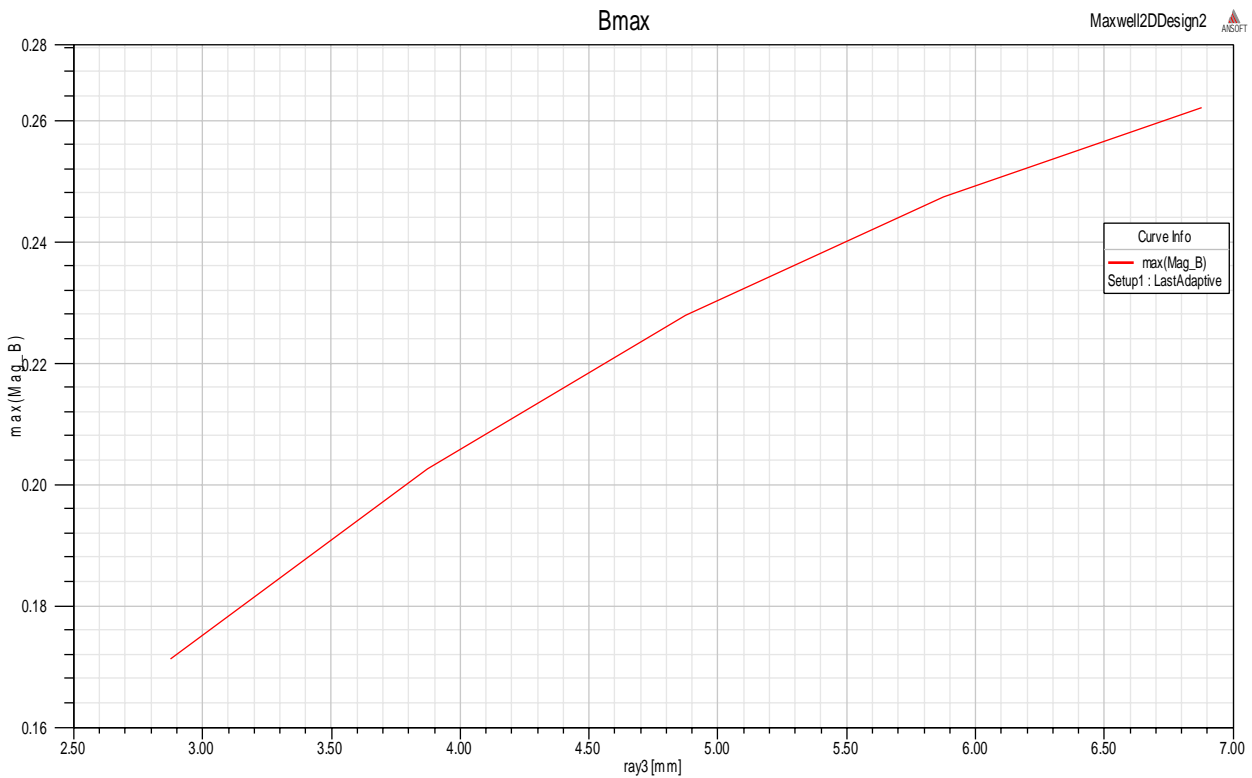


Figure 28: l'allure de la valeur maximale de l'induction Magnétique B^{\rightarrow} [tesla] en fonction de rayon de l'aimant P3.

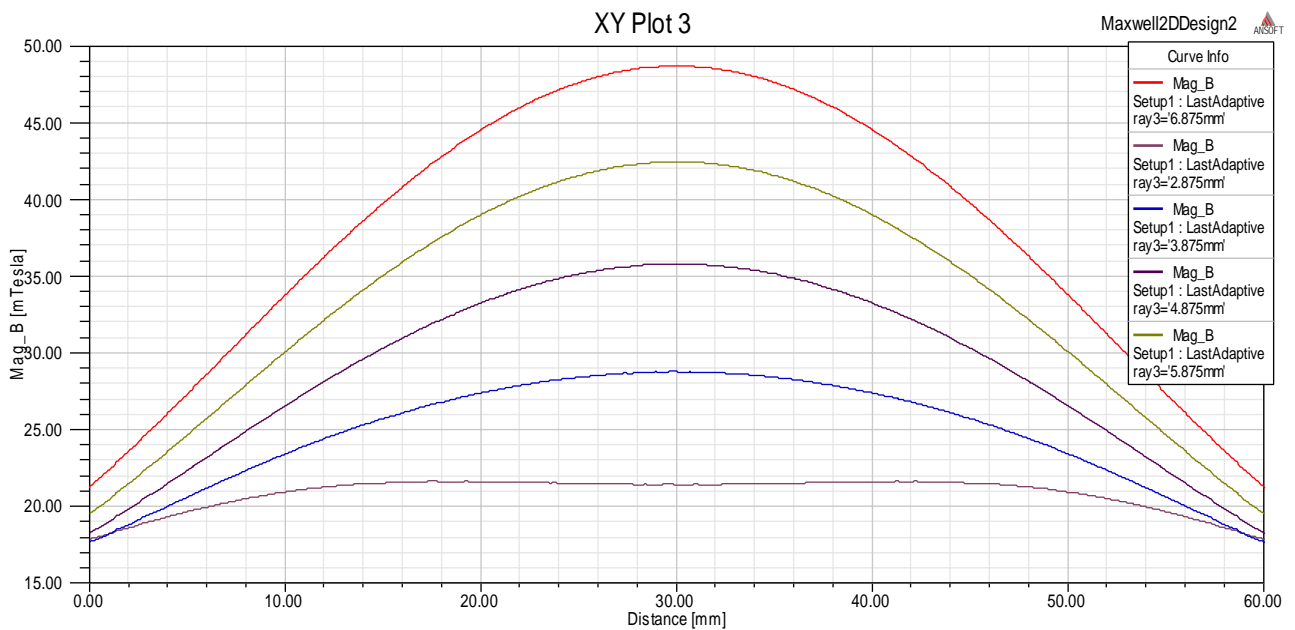


Figure 29: Distribution de l'induction Magnétique B en fonction de la distance de l'arête (02).

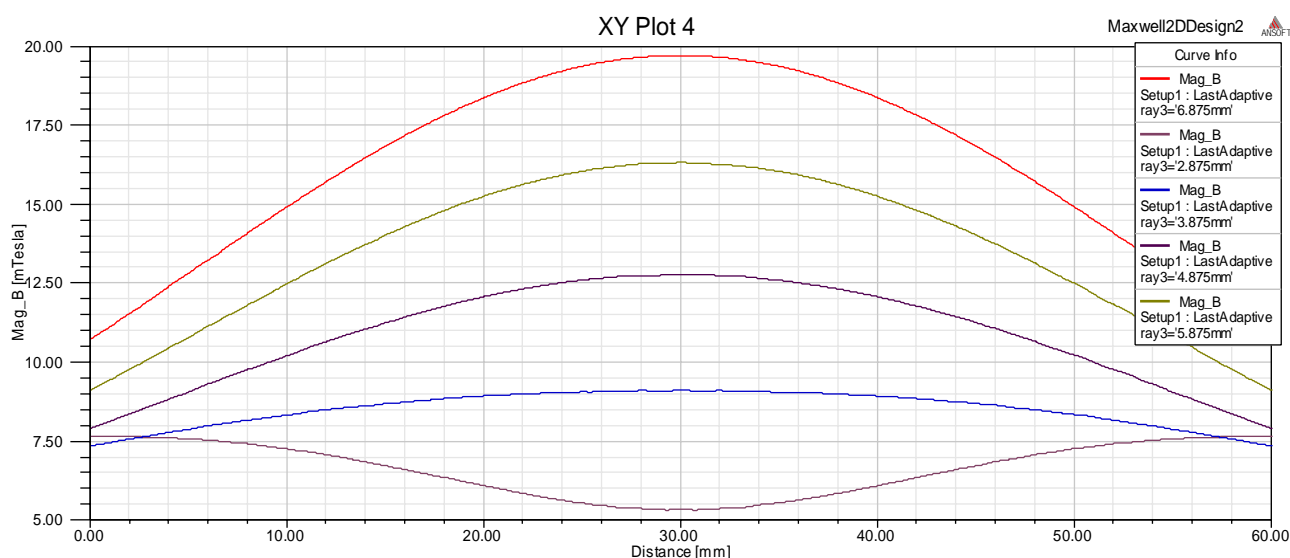


Figure 30: Distribution de l'induction Magnétique $B \rightarrow$ en fonction de la distance de l'arête (03).

Si on compare les résultats obtenus dans la structure précédente ((P5) en Nickel (Ni)) et celle (P5) en Titane qui est un matériau Amagnétique, la première chose a constaté, est le changement catégorique du comportement des lignes de champs magnétique qui traversent facilement la cible P5 (figure 25), une distribution de l'induction \vec{B} (figure 26, 29, 30) est très distincte que celle du cas précédent. Les valeurs de l'induction sont plus importantes pour chaque augmentation du rayon de l'aimant P3. On le remarque sur les deux figures (27), (28) (présente la courbe B_{moy} et B_{max} en fonction de rayon P3 pour arête 01), qui sont des courbes linéairement croissante, pour chaque variation du rayon P3 on obtient une valeur de champ plus importante, ce qui sera vraiment bénéfique pour la réalisation de dépôt de film mince, une vitesse de dérive importante, un très bon confinement des électrons ce qui implique un plasma danse et un rendement meilleur [12].

B) Variation du Rayon P4 [mm] :

B.1) La cible P5 en nickel :

Dans cette nouvelle variation, ou nous procédons au changement du rayon interne de l'aimant permanent P4, une cible en Nickel (Ni).

Pour chaque valeur du rayon nous avons visualisé l'allure de l'induction B pour chaque arête (figure (31), (35), (36)).

CHAPITRE III : RESULTAT ET INTERPRETTION

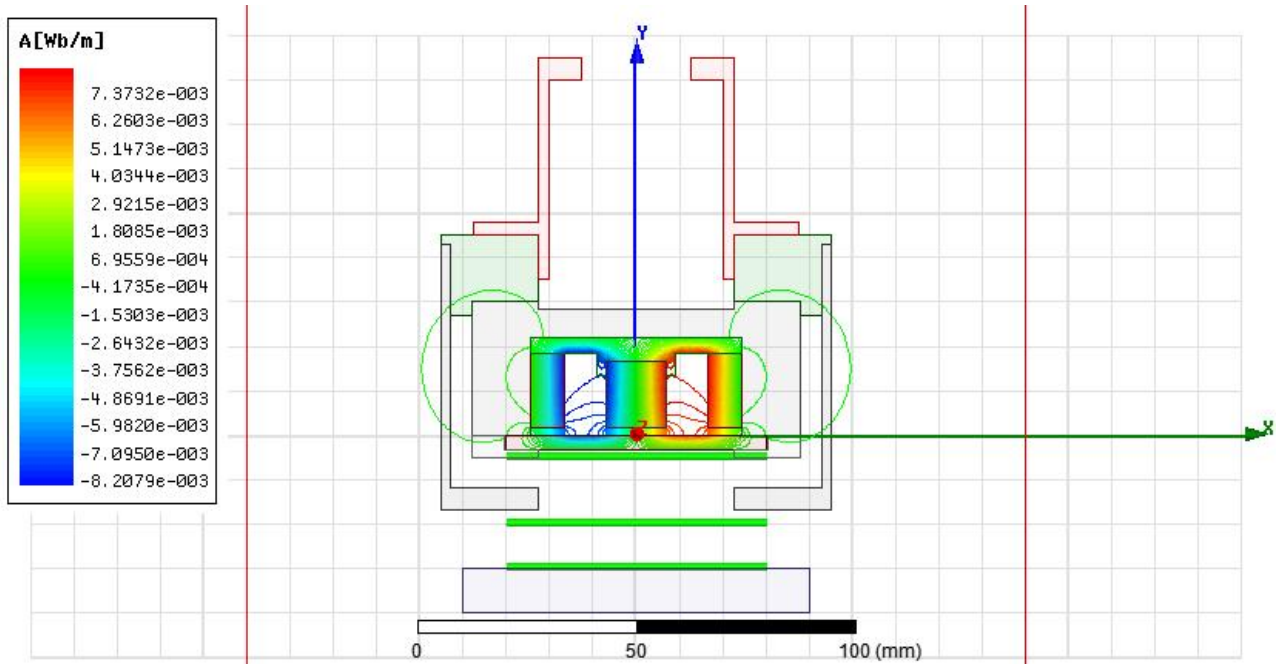


Figure 31: L'allure des lignes du champ magnétique pour variation du rayon de l'aimant permanent (P4) pour une cible en Nickel (Ni).

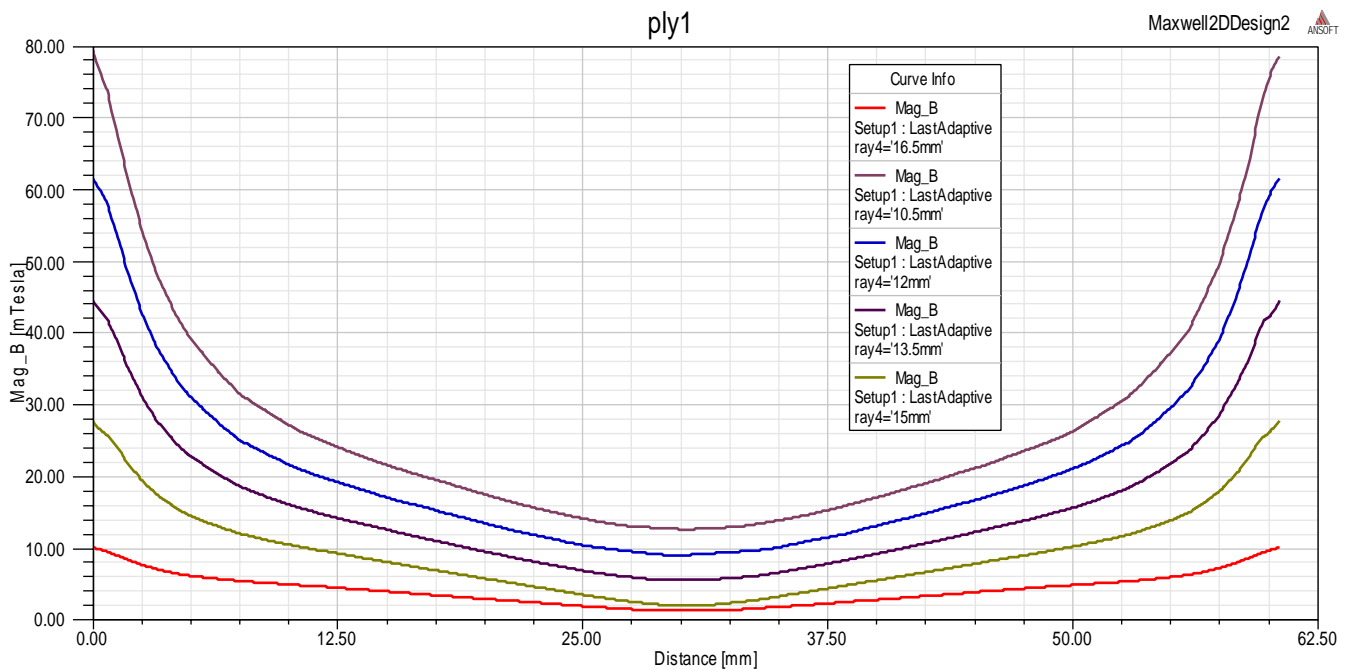


Figure 32: Distribution de l'induction le long de l'arête 01.

CHAPITRE III : RESULTAT ET INTERPRETTION

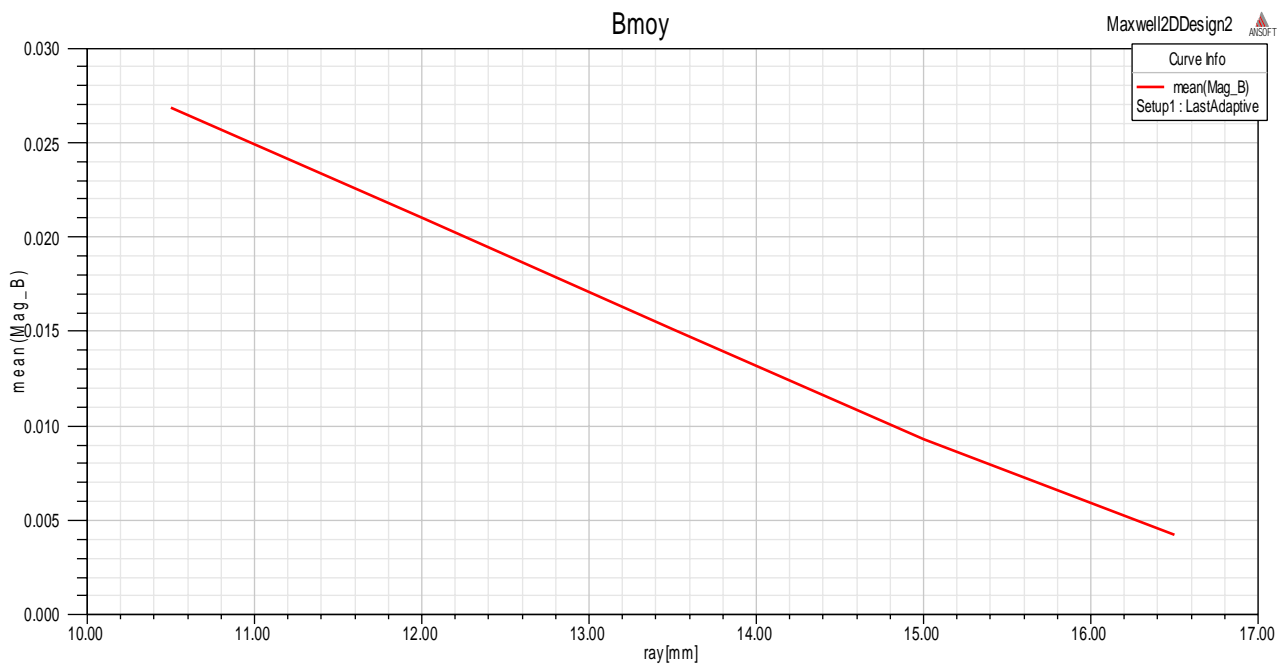


Figure 33: l'allure de la valeur moyenne de l'induction en fonction de rayon de l'aimant P4 pour une cible en Nickel (Ni)

