



**HAL**  
open science

# Calcul Analytique du Champ Magnétique Créé par Deux Aimants Permanents Concentriques Utilisé dans les Décharges Plasmas Magnétrons

Djilali Benyoucef, Bachir Belmadani, Mohammed Yousfi

► **To cite this version:**

Djilali Benyoucef, Bachir Belmadani, Mohammed Yousfi. Calcul Analytique du Champ Magnétique Créé par Deux Aimants Permanents Concentriques Utilisé dans les Décharges Plasmas Magnétrons. 1er Séminaire Nationale sur le génie Electrique Appliqué aux énergies renouvelables, Jan 2010, Chlef, Algérie. hal-03983785

**HAL Id: hal-03983785**

**<https://hal.science/hal-03983785>**

Submitted on 11 Feb 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

# Calcul Analytique du Champ Magnétique Créé par Deux Aimants Permanents Concentriques Utilisé dans les Décharges Plasmas Magnétrons

D.Benyoucef<sup>#\*</sup>, B.Belmadani<sup>\*</sup>, M.Yousfi<sup>#</sup>

<sup>#</sup>Laboratoire de Laplace, Toulouse, France

<sup>\*</sup>Université de Chlef,

Ben\_plasma@yahoo.fr

**Résumé** — Dans ce travail, on présente une méthode analytique pour le calcul du champ magnétique créé par deux aimants permanents sous forme d'anneaux concentriques utilisés pour les décharges magnétrons, le calcul est basé sur l'approche de coulomb.

**Mots clés** — permanent magnet, coulomb method, complete elliptic integral

## I. INTRODUCTION

Les décharges magnétrons sont notamment utilisées pour le dépôt de couches minces métalliques ou isolantes pour faire des nano-composants utilisés dans le domaine de la micro-électronique. Les références [1-6] sont des exemples de travaux théoriques et expérimentaux réalisés dans ce domaine. Dans les réacteurs magnétrons l'aimant permanent est placé à côté de la surface cathodique dans le but de faire séjourner les électrons plus longtemps dans le réacteur plasma et aussi de les confiner avant qu'ils ne soient collectés ou qu'ils ne soient recombinaison aux électrodes. Ce phénomène permet d'augmenter la densité du plasma [2] qui serait beaucoup plus basses en l'absence de champ magnétique en raison des densités de gaz très faibles (typiquement quelques milli Torr i.e. de 0.1 à 1 Pa [3]). Dans ces conditions, les ions générés dans le plasma participent très efficacement à la pulvérisation des cibles cathodiques créant ainsi dans la phase gazeuse les précurseurs nécessaires aux dépôts de films minces sur un substrat placé sur l'électrode anodique. L'optimisation d'un tel dépôt peut être effectuée à l'aide d'outils de diagnostics expérimentaux complétés par des outils de modélisation de la dynamique de la décharge et de la cinétique du plasma hors équilibre ainsi formé. De tels modèles nécessitent absolument la connaissance a priori du champ magnétique régnant au sein du réacteur plasma. C'est pourquoi le but de cette communication est de proposer un modèle analytique de calcul du champ magnétique créé par deux aimants permanents concentriques pour être utilisé dans le futur dans un modèle particulière de type PIC MC pour la simulation d'un réacteur magnétron.

Il existe plusieurs formes des aimants permanents, mais en pratique on utilise généralement des aimants circulaires ou sous forme d'anneaux concentriques. Plusieurs approches

analytiques et numériques ont été faites pour le calcul de champ magnétique créée par les aimants [7-11]. L'objectif de notre travail est de calculer le champ magnétique axial et radial dans le volume de décharge créé par deux aimants permanents sous forme d'anneaux concentriques où l'aimantation est axiale. Le champ magnétique créé par chaque aimant est basé sur le calcul des intégrales elliptiques complètes des premier, deuxième et troisième ordres. Puis, on utilise la méthode de superposition pour calculer le champ magnétique total. La Fig.1 montre la configuration des aimants permanents et le domaine de calcul du champ magnétique. Le domaine du calcul est défini par le volume du réacteur constitué par deux électrodes parallèles et circulaire de rayon  $R$  distant de  $D$ , la distance entre la cathode et les aimants permanents est  $h$  et les aimants ont une amplitude  $H$