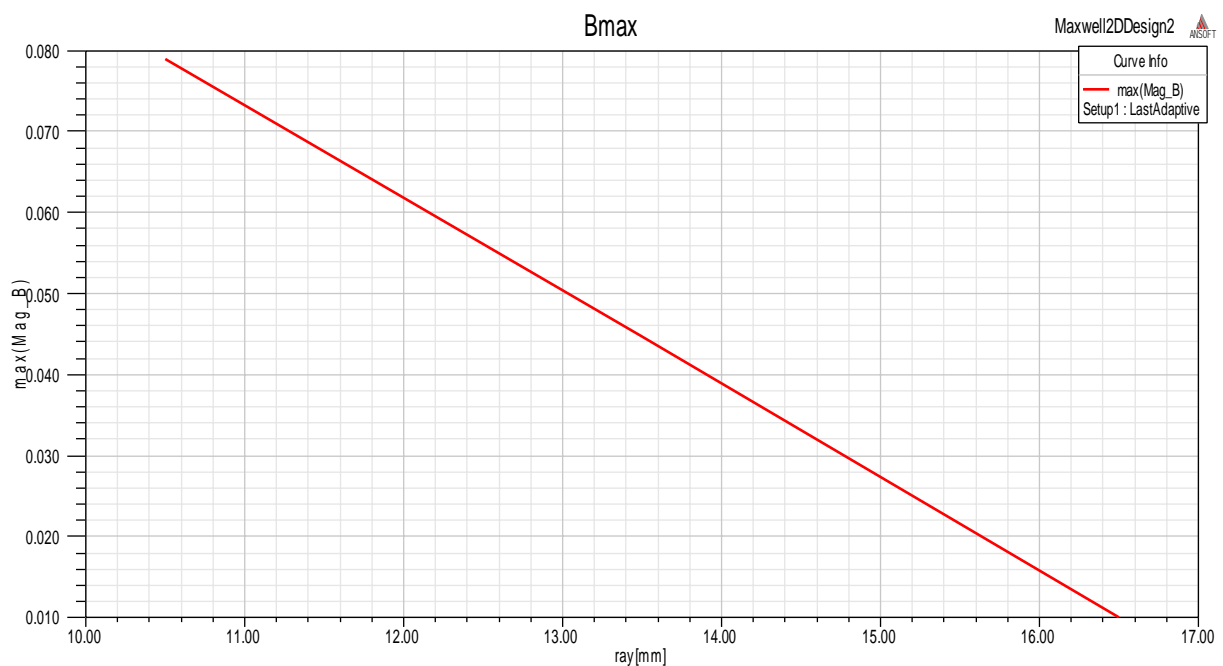


Figure 34: l'allure de la valeur maximale de l'induction en fonction du rayon de l'aimant P4

CHAPITRE III : RESULTAT ET INTERPRETTION

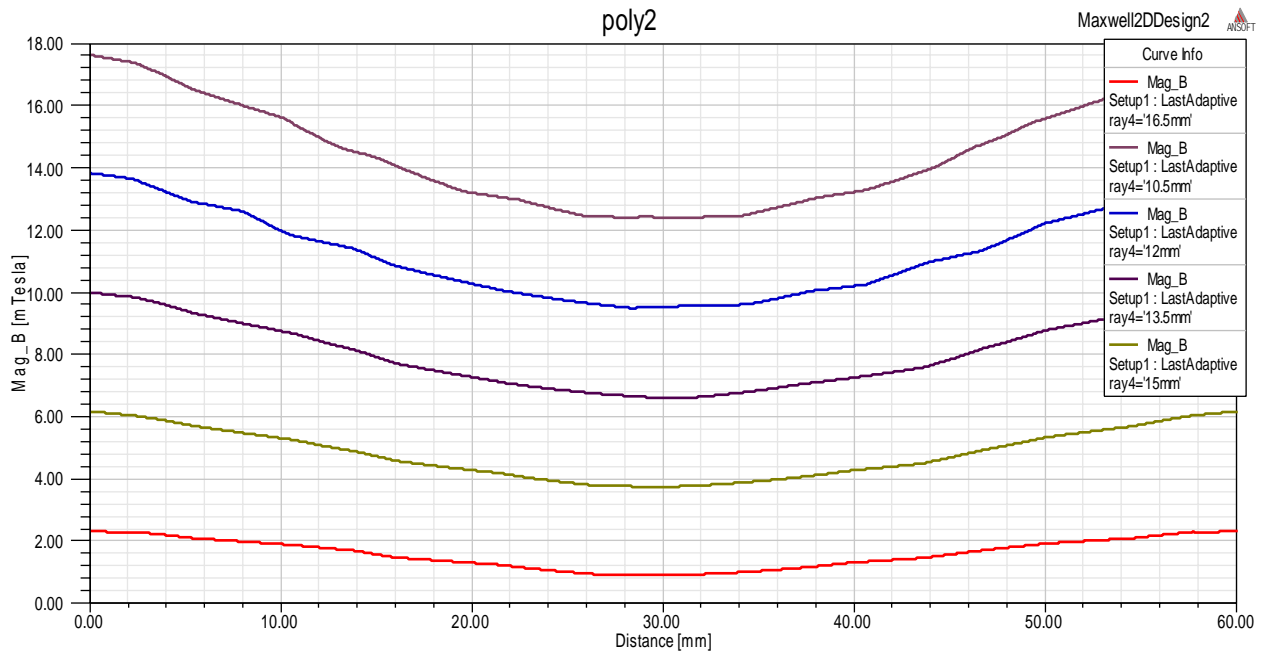


Figure 35: Distribution de l'induction Magnétique B [tesla] en fonction de la distance de l'arête (02).

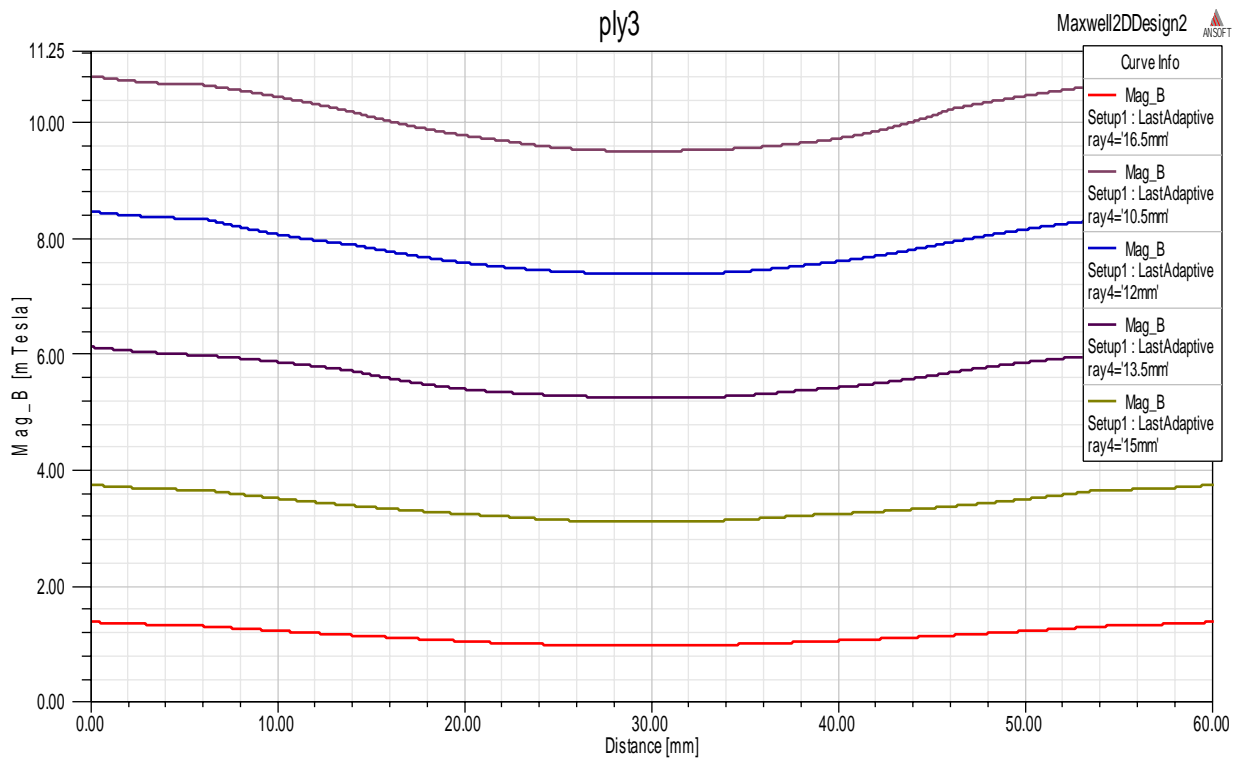


Figure 36: Distribution de l'induction Magnétique B [tesla] selon la distance de l'arête (03).

CHAPITRE III : RESULTAT ET INTERPRETTION

Ce qu'on remarque dans cette structure est le même phénomène qui se répète pour une cible en nickel, une augmentation des valeurs moyenne et maximales de l'induction (*figure (33), (34)*). Mais cette dernière est toujours insuffisante pour avoir la valeur de champ qui va nous permettre un amorçage et le maintien de la décharge pour avoir un confinement des électrons ou voisinage de la surface de la cible pour réaliser un film mince d'une cible ferromagnétique [3].

B.2) La cible P5 en titane :

Nous allons effectuer les mêmes variations pour le rayon interne de l'aimant permanent P4 pour une cible en titane

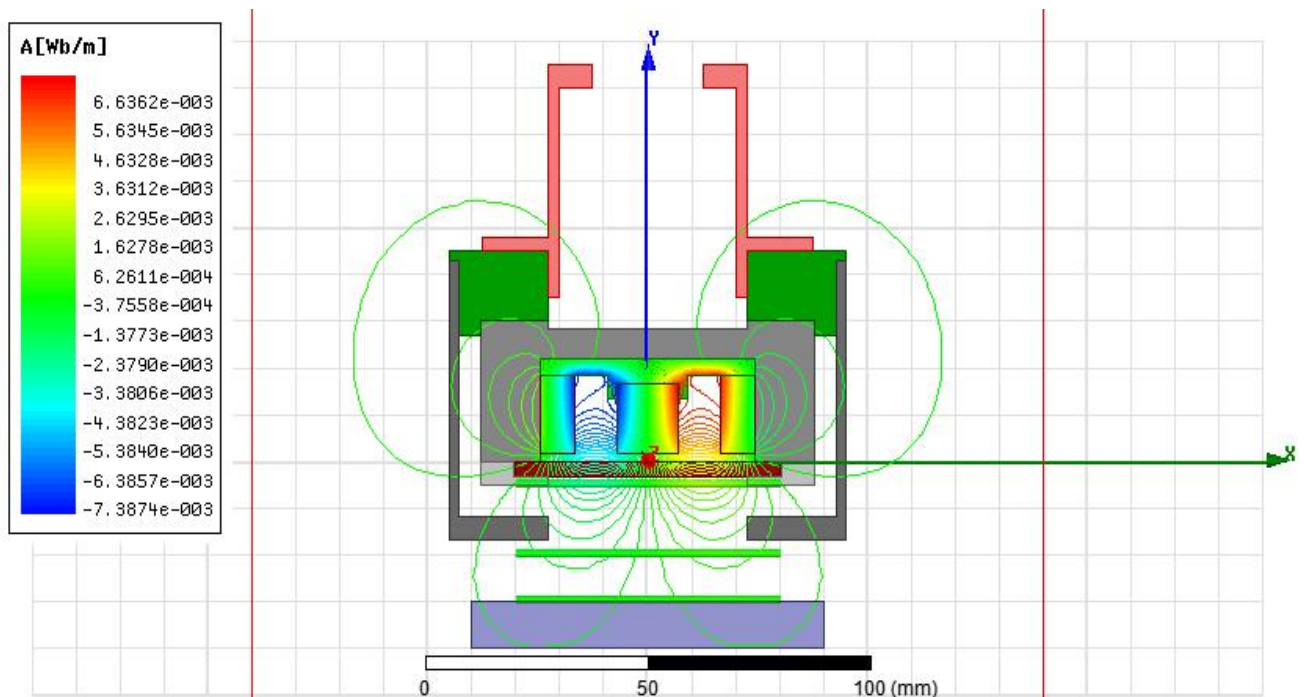


Figure 37: L'allure des lignes du champ magnétique pour variation du rayon de l'aimant permanent (P4) pour une cible en (Ti)

CHAPITRE III : RESULTAT ET INTERPRETTION

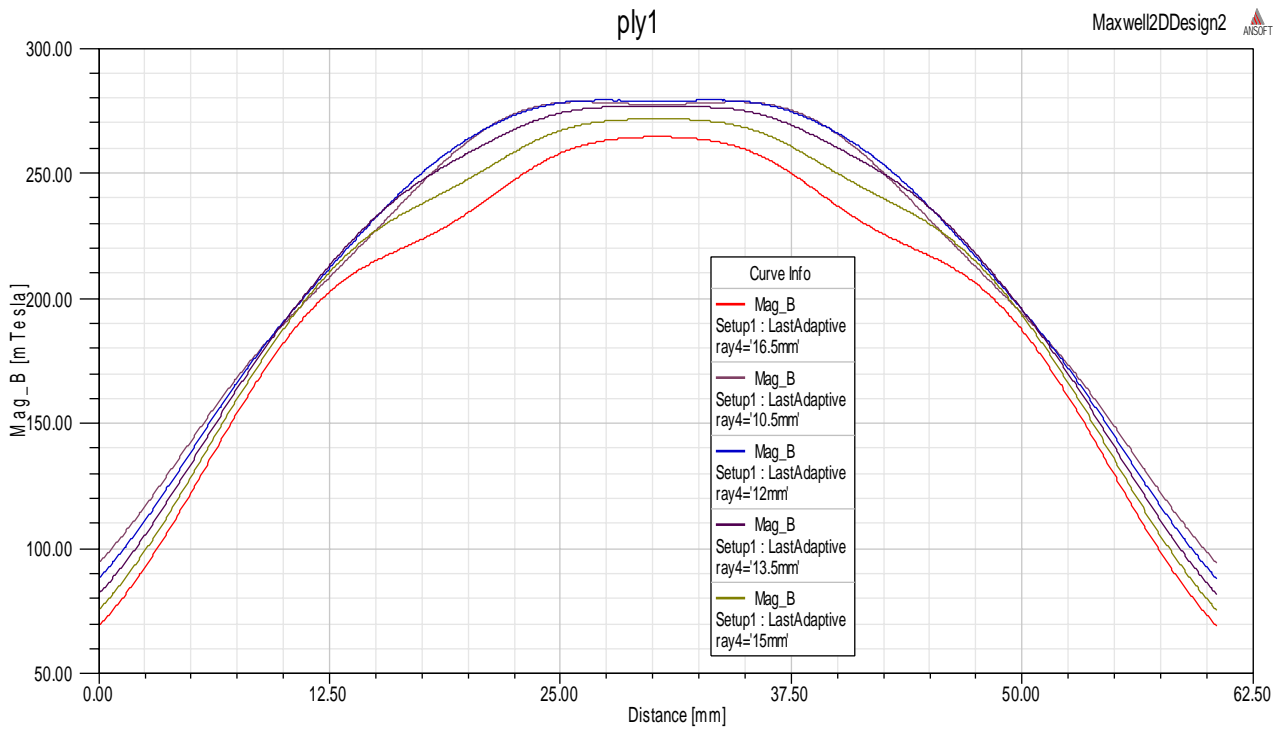


Figure 38: Distribution de l'induction Magnétique $B \vec{}$ en fonction du la distance de l'arête (01).

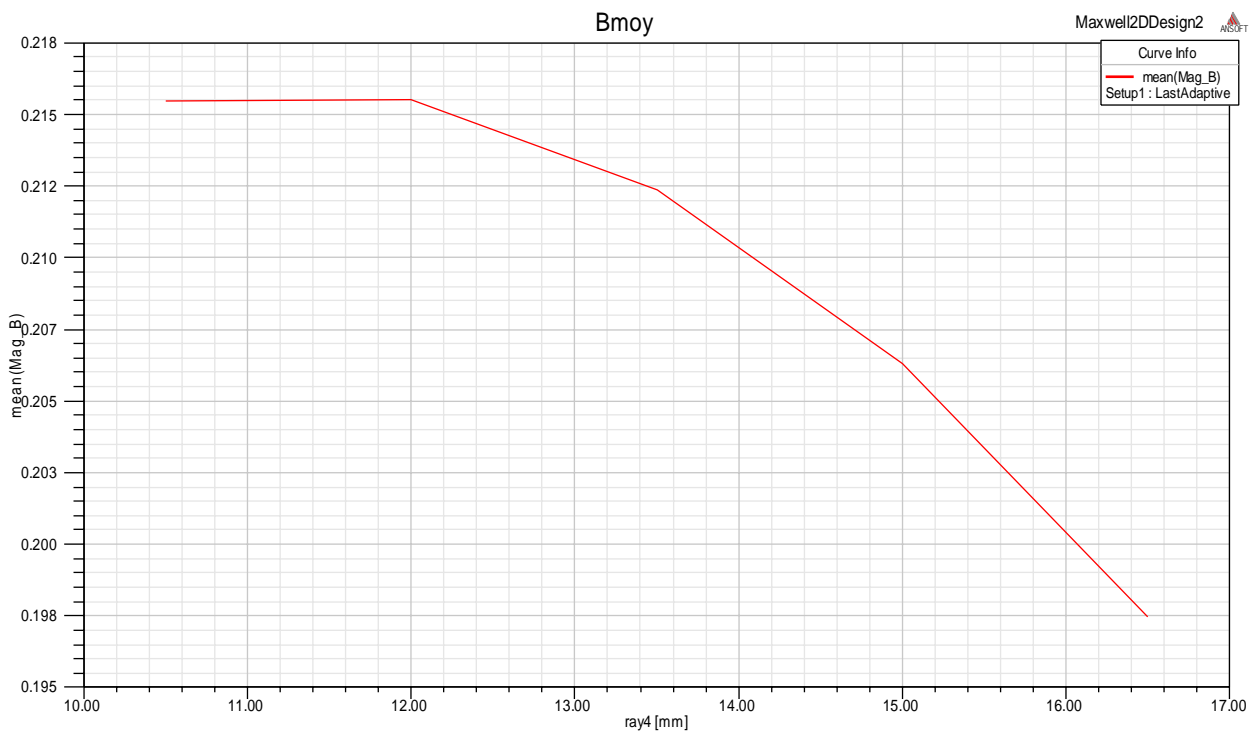


Figure 39 : l'allure de la valeur moyenne de l'induction en fonction de rayon interne de l'aimant P4 pour une cible en titane(Ti)

CHAPITRE III : RESULTAT ET INTERPRETTION

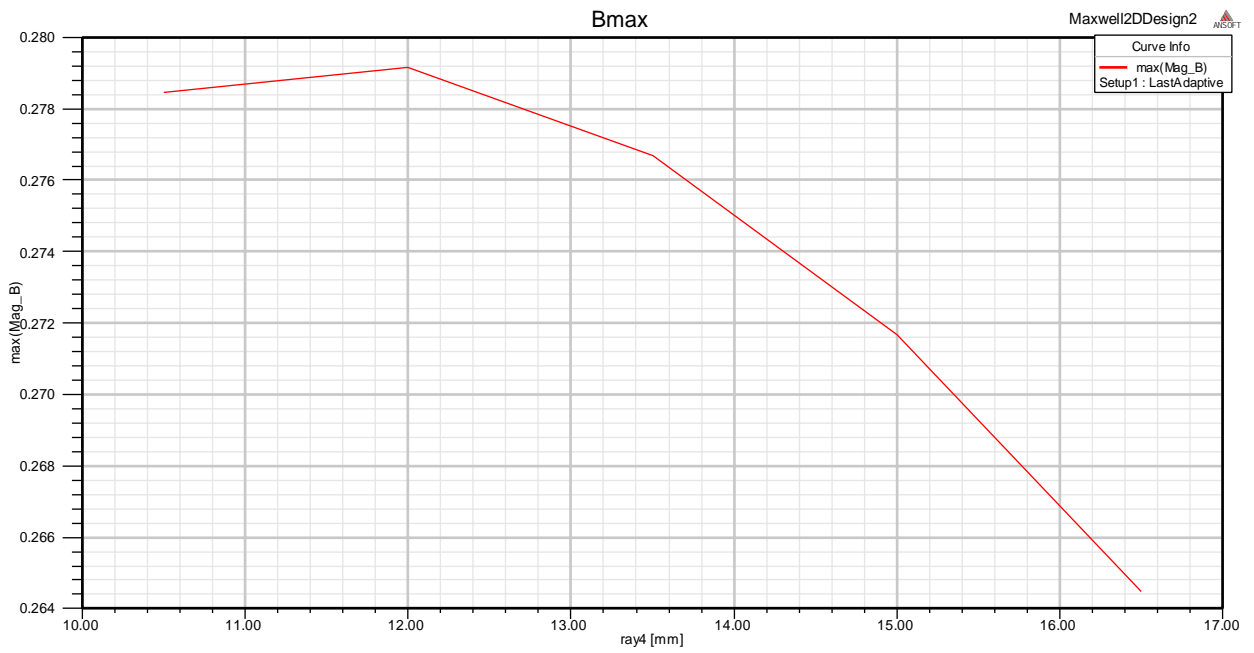


Figure 40 : L'allure des valeurs maximales de l'induction en fonction de rayon interne de l'aimant P4 pour une cible en titane (Ti)

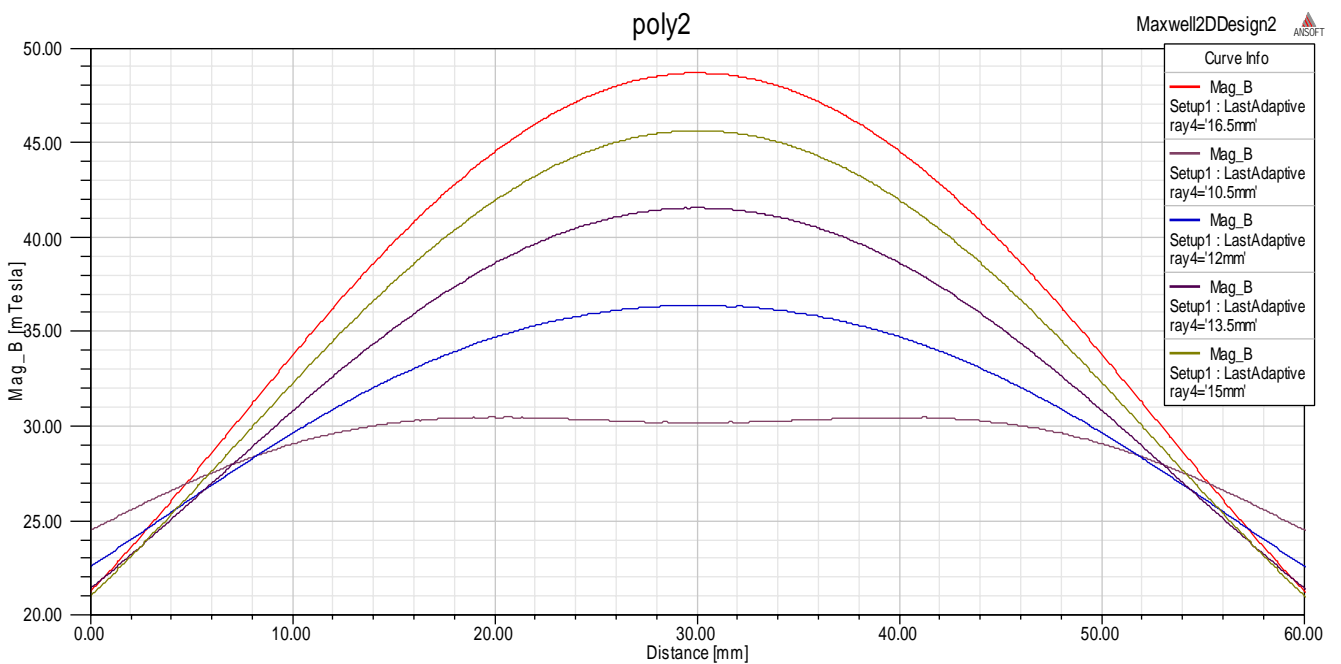


Figure 41: Distribution de l'induction Magnétique $B \vec{}$ selon la distance de l'arête (02).

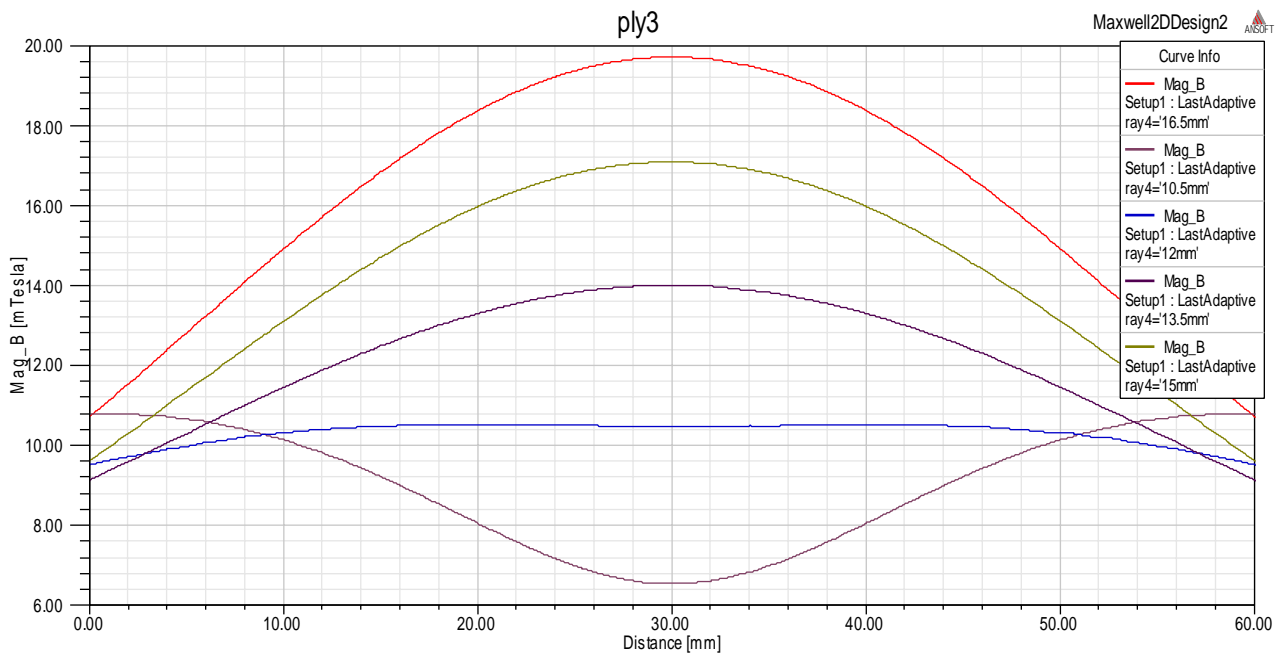


Figure 42: Distribution de l'induction Magnétique $B \vec{}$ en fonction de la distance de l'arête (03).

Dans chaque cas où nous avons varié les deux rayons des aimants permanent pour la cible en nickel (figure (31) et (19)), on a remarqué la difficulté que trouve le champ magnétique de passer à travers la cible. Et le remplacement de cette dernière par celle du titane, a laissé une certaine liberté sur le comportement des lignes du champ magnétique (figure (37), (38), (41), (42)).

Les valeurs de l'induction obtenues et vue leurs importances vont permettre d'avoir une facilité d'amorcer la décharge et la maintenir, avoir un confinement des électrons dans l'espace cathodique et un arrachement important de la matière a déposé sur le substrat.

C) Modification de la pièce (P2) limiteur de champ :

Les changements que nous avons apporté au limiteur du champ est l'ajout des parois, nous allons varier les rayons des aimants permanents (P4) et (P3), le matériau utiliser est le *samarium cobalt (SmCo)*, et le *limiteur du champ (P2)* est en fer, et la cible P5 en titane.

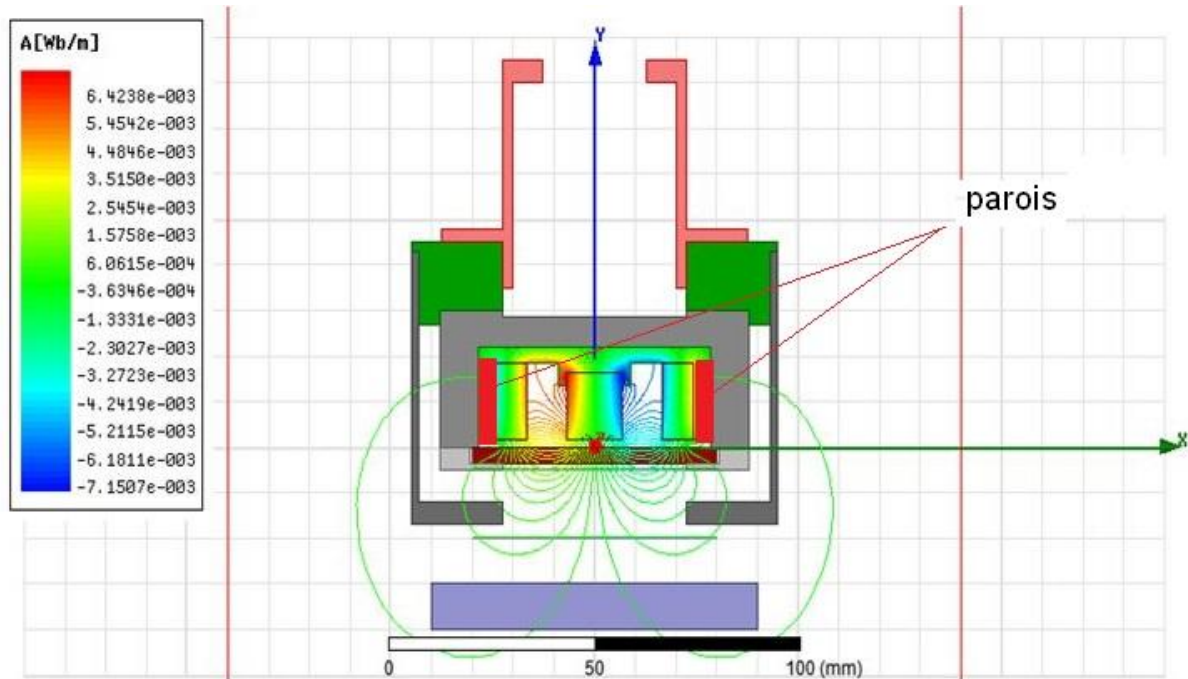


Figure 43 : Comportement des lignes de champ après modification de limiteur de champ P2

L'ajout des parois sur la hauteur de l'aimant permanent P4 a permis d'acheminer, diriger et concentrer les lignes de champs ou voisinage de la cible, ce qui va permettre d'avoir un bon confinement des électrons, avoir une très bonne érosion de la cible, implique un plasma plus dense, ce qui engendre un bon rendement. On peut dire que ces parois prennent le rôle de concentrateur du champ magnétique [4] [3].

CHAPITRE III : RESULTAT ET INTERPRETTION

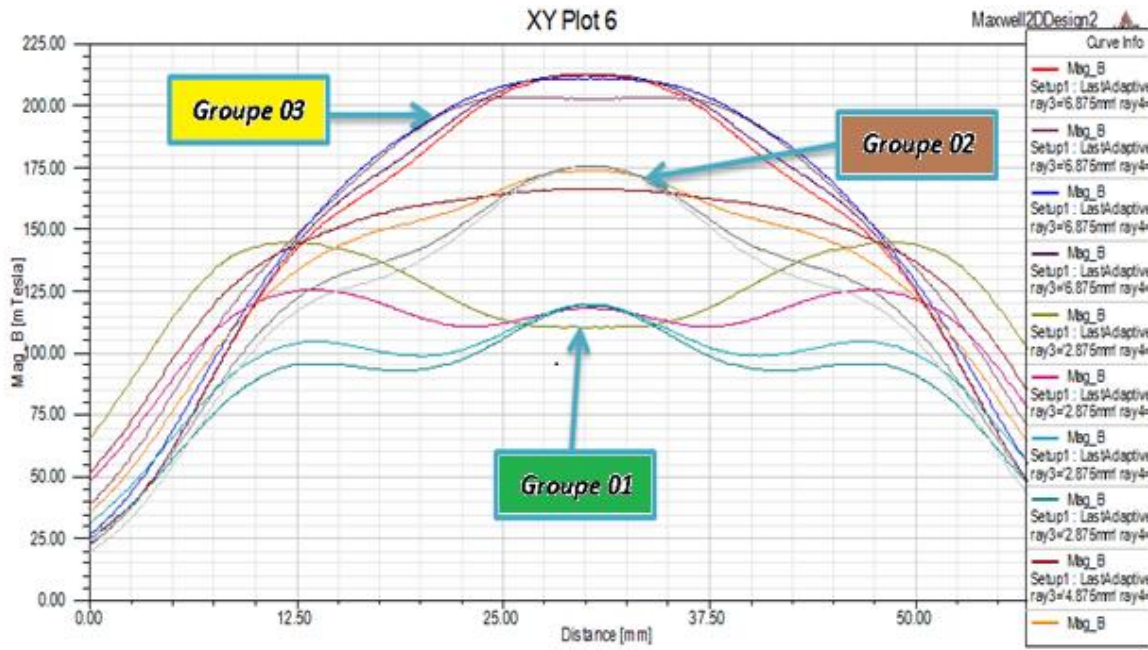


Figure 44: Distribution de l'induction en fonction de l'arête 01 pour la variation des rayons des aimants P3 et P4.

ray4 [mm]	max(Mag_B) Setup1 : LastAdaptive ray3=6.875mm'	max(Mag_B) Setup1 : LastAdaptive ray3=2.875mm'	max(Mag_B) Setup1 : LastAdaptive ray3=4.875mm'	mean(Mag_B) Setup1 : LastAdaptive ray3=6.875mm'	mean(Mag_B) Setup1 : LastAdaptive ray3=2.875mm'	mean(Mag_B) Setup1 : LastAdaptive ray3=4.875mm'
1	0.203703	0.145096	0.166510	0.149617	0.122160	0.136612
2	0.210850	0.125505	0.174190	0.146844	0.107941	0.127977
3	0.212525	0.119908	0.175876	0.142651	0.092343	0.117766
4	0.212226	0.119493	0.175357	0.141003	0.086114	0.113779

Groupe 03
Groupe 01
Groupe 02

Tableau 2: Les valeurs maximales B_{max} [tesla] (contour Blue) moyennes B_{moy} [tesla] (contour Rouge) de l'induction en fonction des variations des rayons P3 et P4

CHAPITRE III : RESULTAT ET INTERPRETTION

La première chose a distingué dans la Figure 44 sont les différentes distributions de l'induction \vec{B} en fonction du rayon de la pièce P3 et P4. Ces trois zones sont signalées sur la figure.

✓ **Groupe (01) (vert) (tableau 2) (figure 44) :**

Ce groupe 01 est constitué des répartitions de l'induction a une valeur fixe du rayon de l'aimant permanent P3 ($R=2.875mm$), pour chaque valeur donné au rayon de l'aimant permanent P4. Dans ce cas-là les valeurs moyennes tournent autour de $[0.8T-0.12T]$ (tableau 02), les valeurs maximales $[0.11T - 0.14T]$.

Vue ces valeurs de l'induction il aura un mauvais confinement des électrons, un plasma moins dense dans l'espaces cathodique accompagné d'un faible arrachement du matériau a déposé et un rendement médiocre [3] [4] [12].

✓ **Groupe (02)(Marron) (tableau 2) ,(figure 44) :**

Ce groupe représente la distribution de l'induction sur la valeur du rayon de l'aimant P3 ($R=4.875mm$). La valeur moyenne de ce groupe change dans plage de variation de $[0.11T- 0.13T]$, la valeur max dans $[0.16T-0.17T]$.

Dans ce cas nous aurons un confinement des électrons mieux que le *groupe 01*, un plasma mieux concentré ou voisinage de la cible.

✓ **Groupe (03)(jaune) (tableau 4), (figure 44) :**

Ce groupe présente la distribution de l'induction pour le rayon ($R=6.875mm$) de l'aimant P3, les valeurs moyennes d'induction varient de $[0.14T ,0.15T]$ et les maximales de $[0.20T, 0.21T]$.

Dans ce groupe nous avons des valeurs importantes de l'induction ce que va nous donner un très bon confinement des électrons, un plasma plus dense ou voisinage de la cible , une vitesse de dépôt plus importante et un bon rendement par rapport au deux cas précédents.