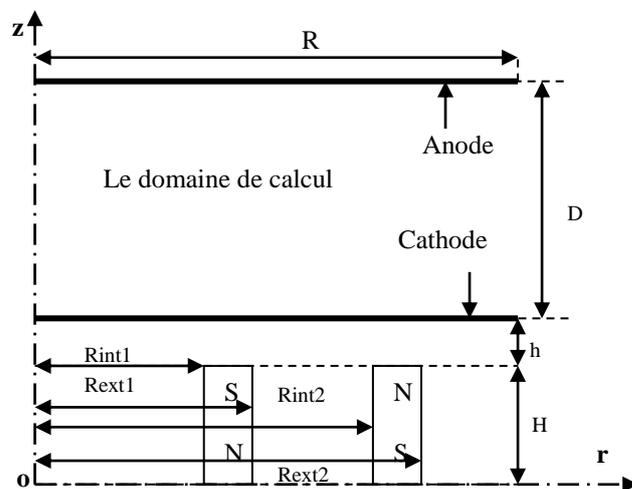


Fig.1 schéma de la configuration des aimants et le domaine de calcul de champ magnétique

## II. EXPRESSIONS DE BASE DE CALCUL ANALYTIQUE

Le calcul du champ magnétique créé par un aimant permanent peut être obtenu par l'utilisation de la méthode

Coulomb [8], [11], dans le cas d'une aimantation axiale  $\sigma$  (voir fig.2), ce champ magnétique au point  $M$  de coordonnées  $(z, r)$  quelconques crée par la surface haute et basse successivement est donné par les expressions suivantes :

$$\begin{aligned}\vec{H}^+(r, z) &= \frac{\sigma}{4\pi\mu_0} \cdot \int_{r_1=R_{\text{int}}}^{r_1=R_{\text{ext}}} \int_{\theta=0}^{\theta=2\pi} \frac{\vec{P}_1 + \vec{M}}{|\vec{P}_1 + \vec{M}|^3} \cdot r_1 \cdot dr_1 \cdot d\theta \\ \vec{H}^-(r, z) &= \frac{-\sigma}{4\pi\mu_0} \cdot \int_{r_1=R_{\text{int}}}^{r_1=R_{\text{ext}}} \int_{\theta=0}^{\theta=2\pi} \frac{\vec{P}_1 - \vec{M}}{|\vec{P}_1 - \vec{M}|^3} \cdot r_1 \cdot dr_1 \cdot d\theta\end{aligned}\quad (1)$$

$$\vec{H}(r, z) = \vec{H}^+(r, z) + \vec{H}^-(r, z)$$

$P_1(r_1, \theta)$ : point située sur la surface basse ou haute de l'aimant permanent définie par sa position radiale  $r_1$  et et l'angle polaire  $\theta$ .

Où :

$$\vec{P}_1 + \vec{M} = (r - r_1 \cos \theta) \cdot \vec{i}_r - r_1 \sin \theta \vec{i}_\theta + (z - H) \vec{i}_z$$

$$\vec{P}_1 - \vec{M} = (r - r_1 \cos \theta) \cdot \vec{i}_r - r_1 \sin \theta \vec{i}_\theta + (z + H) \vec{i}_z$$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H/m}$  : représente la perméabilité du vide,

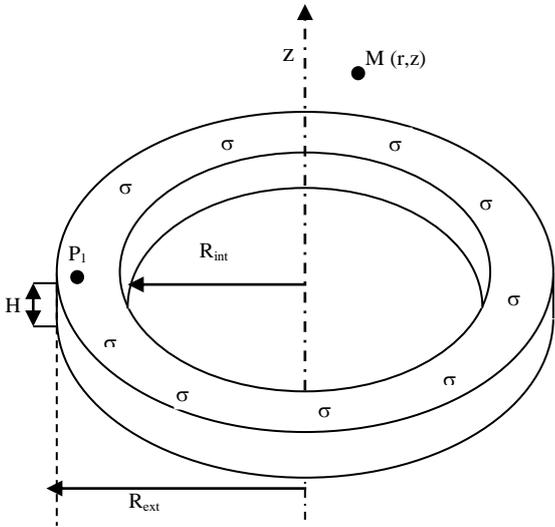


Fig.2 aimant permanent sous forme d'anneau avec aimantation axiale

### III. METHODE DE CALCUL

Avec changement de variable dans les équations (1)  $\theta = \pi - 2\varphi$ ,  $r_1 = R_{\text{int}}$ ,  $r_2 = R_{\text{ext}}$  on obtient les relations suivantes :