CHAPITRE III : RESULTAT ET INTERPRETTION

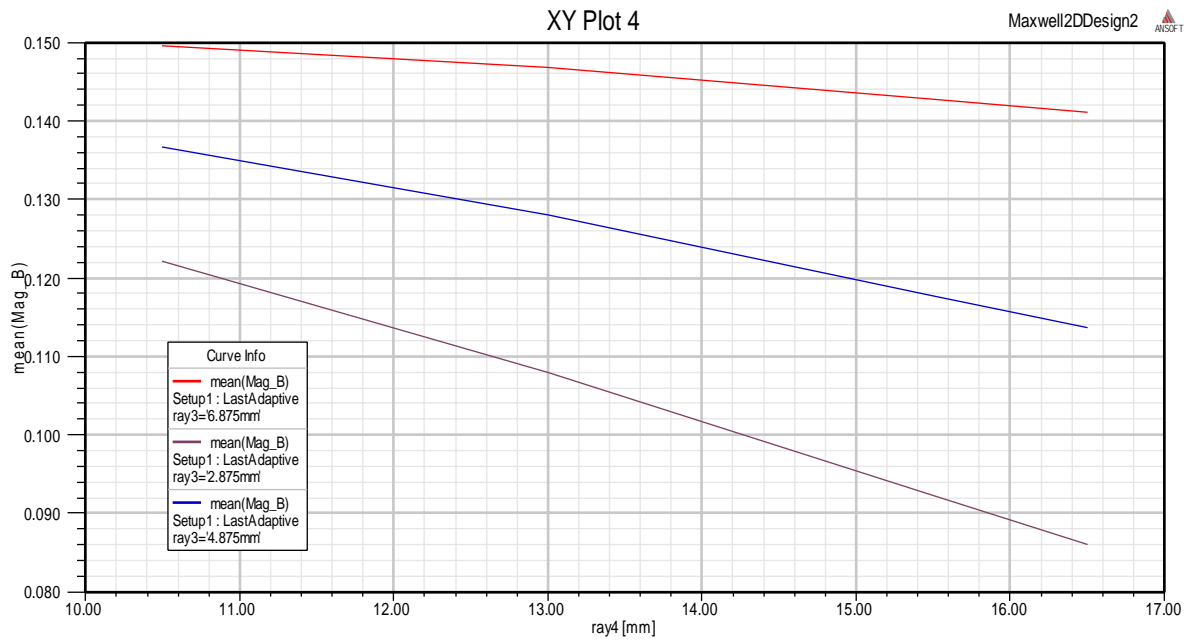


Figure 45 : l'allure de la valeur moyenne de l'induction [Tesla] en fonction du changement du rayon des pièces P3 et P4

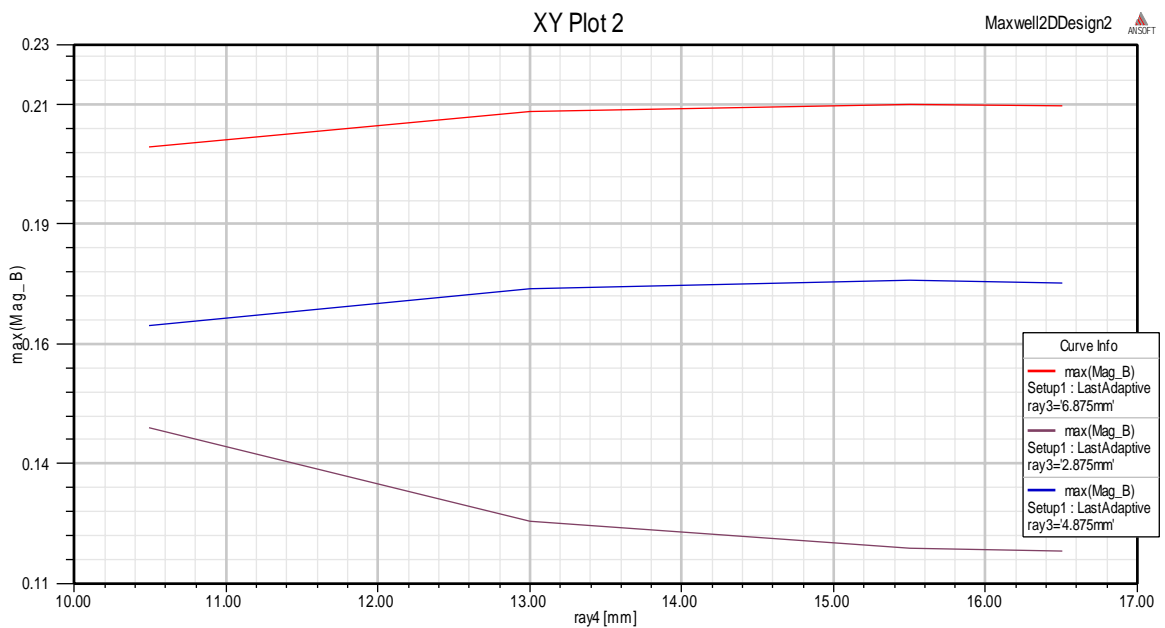


Figure 46: l'allure de la valeur maximale de l'induction [Tesla] en fonction du changement du rayons des pièces P3 et P4

CHAPITRE III : RESULTAT ET INTERPRETTION

D) Modification des matériaux :

Dans cette partie nous allons modifier les matériaux utilisés pour les deux aimants permanents (P4) et (P3) en même temps nous allons varier leur rayon, on va prélever les différentes distributions de l'induction et les valeurs moyennes et maximales dans des tableaux.

Le tableau suivant montre les différents matériaux utilisés pour chaque une des pièces.

<i>La pièce</i>	<i>Limiteur de champ (P2)</i>	<i>Aimant permanant P(3)</i>	<i>Aimant permanant P(4)</i>	<i>La cible (P5)</i>
<i>structure (1)</i>	<i>Fer</i>	<i>Alnico5</i>	<i>NdFe35</i>	<i>Ti</i>
<i>structure (2)</i>	<i>Fer</i>	<i>SmCo</i>	<i>Alnico5</i>	<i>Ti</i>
<i>structure (3)</i>	<i>Fer</i>	<i>SmCo</i>	<i>SmCo</i>	<i>Ti</i>
<i>structure (4)</i>	<i>Ferrite</i>	<i>NdFe35</i>	<i>NdFe35</i>	<i>Ti</i>
<i>structure (5)</i>	<i>Cobalt</i>	<i>Alnico5</i>	<i>Alnico5</i>	<i>Ti</i>

Tableau 3:les différentes variations des matériaux

Pour les figures les abréviations qui suivent désigner :

- *Var* : la variable du rayon de l'aimant P3.
- *Var1* : la variable du rayon de l'aimant P4.
- *Distance* : la longueur de l'arête (polyline) posée sur la surface de la cible P5

1) Structure (1) :

Dans cette structure nous avons utilisé le Fer comme matériau pour limiteur de champ (P2) et l'Alnico5 pour l'aimant (P3), NdFe35 pour l'aimant permanent (P4) et le titane (Ti) pour la cible (P5).

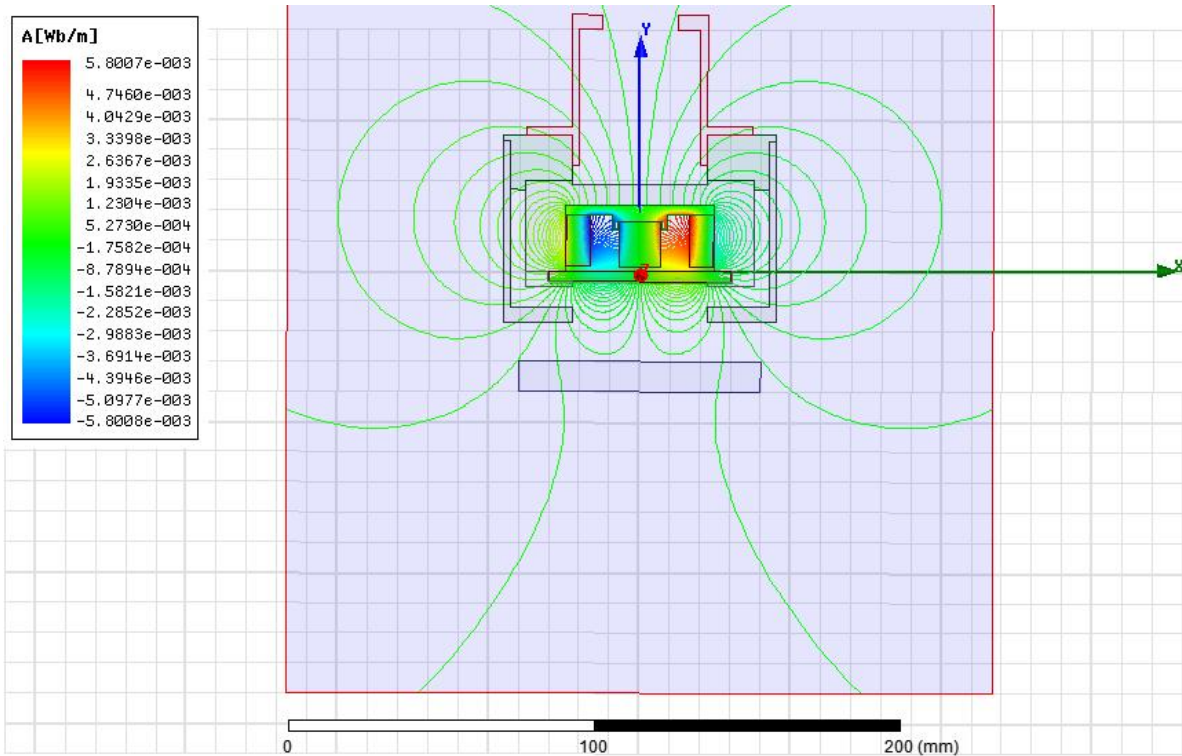


Figure 47: L'allure des lignes de champs de la structure (1)

La figure 47 nous montre l'allure des lignes du champ pour la structure 1 (tableau3) ou nous avons utilisé les matériaux (le limiteur du champ (fer) et l'aimant P3 (alnico5), l'aimant permanent P4(NdFe35) sur laquelle on remarque une distribution des lignes du champ qui vont acheminer et accélérer les ions

CHAPITRE III : RESULTAT ET INTERPRETTION

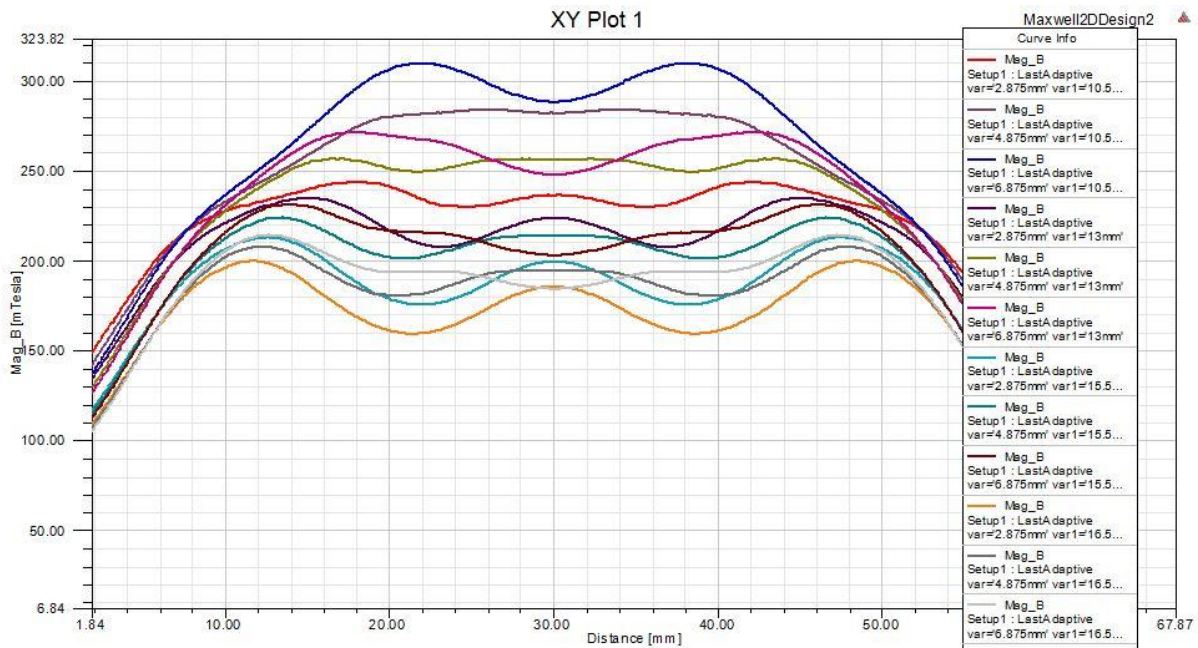


Figure 48: Distribution de l'induction de la structure (01).

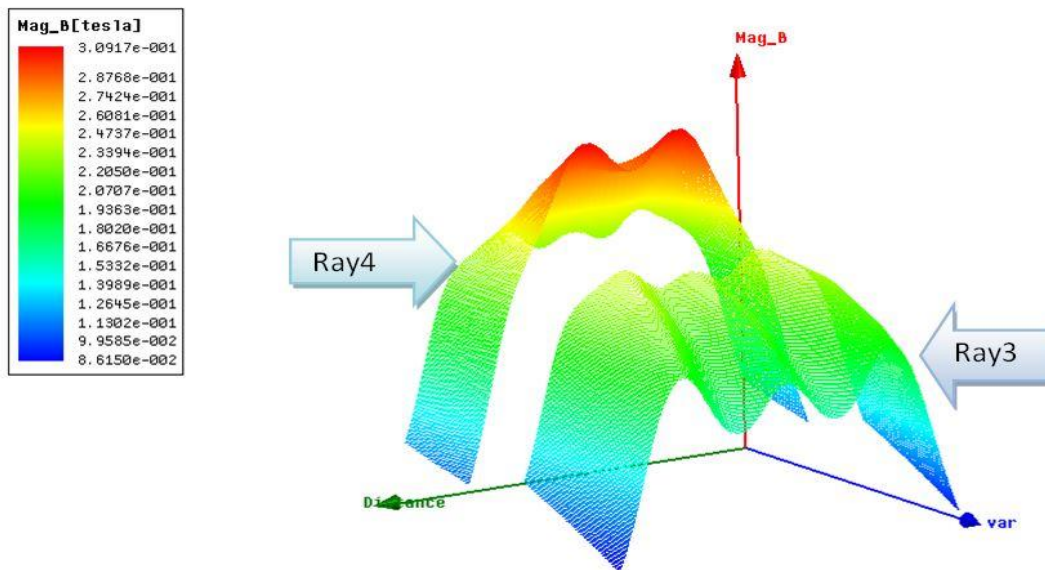


Figure 49: Distribution de l'induction le long de l'arête et la variation des aimants permanents P4 et P3

On remarque dans cette structure (figure 49 et 48) que les valeurs de l'induction sont très importantes dans la région de milieu, ou voisinage de la cible, si on réduit le rayon des deux aimants permanents nous allons avoir des faibles densités de champ magnétique (tableau 4 et 5) ,ce qui va influencer sur le nombre des électrons a piégé dans la trajectoire des lignes du champ magnétique, puisque

CHAPITRE III : RESULTAT ET INTERPRETTION

ils dépendent de la valeur du champ magnétique généré par les aimants permanents.[3] [4]

	var1 [mm]	mean(Mag_B) Setup1 : LastAdaptive var='2.875mm'	mean(Mag_B) Setup1 : LastAdaptive var='4.875mm'	mean(Mag_B) Setup1 : LastAdaptive var='6.875mm'
1	10.500000	0.218533	0.240377	0.250112
2	13.000000	0.204958	0.223960	0.228952
3	15.500000	0.180539	0.192908	0.196552
4	16.500000	0.167292	0.177463	0.180891

Tableau 4: Valeurs moyennes de l'induction

Dans ce tableau (*Tableau 4*) nous avons les valeurs moyennes pour chaque valeur du changement du rayon des deux aimants P3 et P4 qui sont présentés sur la figure qui suit.

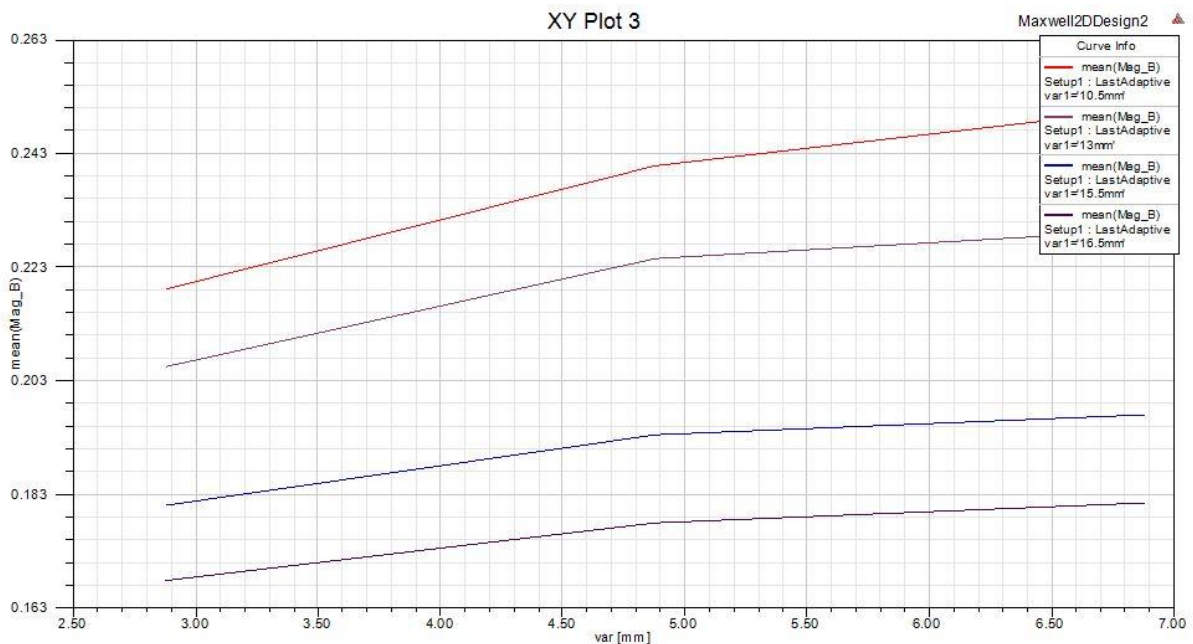


Figure 50: les valeurs moyennes de l'induction B_{moy} on fonction de rayon de l'aimant P3 pour la structure (1)

CHAPITRE III : RESULTAT ET INTERPRETTION

	var1 [mm]	max(Mag_B) Setup1 : LastAdaptive var=2.875mm'	max(Mag_B) Setup1 : LastAdaptive var=4.875mm'	max(Mag_B) Setup1 : LastAdaptive var=6.875mm'
1	10.500000	0.244194	0.284387	0.310067
2	13.000000	0.235242	0.257248	0.271942
3	15.500000	0.213362	0.224293	0.231967
4	16.500000	0.200211	0.208435	0.214477

Tableau 5: valeur max de l'induction

Ce tableau montre les valeurs de l'induction magnétique obtenues avec l'Ansys Maxwell pour la différente valeur du rayon de l'aimant P4 et P3.

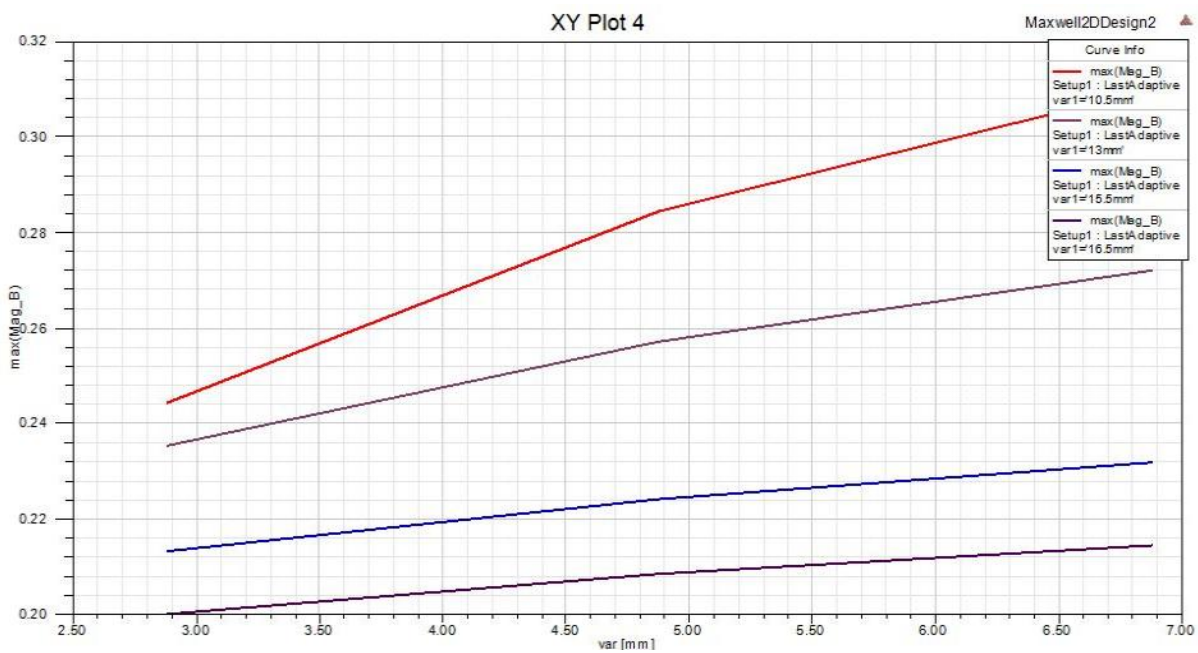


Figure 51: la valeur max de l'induction B_{max} [tesla] en fonction rayon de l'aimant P3 pour la structure (1).

2) La structure (2) :

Cette figure montre le comportement des lignes du champ pour les matériaux : le *Fer* pour limiteur du champ, *SmCo* pour la pièce P3 et *Alnico5* pour la pièce P4.

CHAPITRE III : RESULTAT ET INTERPRETTION

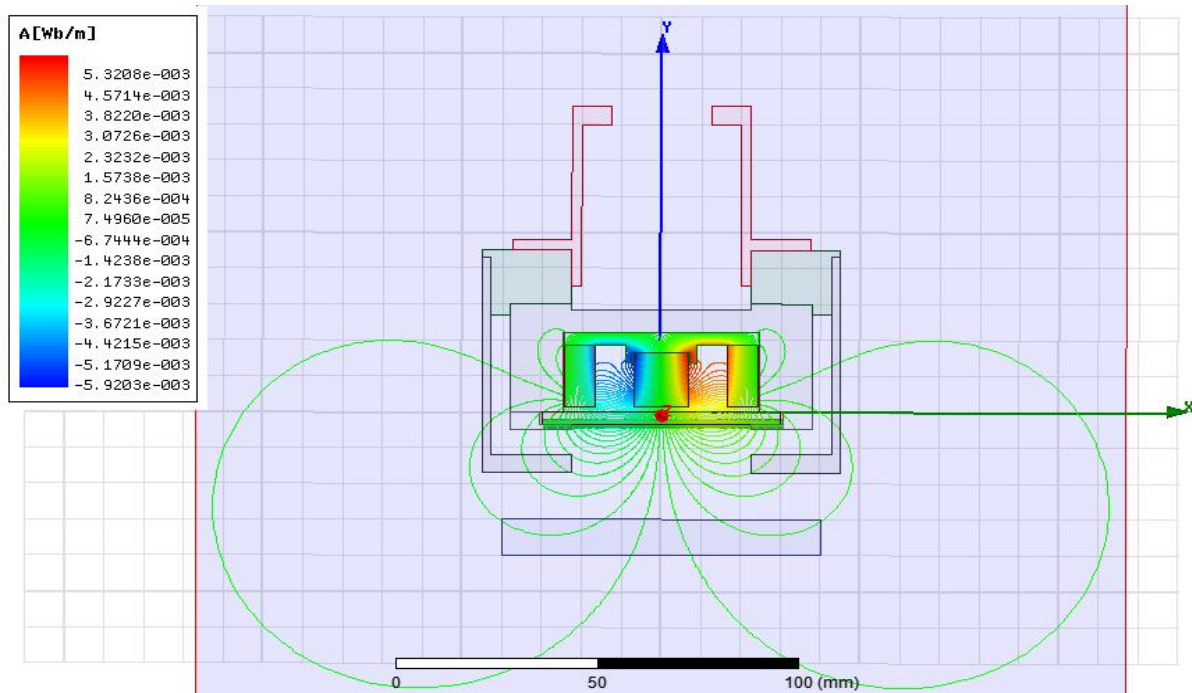


Figure 52: L'allure des lignes de champs de la structure (2)

Dans ce cas on note la différence entre le comportement des lignes du champ qui sont concentrées sur la cible, par contre la 1^{er} structure on remarque des lignes qui s'échappent sur les côtés.

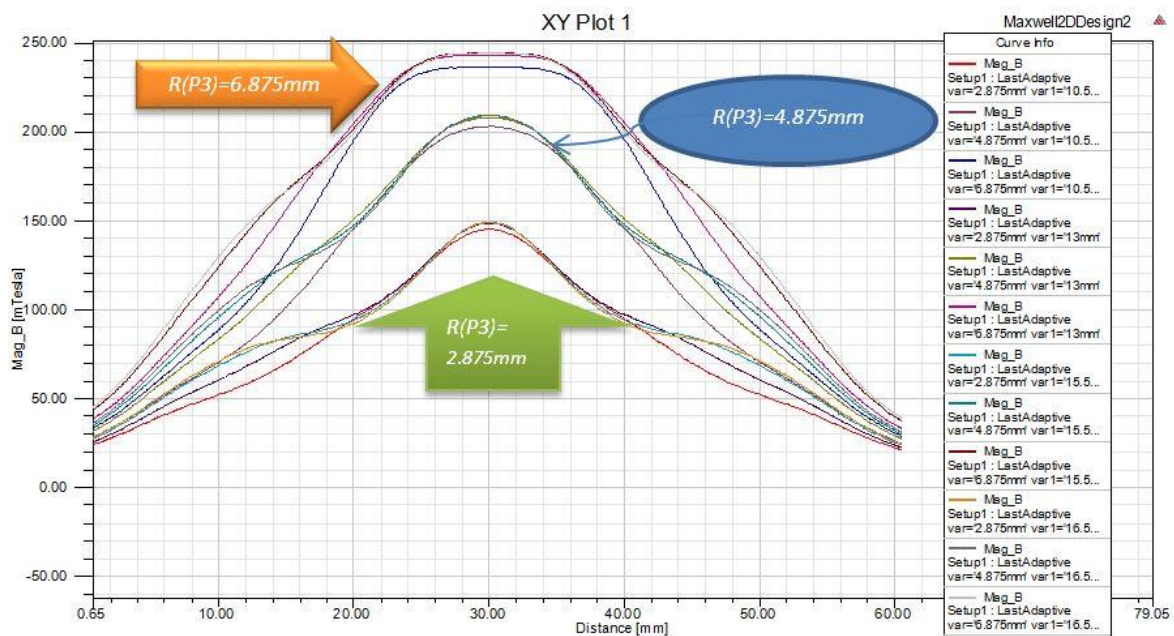


Figure 53: Distribution de l'induction de la structure (2)

On note que l'induction est très concentrée au milieu, et à chaque fois on s'éloigne du centre de la cible on aperçoit une décroissance remarquable de la valeur de l'induction, Ce qui engendre dans ce cas-là un confinement des électrons

CHAPITRE III : RESULTAT ET INTERPRETTION

dans la zone ou la valeur du champ magnétique est supérieure, ce qui implique que le dépôt sera moins bon, l'érosion non-uniforme, un mauvais rendement et une mauvaise qualité de filme mince.

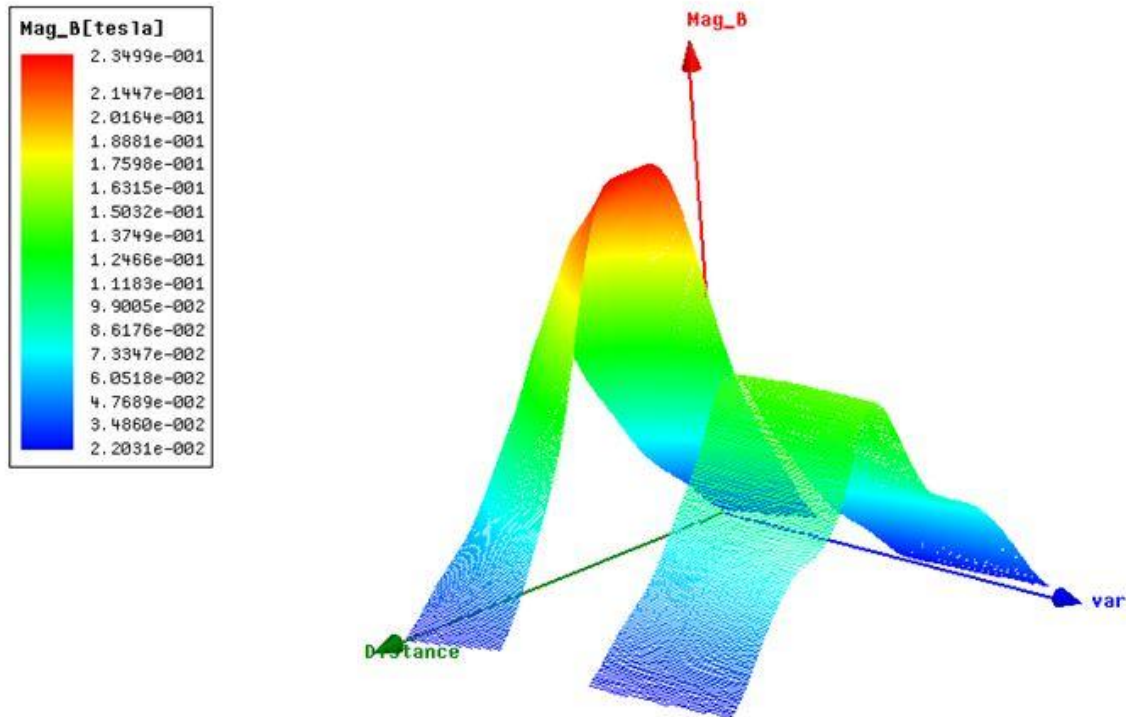


Figure 55: Distribution de l'induction le long de l'arête et la variation des aimants permanents P4 et P3

Le tableau 6 nous présente les valeurs moyennes de l'induction en fonction du rayon de l'aimant permanent P3 et P4.

	var1 [mm]	mean(Mag_B) Setup1 : LastAdaptive var='2.875mm'	mean(Mag_B) Setup1 : LastAdaptive var='4.875mm'	mean(Mag_B) Setup1 : LastAdaptive var='6.875mm'
1	10.500000	0.076451	0.110442	0.139100
2	13.000000	0.081235	0.118509	0.151179
3	15.500000	0.083442	0.122483	0.157506
4	16.500000	0.083662	0.123090	0.158660

Tableau 6: valeur moyenne de l'induction pour la structure 2

CHAPITRE III : RESULTAT ET INTERPRETTION

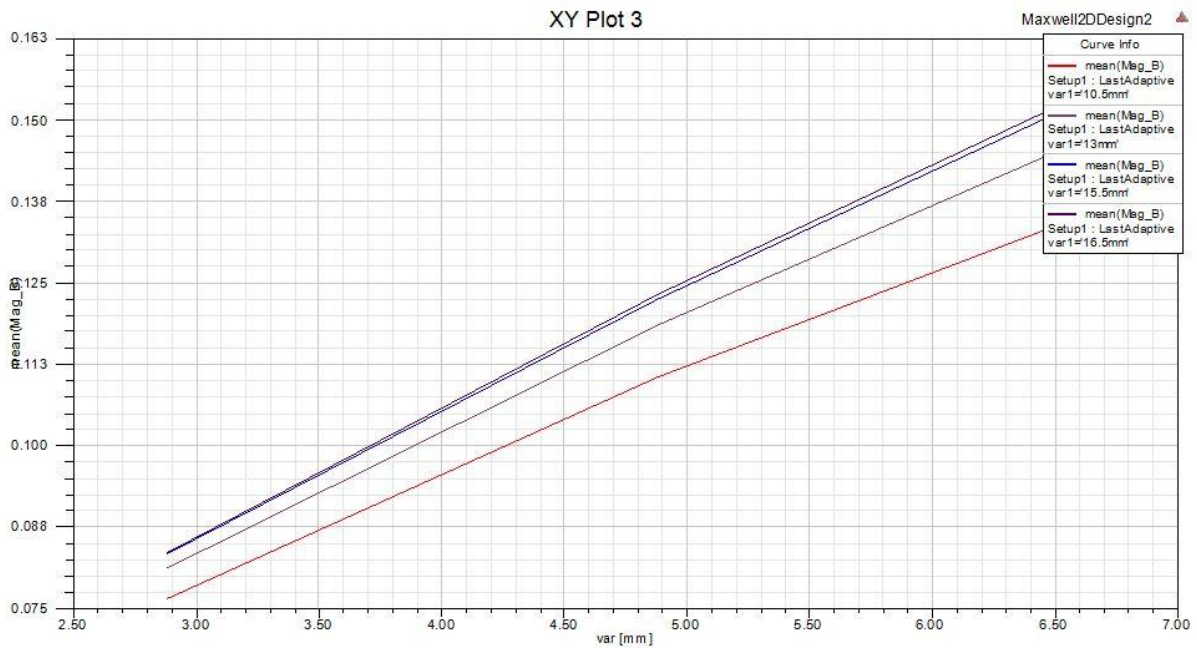


Figure 56 : les valeurs moyenne de l'induction B_{moy} [tesla] en fonction du rayon des aimant P3 et P4

Le tableau suivant (*Tableau 7*) nous donne les valeurs maximales de l'induction pour chaque valeur des rayons des aimants P3 et P4

	var 1 [mm]	max(Mag_B) Setup1 : LastAdaptive var='2.875mm'	max(Mag_B) Setup1 : LastAdaptive var='4.875mm'	max(Mag_B) Setup1 : LastAdaptive var='6.875mm'
1	10.500000	0.145101	0.202632	0.235848
2	13.000000	0.148484	0.207615	0.242551
3	15.500000	0.149130	0.208875	0.244415
4	16.500000	0.149041	0.208628	0.244187

Tableau 7: valeur maximal de l'induction pour la structure 2

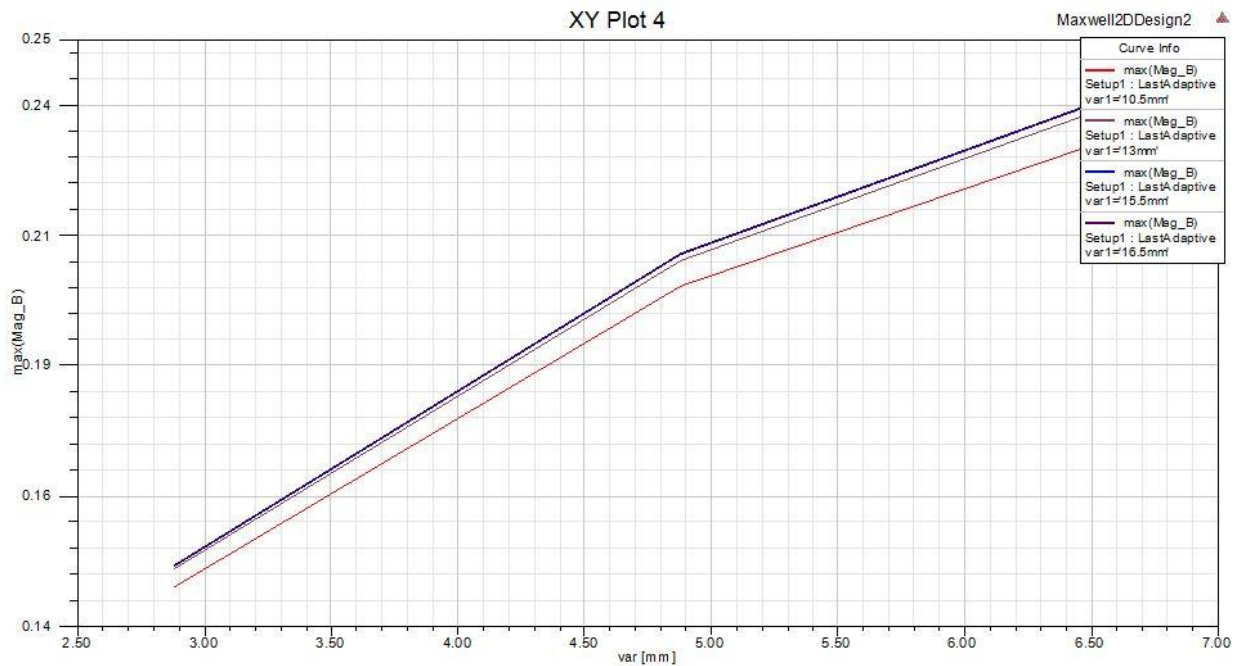


Figure 57: les valeurs de l'induction moyenne B_{max} [tesla] en fonction du rayon des aimant P3 et P4

3) Structure (3) :

Pour cette modification nous avons pris le samarium cobalt (SmCo) pour les deux aimants permanents P3 et P4 et le fer pour le limiteur du champ magnétique et une cible qui est en titane comme il est mentionné dans le tableau(03).