$$\vec{H}_r^+(r, z) = \frac{\sigma}{\pi\mu_0} \cdot \sum_1^2 (-1)^{n-1} \frac{1}{k_n^+} \sqrt{\frac{r_n}{r}} \left[ E(k_n^+) - \left(1 - \frac{k_n^{+2}}{2}\right) \cdot K(k_n^+) \right]$$

$$\vec{H}_r^-(r, z) = \frac{-\sigma}{\pi\mu_0} \cdot \sum_1^2 (-1)^{n-1} \frac{1}{k_n^-} \sqrt{\frac{r_n}{r}} \left[ E(k_n^-) - \left(1 - \frac{k_n^{-2}}{2}\right) \cdot K(k_n^-) \right]$$

$$\vec{H}_z^+(r, z) = \frac{\sigma}{4\pi\mu_0(z-H)}$$

$$\sum_1^2 (-1)^{n-1} \frac{k_n^+}{\sqrt{r \cdot r_n}} \left[ (\ell^+ - r) \cdot (\ell^+ - r_n) \Pi(h_1^+, k_n^+) + (\ell^+ + r) \cdot (\ell^+ + r_n) \Pi(h_2^+, k_n^+) \right]$$

$$\vec{H}_z^-(r, z) = \frac{-\sigma}{4\pi\mu_0(z+H)}$$

$$\sum_1^2 (-1)^{n-1} \frac{k_n^-}{\sqrt{r \cdot r_n}} \left[ (\ell^- - r) \cdot (\ell^- - r_n) \Pi(h_1^-, k_n^-) + (\ell^- + r) \cdot (\ell^- + r_n) \Pi(h_2^-, k_n^-) \right]$$

$$\ell^+ = \sqrt{r^2 + (z-H)^2} \quad ; \quad \ell^- = \sqrt{r^2 + z^2} ;$$

$$k_n^+ = \sqrt{\frac{4 \cdot r \cdot r_n}{(r+r_n)^2 + (z-H)^2}} \quad ; \quad k_n^- = \sqrt{\frac{4 \cdot r \cdot r_n}{(r+r_n)^2 + z^2}}$$

$$h_1^+ = \frac{2 \cdot r}{r + \sqrt{r^2 + (z-H)^2}} \quad ; \quad h_1^- = \frac{2 \cdot r}{r + \sqrt{r^2 + z^2}}$$

$$h_2^+ = \frac{2 \cdot r}{r - \sqrt{r^2 + (z-H)^2}} \quad ; \quad h_2^- = \frac{2 \cdot r}{r - \sqrt{r^2 + z^2}}$$

$K(k)$ ,  $E(k)$  et  $\Pi(h, k)$  sont respectivement les intégrales elliptiques complètes des premier, deuxième et troisième ordres [12,14]. La composante  $H_r^+$  à deux points singulier pour  $k_n^+=1$  ( $z = H$ ,  $r = r_n$ ,  $n = 1$  ou  $2$ ) et la composante radiale du champ magnétique soit  $-\infty$  et  $+\infty$ , la composante axiale du champ magnétique à aussi se point de singulier pour  $k_n^+=1$  ( $z = H$ ,  $r = r_n$ ,  $n = 1$  ou  $2$ ), en utilisant la règle de l'Hospital (*Bernoulli*) on obtient  $H_z^+ = 0$  quand  $k_n^+=1$ , dans notre domaine de calcul tous les point sont réguliers.