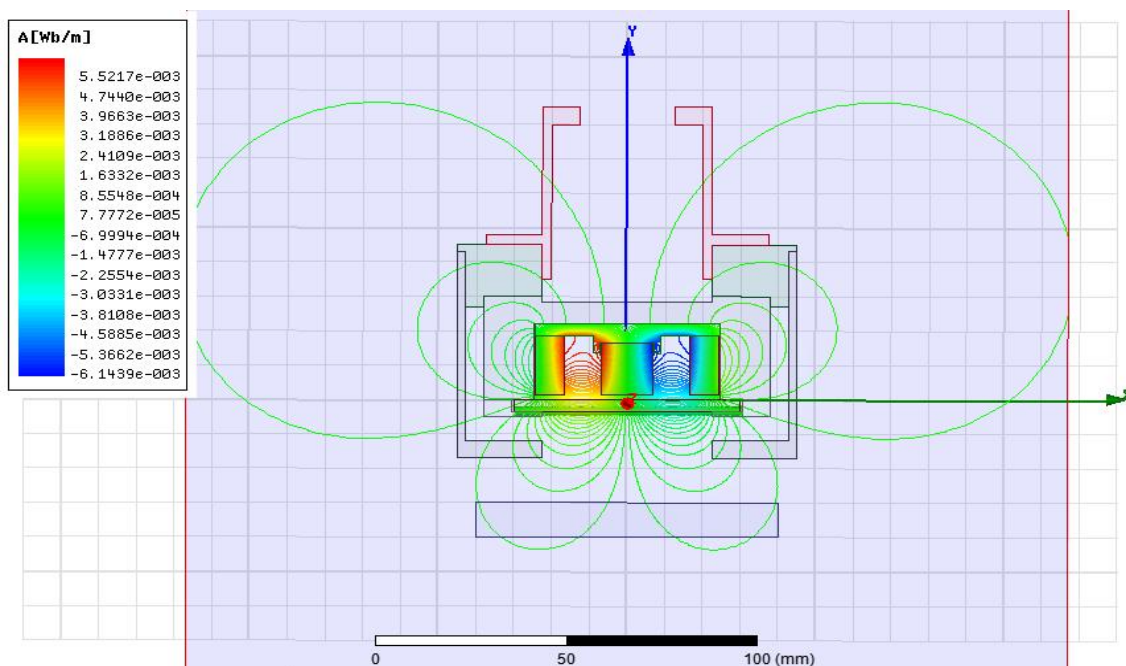


Figure 58: L'allure des lignes du champ magnétique de la structure (3).

CHAPITRE III : RESULTAT ET INTERPRETTION

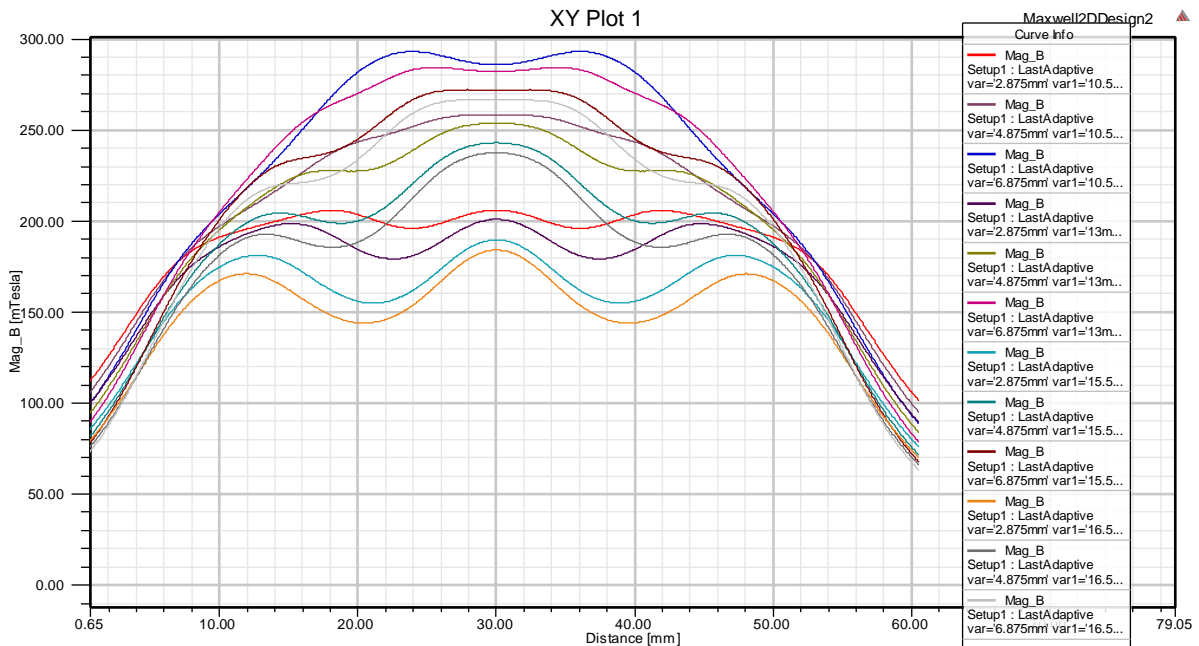


Figure 59: Distribution de l'induction en fonction de l'arête pour la structure 03

Si on compare les résultats obtenus dans cette structure et les précédentes, on note une différence entre le comportement du champ magnétique et ces valeurs d'un cas à l'autre. Cette différence est montrée sur les tableaux des valeurs moyennes et maximales de l'induction (tableau 8 et 9) qui sont les plus importantes par rapport aux autres structures, de même pour la répartition du champ magnétique (figure 59), le comportement des lignes du champ et la vitesse de dérive des électrons en plus de son rôle de confinement (signalant que le plasma est plus dense à l'endroit au le champ magnétique est plus intense) [4].

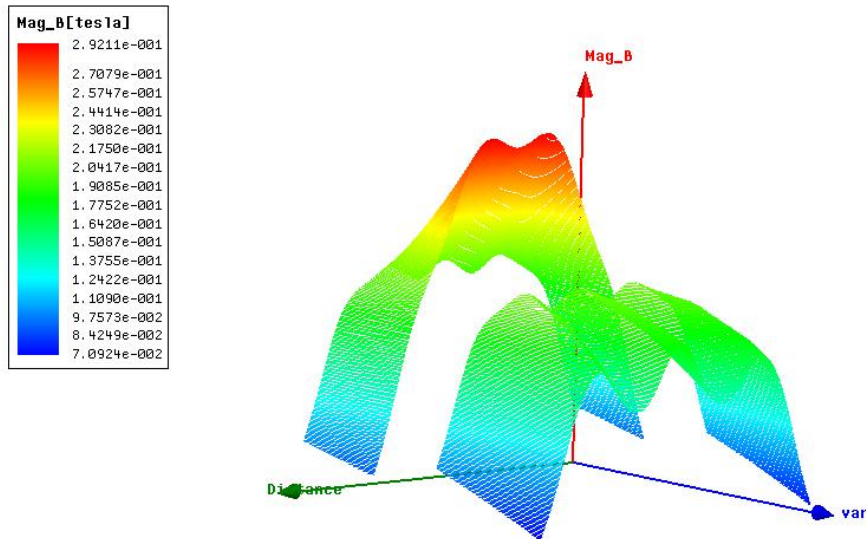


Figure 60 : Distribution de l'induction le long de l'arête et la variation des aimants permanents P4 et P3 de la structure 03

Le tableau 5 porte les valeurs moyennes de l'induction pour chaque valeur des rayons des deux aimant P3et P4

	var1 [mm]	mean(Mag_B) Setup1 : LastAdaptive var='2.875mm'	mean(Mag_B) Setup1 : LastAdaptive var='4.875mm'	mean(Mag_B) Setup1 : LastAdaptive var='6.875mm'
1	10.500000	0.184643	0.208145	0.226398
2	13.000000	0.174601	0.200563	0.221733
3	15.500000	0.156958	0.184871	0.208447
4	16.500000	0.147996	0.176573	0.201005

Tableau 8 : les valeurs moyennes de l'induction pour la structure3

CHAPITRE III : RESULTAT ET INTERPRETTION

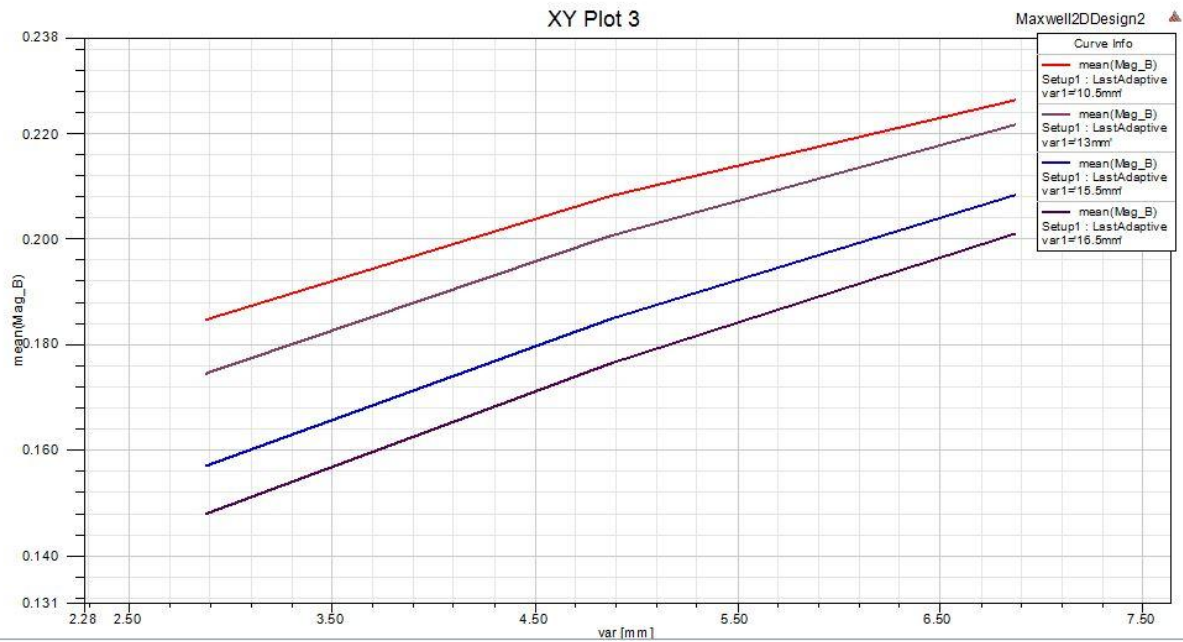


Figure 61: les valeurs moyennent de l'induction B_{moy} [tesla] en fonction du rayon des aimants P3 et P4

	var1 [mm]	max(Mag_B) Setup1 : LastAdaptive var=2.875mm'	max(Mag_B) Setup1 : LastAdaptive var=4.875mm'	max(Mag_B) Setup1 : LastAdaptive var=6.875mm'
1	10.500000	0.205877	0.258255	0.293001
2	13.000000	0.200899	0.253730	0.284272
3	15.500000	0.189663	0.242992	0.272015
4	16.500000	0.184024	0.237477	0.266574

Tableau 9: valeur maximal de l'induction pour la structure 3

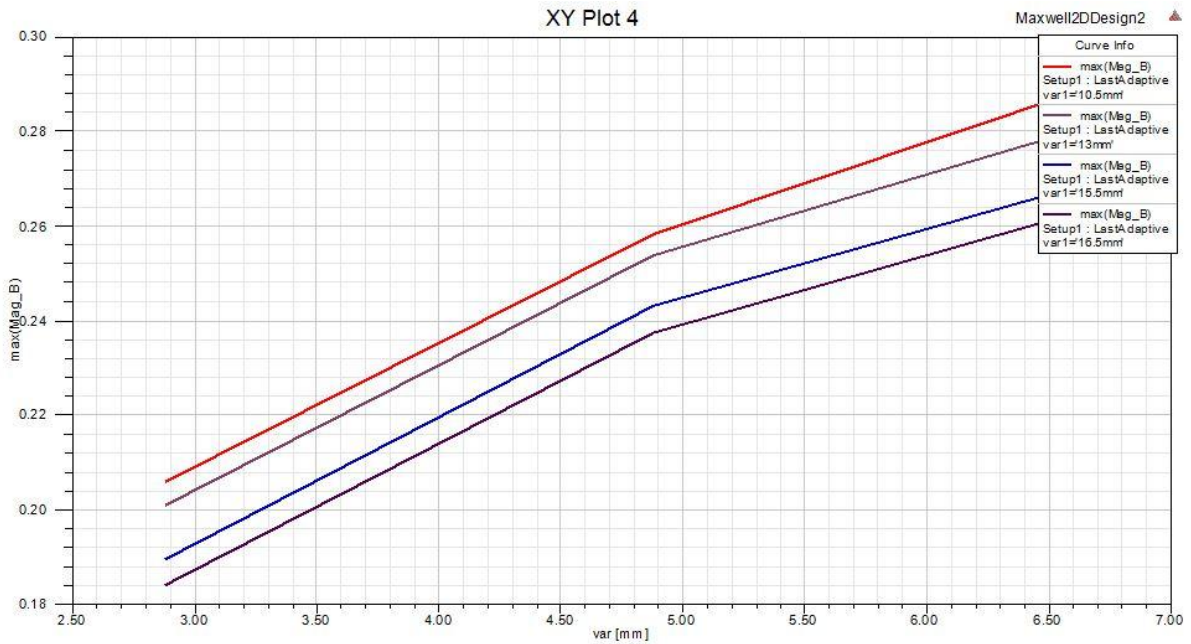


Figure 62: les valeurs maximal de l'induction B_{max} [tesla] en fonction du rayon des aimants P3 et P4

4) La Structure (4) :

Dans cette étape nous avons utilisé $NdFe35$ pour les pièces P3 et P4, et le Ferrite pour le limiteur du champ. La figure 62 nous montre le comportement des lignes du champ

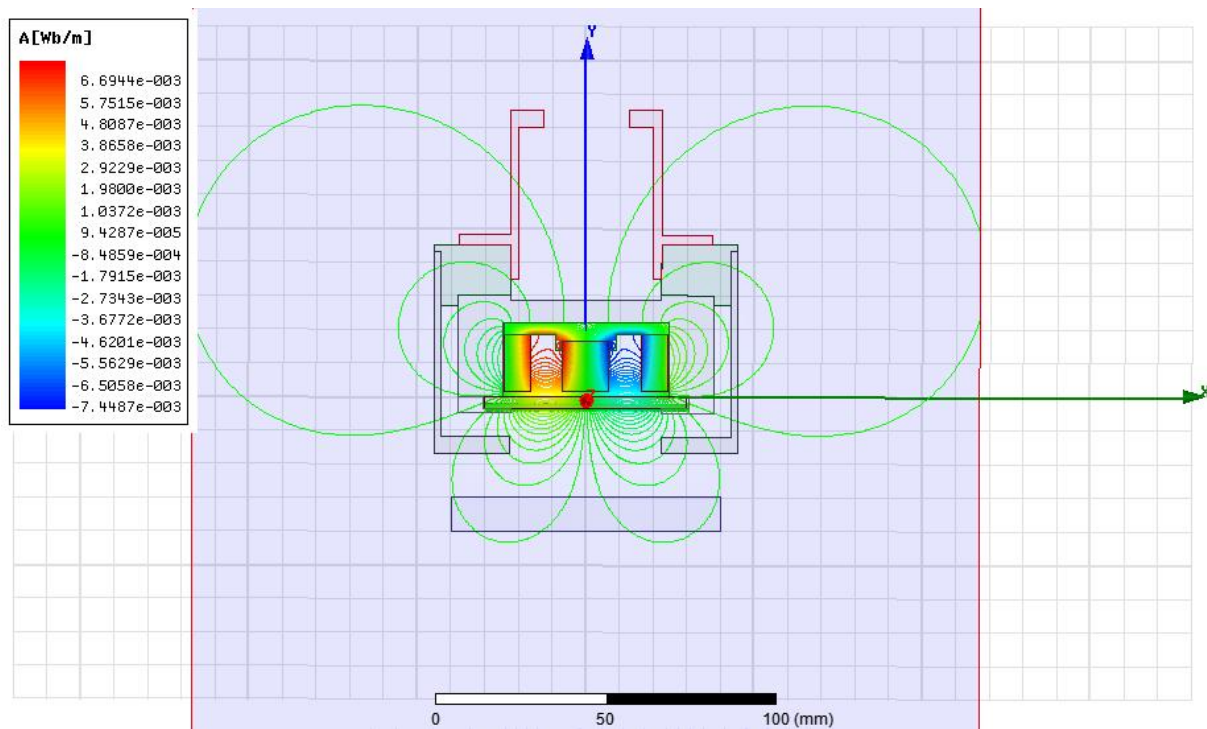


Figure 63: L'allure des lignes du champ magnétique pour la structure 4

CHAPITRE III : RESULTAT ET INTERPRETTION

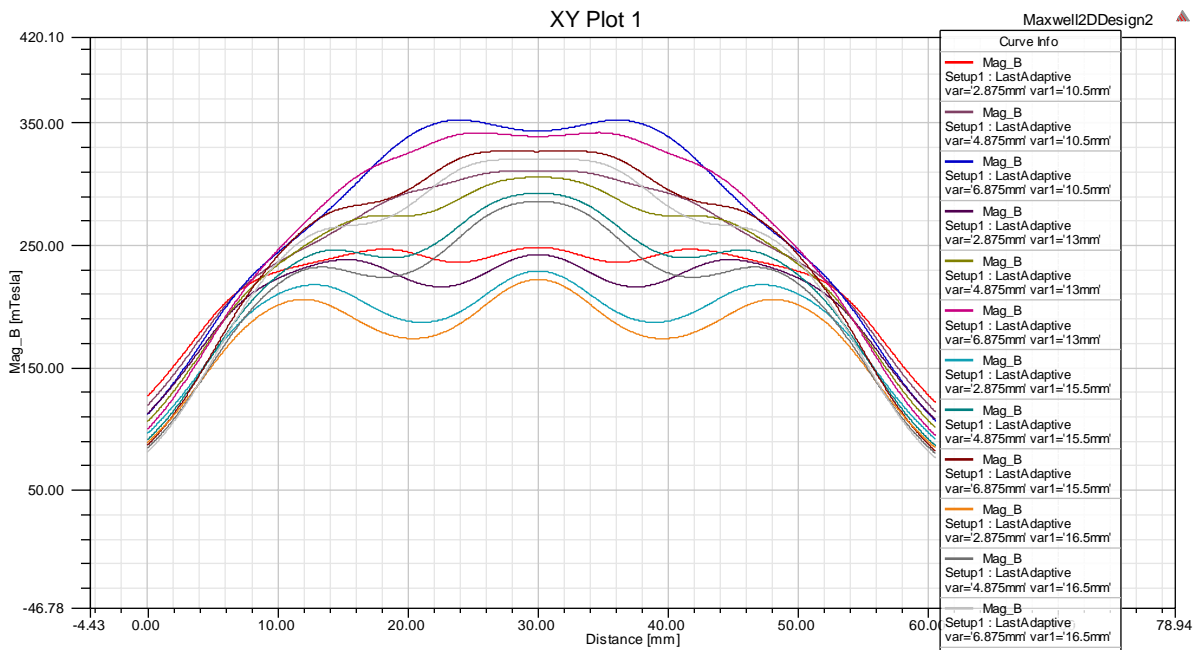


Figure 64: Distribution de l'induction de la structure (4)

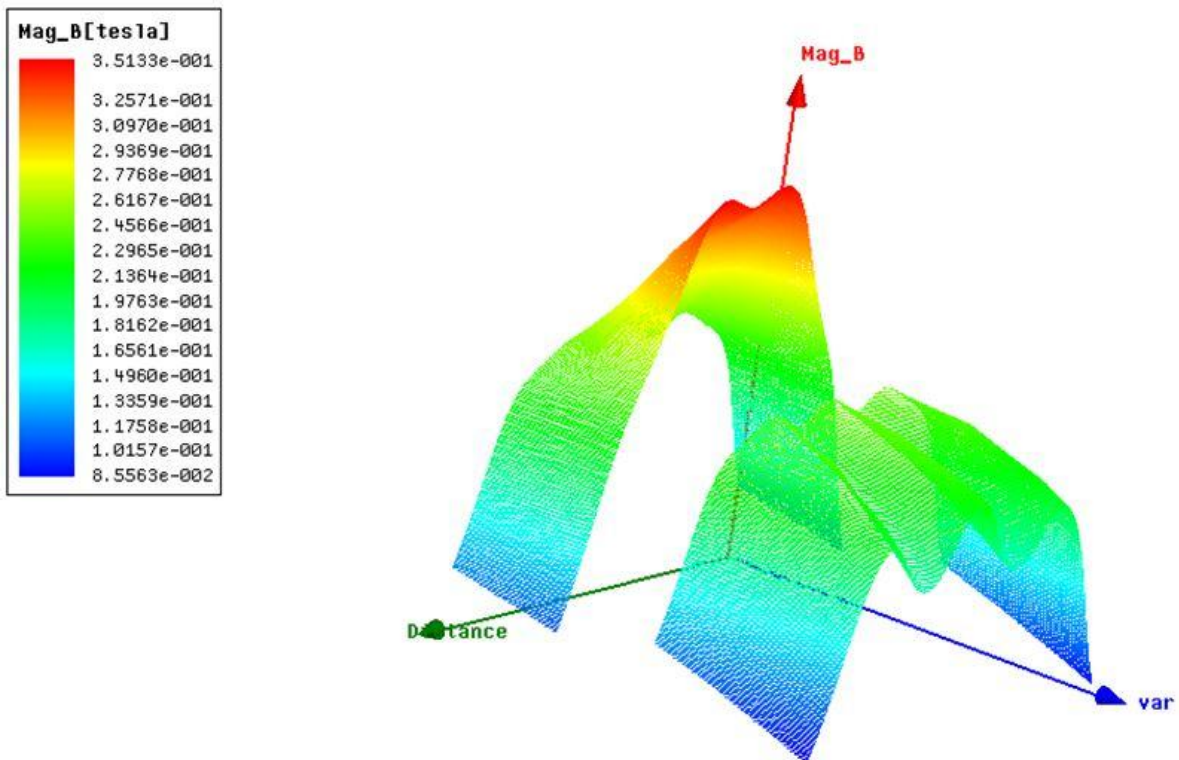


Figure 65: Distribution de l'induction le long de l'arête et la variation des aimants permanents P4 et P3 de la structure 04

CHAPITRE III : RESULTAT ET INTERPRETTION

	var1 [mm]	mean(Mag_B) Setup1 : LastAdaptive var='2.875mm'	mean(Mag_B) Setup1 : LastAdaptive var='4.875mm'	mean(Mag_B) Setup1 : LastAdaptive var='6.875mm'
1	10.500000	0.221676	0.250042	0.271859
2	13.000000	0.210031	0.241328	0.266649
3	15.500000	0.189149	0.222755	0.250950
4	16.500000	0.178469	0.212860	0.242062

Tableau 10: valeur moyenne de l'induction pour la structure 4

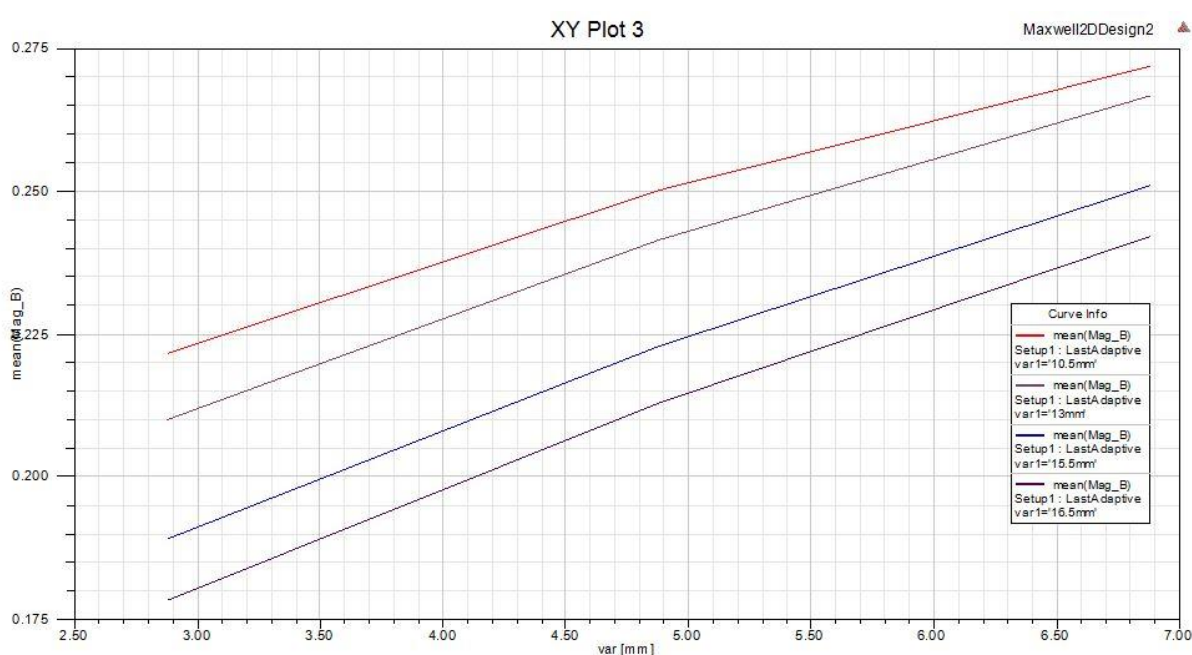


Figure 66: les valeurs moyennent de l'induction B_{moy} [tesla] en fonction du rayon des aimants P3 et P4

	var1 [mm]	max(Mag_B) Setup1 : LastAdaptive var='2.875mm'	max(Mag_B) Setup1 : LastAdaptive var='4.875mm'	max(Mag_B) Setup1 : LastAdaptive var='6.875mm'
1	10.500000	0.248294	0.310942	0.352397
2	13.000000	0.242392	0.305615	0.341983
3	15.500000	0.228918	0.292605	0.326953
4	16.500000	0.222207	0.285965	0.320307

Tableau 11: valeur maximale de l'induction pour la structure 4

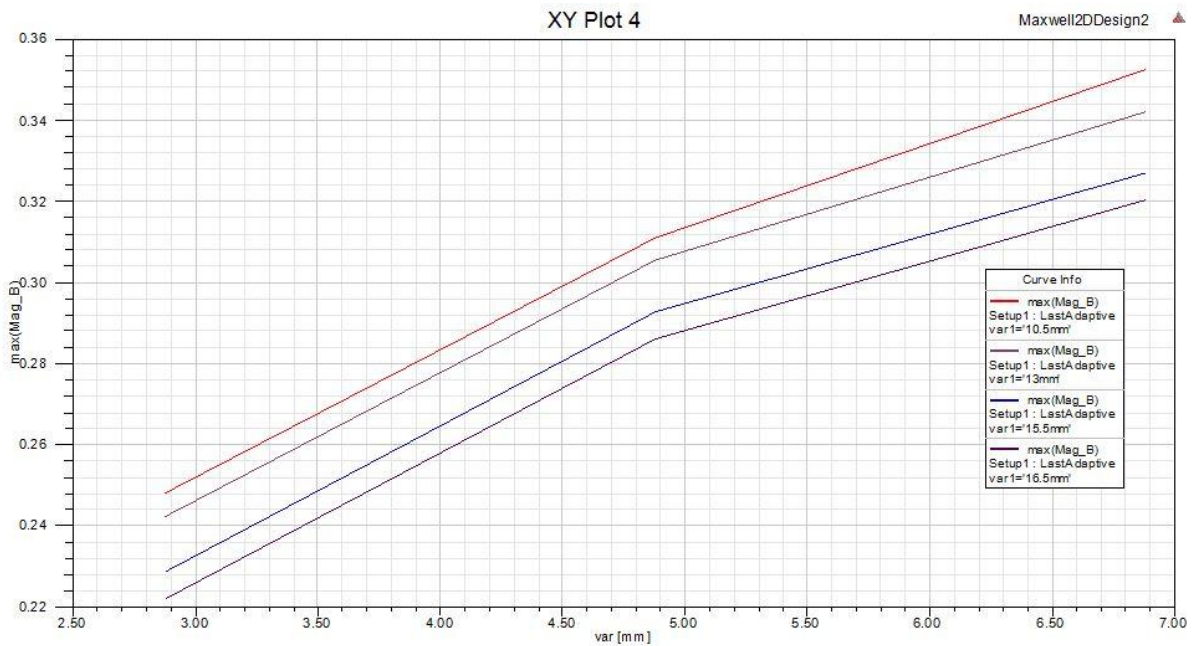


Figure 67: les valeurs maximal de l'induction B_{max} [tesla] en fonction du rayon des aimants P3 et P4

Dans ce cas-là on note que les résultats obtenus sont vraiment très important, comme on le distingue sur le tableau 10 (sur la colonne ou le rayon P3 (var=6.875) nous avons des valeurs moyennes qui sont supérieure ou valeurs maximale des autres Structures), ce qui veut dire qu'on aura un bon confinement des électrons mieux que les autres variations toutes on sachons que la ou les valeurs du champ magnétique sont très intense c'est là où il y a un bon confinement des électrons, un piégeage important et un bon rendement et une bonne qualité du film mince [4]. Ce qui signifié que cette structure est la plus optimale entre toutes les autres structures.

5) Structure (05) :

Dans ce cas nous avons utilisé du cobalt pour le limiteur du champs et Alnico5 pour les deux aimants permanents

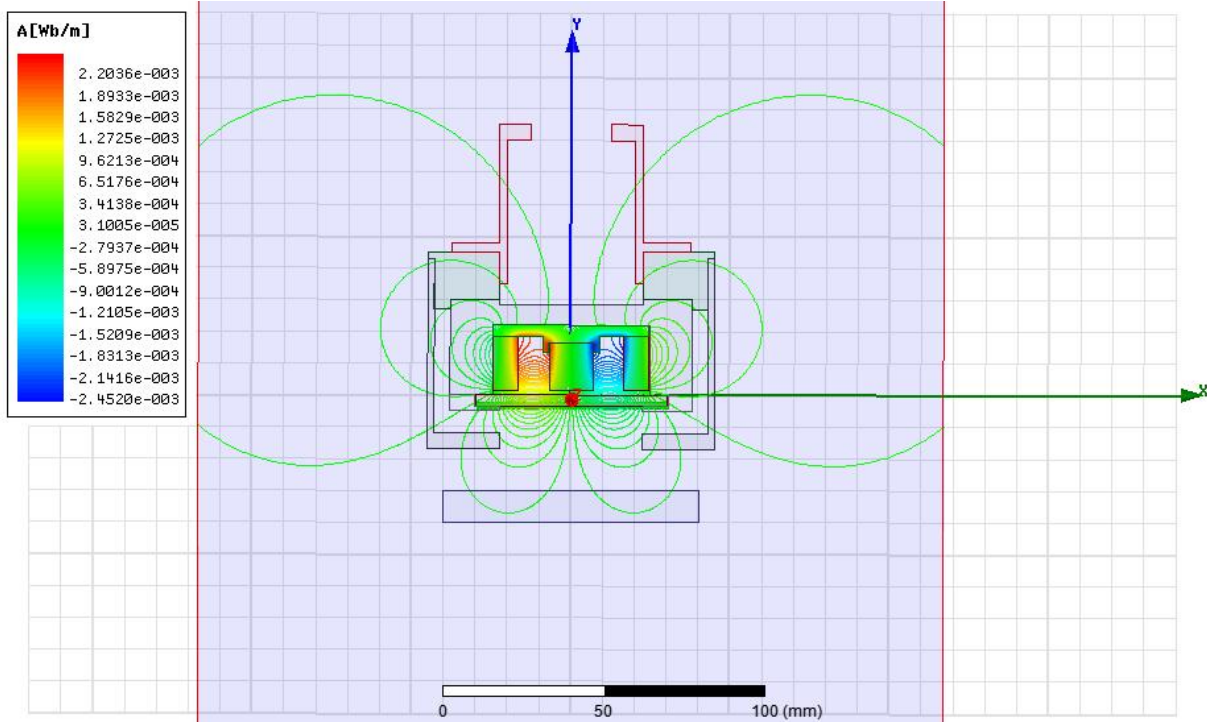


Figure 68: L'allure des lignes du champ magnétique de la structure (5).

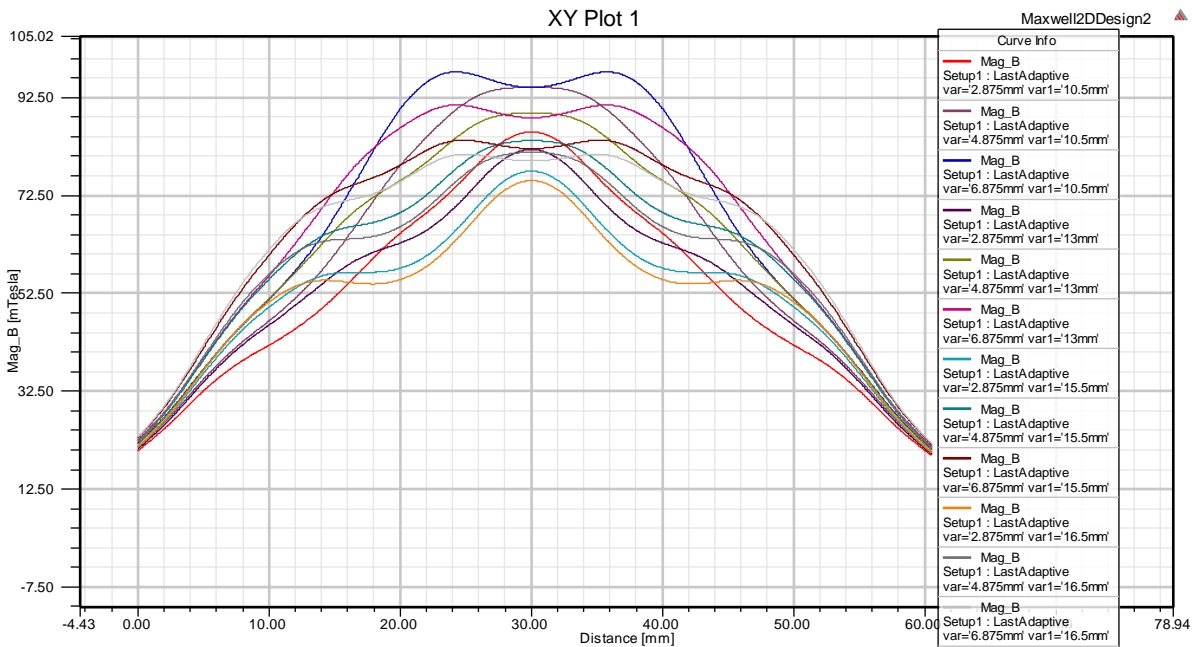


Figure 69: Distribution de l'induction en fonction de l'arête pour la structure 5

CHAPITRE III : RESULTAT ET INTERPRETTION

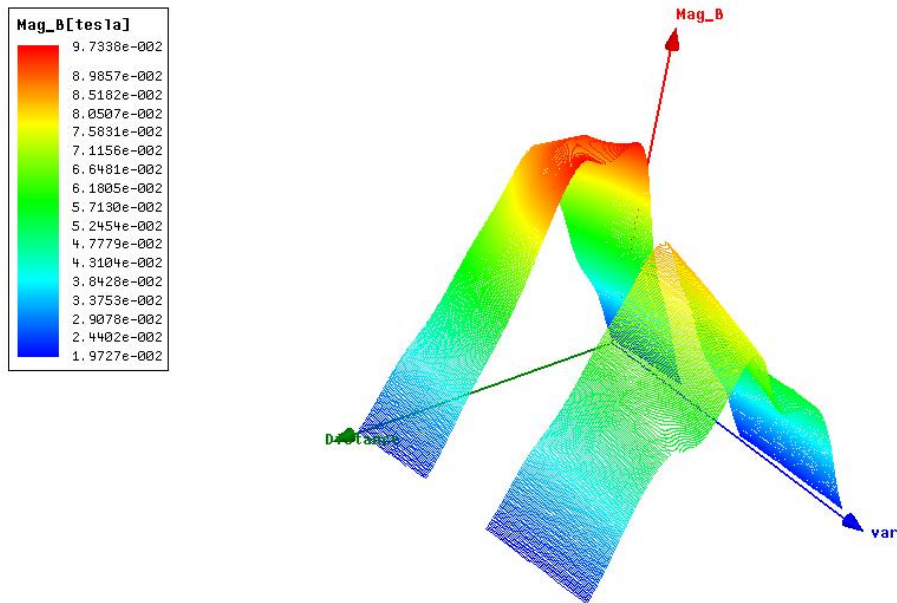


Figure 70: *Distribution de l'induction le long de l'arête et la variation des aimants permanents P4 et P3 pour structure 05*

	var1 [mm]	mean(Mag_B) Setup1 : LastAdaptive var=2.875mm ³	mean(Mag_B) Setup1 : LastAdaptive var=4.875mm ³	mean(Mag_B) Setup1 : LastAdaptive var=6.875mm ³
1	10.500000	0.053159	0.061394	0.066733
2	13.000000	0.053671	0.061474	0.066568
3	15.500000	0.052637	0.059912	0.064656
4	16.500000	0.051788	0.058828	0.063410

Tableau 12: *les valeurs moyennes de l'induction pour la structure 5*

CHAPITRE III : RESULTAT ET INTERPRETTION

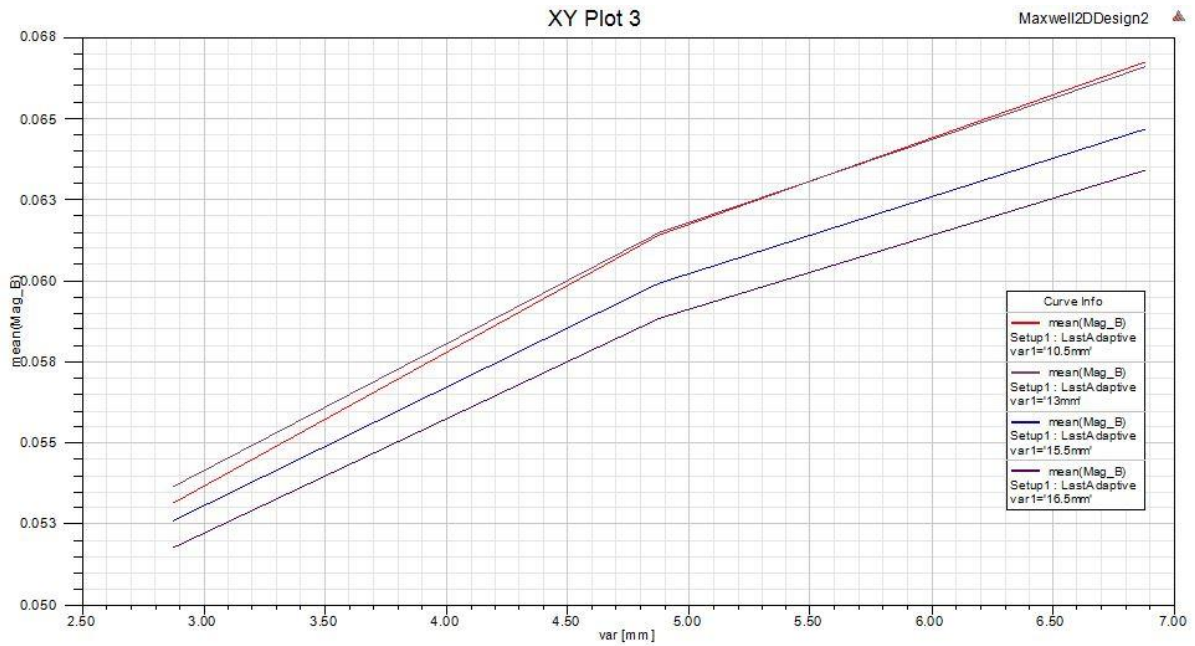


Figure 71: les valeurs moyennent de l'induction B_{moy} [tesla] en fonction du rayon des aimants P3 et P4

	var 1 [mm]	max(Mag_B) Setup 1 : LastAdaptive var=2.875mm'	max(Mag_B) Setup 1 : LastAdaptive var=4.875mm'	max(Mag_B) Setup 1 : LastAdaptive var=6.875mm'
1	10.500000	0.085425	0.094539	0.097650
2	13.000000	0.081823	0.089322	0.090900
3	15.500000	0.077399	0.083627	0.083707
4	16.500000	0.075483	0.081274	0.080860

Tableau 13: valeur maximale de l'induction pour la structure 5

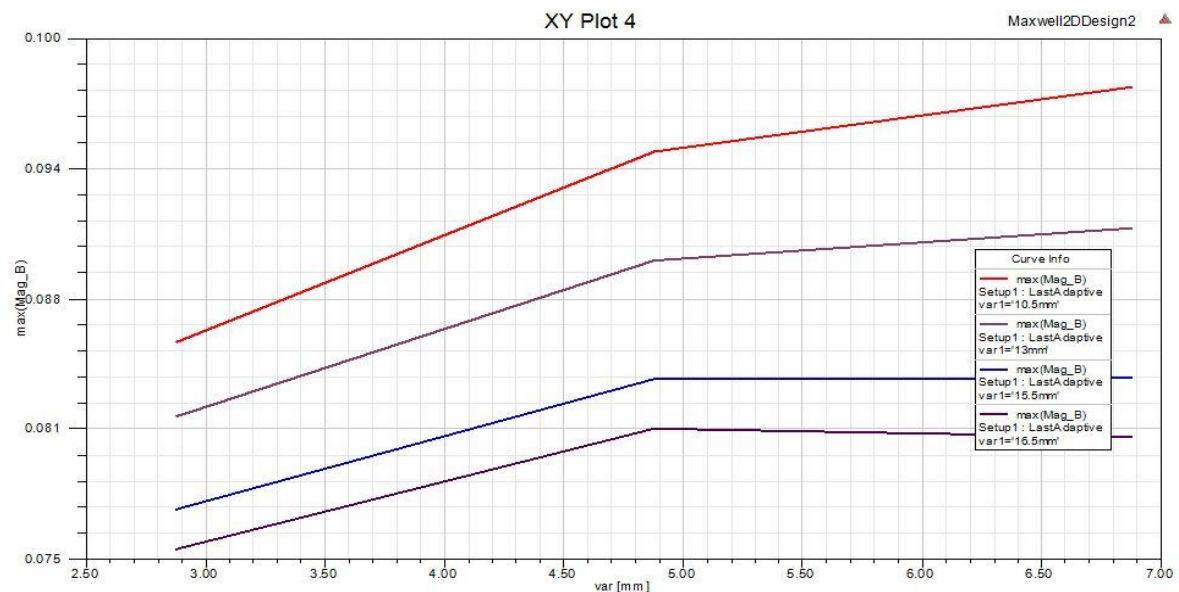


Figure 72: les valeurs maximales de l'induction B_{max} [tesla] en fonction du rayon des aimants P3 et P4

CHAPITRE III : RESULTAT ET INTERPRETTION

Dans ce cas-là l'utilisation de l'ALNICO5 nous a donné des valeurs de champs très faible pas rapport aux valeurs précédentes.

La première chose a remarqué dans cette structure c'est la valeur de l'induction qui est la plus faible entre toutes les variations des paramètres géométriques et celle des matériaux, nous avons les valeurs max et moyenne de l'induction (tableau 12 et 13) qui n'atteignent pas **Bmax=0.1T**, on a un comportement du champ qui est instable par rapport à la Structure 4, ce qui veut dire qu'on aura un faible champ aux alentours de la cathode, un mauvais confinement d'électrons et un plasma moins dense impliquant une érosion non-uniforme une mauvaise qualité du dépôt de couche mince générant un rendement médiocre.

IV.2. Etude électrostatique

Pour cette étude électrostatique, nous avons appliqué une excitation du $V=10\text{kV}$ entre l'anode et la cathode, par la suit on a modifié la distance de l'anode (la porte cible) pour distance D pour voir le comportement du champ électrique en fonction de la distance entre la cathode et l'anode.

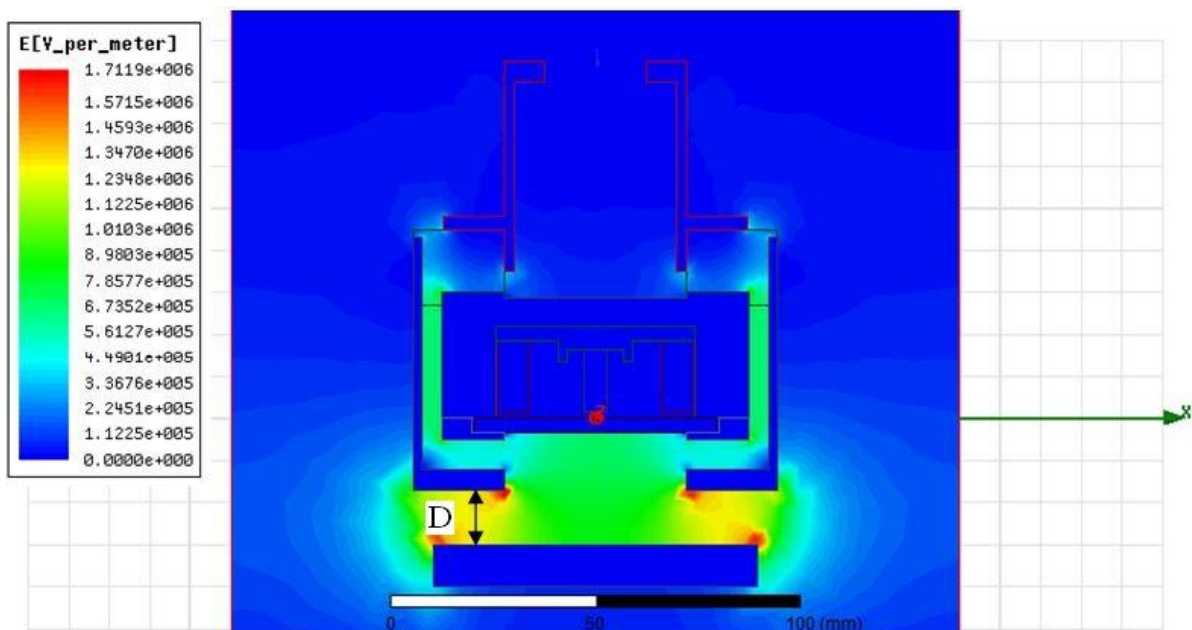


Figure 73: l'allure du champ électrique

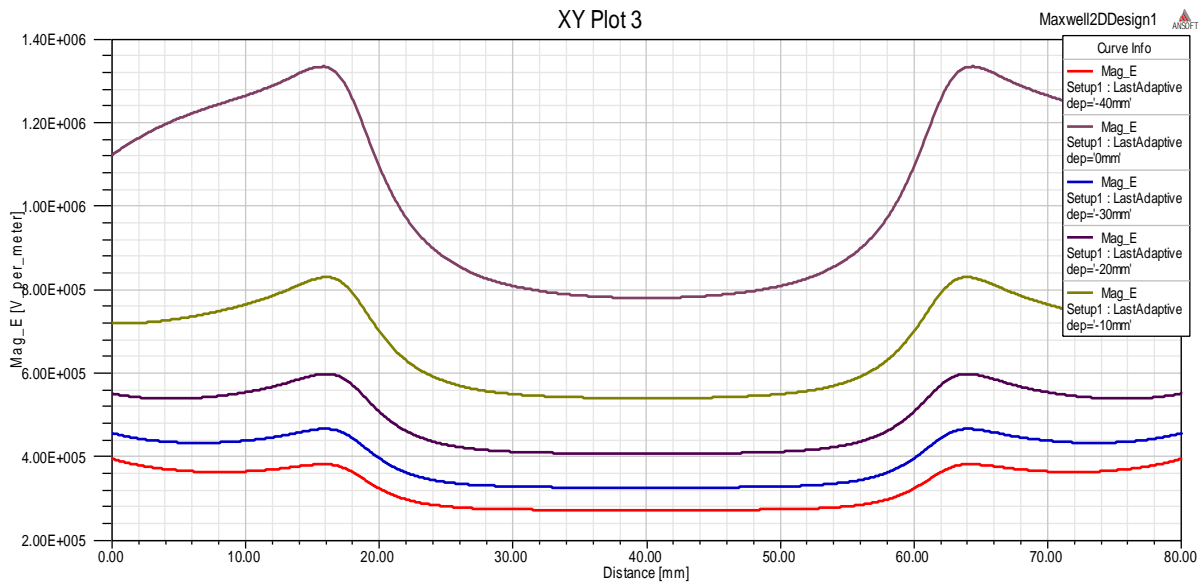


Figure 74: l'allure du champ électrique pour chaque valeur donnée à la distance D

On remarque pour chaque fois on réduit la distance (D) entre l'anode et la cathode on note une intensification du champ électrique (figure 74), ce qui influence pas sur le comportement du champ magnétique mais faut bien attention au arc électrique.

L'ajustement de la distance du port substrat D est généralement utilisé pour l'optimisation de l'homogénéité des couche en épaisseur et en composition, cependant cela se fait souvent au détriment de la vitesse de dépôt. [3] [15]

Conclusion

Dans cette partie de notre travail, nous avons changé les matériaux des pièces (P3, P4, P2) comme il est illustré dans le tableau pour cinq cas différents, pour voir le comportement des lignes de champs et l'induction nous avons prélevé pour chaque variation l'allure des lignes du champ, et aussi la distribution de l'induction le long de la cible, sur les deux autres emplacements qu'on a cité auparavant.

Comme il est présenté sur le tableau (03), nous avons procédé à plusieurs combines de matériaux, ce qui nous a donné différentes allure de lignes de champ et de l'induction, cela est dû aux propriétés des matériaux utilisés pour chaque une des pièces.

CHAPITRE III : RESULTAT ET INTERPRETTION

- Nous avons étudié l'effet du matériau des aimants permanents de la cathode magnétron sur la distribution des lignes de champs (pièces P3, P4 dans le montage), l'induction rémanente, le champ correctif et les énergies spécifiques de chaque aimant a été déterminé dans chaqu'une des figures.
- L'effet de la pièce P2 du montage, constitué d'un matériau ferromagnétique (leur forte susceptibilité magnétique), qui est utilisé pour piéger et acheminer les lignes de champs dans la face arrière de la cathode, influence sur la variation des lignes de champs.

En résumé, les résultats d'investigation de cette étude montrent que le désigne des deux cathodes magnétrons du système de pulvérisation bi-cathodes est admissible. Les lignes de champs sont confinées autour des deux cathodes et démontre que ces dernières sont équilibrées. L'effet des matériaux adjacents ne s'est pas manifesté.

Le modèle obtenu par Maxwell-Ansys peut servir à approfondir davantage l'étude et d'arriver à une conception plus meilleure. La validation de ce modèle peut se faire par des mesures expérimentales sur le bâti dans le futur.

Conclusion générale et perspectives

Ce travail consiste à développer un modèle électromagnétique sans charge d'une cathode magnétron en utilisant le logiciel Ansys Maxwell. Ce logiciel utilise la méthode des éléments finis pour la résolution de l'équation de l'électromagnétisme, il est utilisé dans différents domaines de recherche scientifiques et industriels.

Notre travail s'est focalisé dans l'étude et l'optimisation de la conception d'une cathode magnétron, composant principal dans un système de pulvérisation cathodique. Il est à noter que les systèmes de pulvérisation cathodique sont utilisés pour le dépôt de couches minces pour différentes applications. La bonne conception de la cathode mène à un bon confinement des lignes de champ et par conséquent une meilleure qualité des couches minces déposées.

Un modèle à deux dimensions du système de pulvérisation cathodique a été élaboré en utilisant le logiciel Ansys-Maxwell et une étude magnétostatique a été réalisée. Dans cette étude, nous avons procédé au changement des différents paramètres de conception de la cathode magnétron à savoir le type des matériaux des aimants permanents et les autres matériaux (cible, enveloppe, support,...), la géométrie et les dimensions des pièces composant la cathode, leurs dispositions. Deux cas de figure ont été étudiés, une cathode avec une cible en Titane (amagnétique) et une cathode avec une cible en Nickel (ferromagnétique).

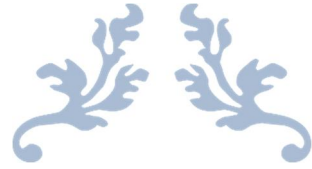
Les résultats d'investigation de cette étude montrent que le design des deux cathodes magnétrons du système de pulvérisation bi-cathodes est admissible. Les lignes de champs sont confinés autour des deux cathodes, le cas de la cathode avec la cible de titane est bien apparent et accentué par rapport au cas de la cathode avec la cible en nickel, et prouve que ces derniers sont équilibrés. L'effet des matériaux adjacents n'a pas manifesté.

Le modèle obtenu par Maxwell-Ansys peut être servir à approfondir davantage l'étude et d'arriver à une conception plus meilleure. La validation de ce modèle peut se faire par des mesures expérimentales sur le bâti dans le futur.

Conclusion général et perspectives

Comme perspective, il est très opportun de continuer cette étude en développant un modèle 3D en utilisant le logiciel CST studio pour pouvoir simuler le système en charge.

Ce projet de fin d'étude a eu un impact positif d'une part vue les connaissances acquis dans les différents domaines touchés (conception des composants magnétiques, étude et simulation par logiciel, le logiciel Ansys Maxwell utilisé,...) et d'autre part les résultats de l'étude obtenu qui seront utilisé dans le système de pulvérisation qui est fonctionnel.



BIBLIOGRAPHIE



Bibliographie

- [1] **Boudissa Rabah.** Etude du système NI SI se forme de couches minces formes pour évaporation par effet joule (06.06.2011)
- [2] **Yan-mei Jian.** Pulvérisation cathodique assistée par ordinateur (04 décembre 1992)
- [3] **Rafik Nouar.** Etude et réalisation de couches minces `a caractère magnétique par pulvérisation cathodique magnétron. Application pour des capteurs de type GMI. (18/11/2009)
- [4] **Dhafira BENZEGGOUTA.** Etude de procédés de dépôts de films minces par décharge magnétron fortement ionisée.
- [5] **SABRI Naima Ghoutia.** Etude de la Propagation d'une Onde Electromagnétique dans un Plasma de Tokamak –Interaction Onde-Plasma. (2010)
- [6] **Nicolas FAURE.** Modélisation électromagnétique en présence de charges d'espace. Application à l'étude de tubes électroniques de type magnétron. (30 août 2006)
- [7] **HAMEL Mezian.** Etude et réalisation d'un dispositif de détection de défaut par méthode électromagnétique (18.10.2012)
- [8] **LARABI ZINA.** Modélisation 3d d'un dispositif MEMS application a une pompe sanguine. (03/07/2013).
- [9] Annemie Bogaerts, Evi Bultinck , Ivan Kolev , Laurent Schwaederle ,Koen Van Aeken , Guy Buyle and Diederik Depla .Computer modelling of magnetron discharges (20 May 2009).
- [10] Asim Aijaz.Design and Characterization of a Synchronous Co-axial Double Magnetron Sputtering System (2009).
- [11] P.J. Kelly*, R.D. Arnell .Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications (20 September 1999)

- [12] M.Salahshoor, K.Hamzeh and A. A. Zavarian .Design of Magnetic Structure of a Magnetron Sputtering Cathode by Magnetic Field Simulation and Investigation of Deposition Rate Vacuum Technology Research Group, ACECR-Sharif University Branch, Tehran.
- [13] Ansys Maxwell training manual V16 (21 May 2013).
- [14] Alexandre MORILHAT. Synthèse de couches minces résistives par pulvérisation cathodique magnétron pour l'élaboration de résistance étalons calculable en courant alternatif . 11 Janvier 2011