### IV. RESULTATS DE SIMULATION

Dans ce qui suit on montre les résultats obtenus pour chaque aimant permanent, puis on montre les résultats de calcul obtenus par la superposition des deux aimants permanents. Les dimensions de notre géométrie sont  $H = 2$  cm,  $h = 0.5$  cm,  $R = 8$  cm,  $D = 2.5$  cm. L'aimantation est considérée constante  $\sigma = 100$  Gauss pour l'aimant extérieur et  $\sigma = -100$  Gauss pour l'aimant intérieur. Fig.3 (a) et (b) sont respectivement la composante axiale et radiale du champ magnétique crée par l'aimant intérieur avec  $R_{\text{int1}} = 2.25$  cm,  $R_{\text{ext1}} = 2.75$  cm. Dans la fig.4 (a) et (b) on montre respectivement le champ magnétique axial et radial créé par

l'aimant extérieur où  $R_{int2} = 4.75$  cm,  $R_{ext2} = 5.25$  cm. Le champ magnétique résultant de ces deux aimants est illustré dans la fig.5 (a) et (b) où le champ magnétique est presque radial entre les deux aimants fig.5 (a). Dans le cas des réacteurs magnétrons, cette zone est intéressante pour piéger les électrons afin d'augmenter l'efficacité d'ionisation du gaz et de créer des ions énergétiques dans la zone cathodique avec une meilleure capacité de pulvérisation de la cible cathodique.

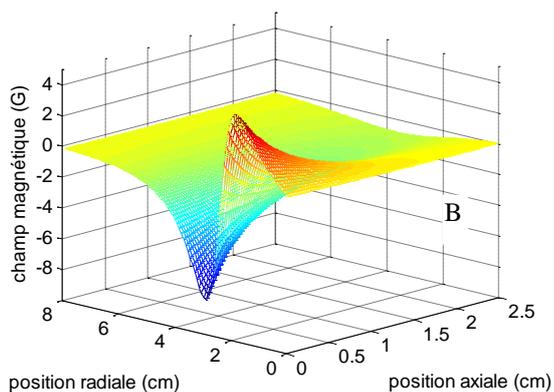
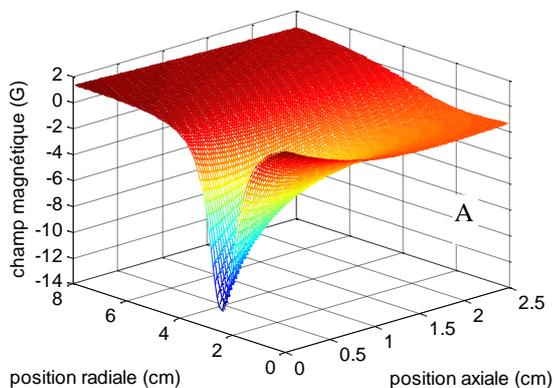


Fig.3 Variation spatiale du champ magnétique créé par l'aimant intérieur (a) : composante axiale, (B) : composante radiale

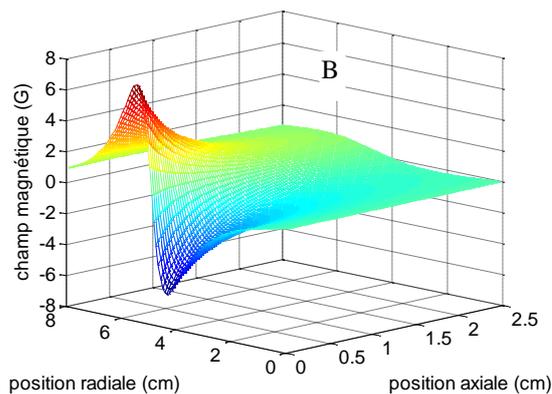
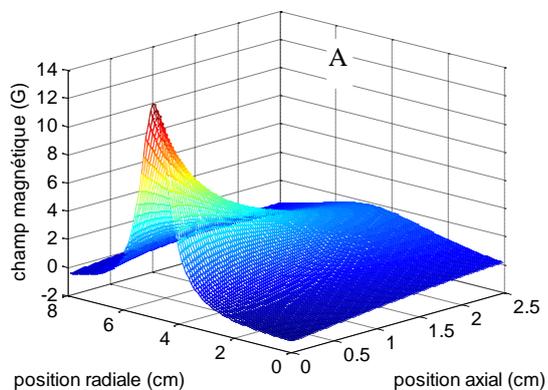


Fig.4 Variation spatiale du champ magnétique créé par l'aimant extérieur (A) : composante axiale, (B) : composante radiale

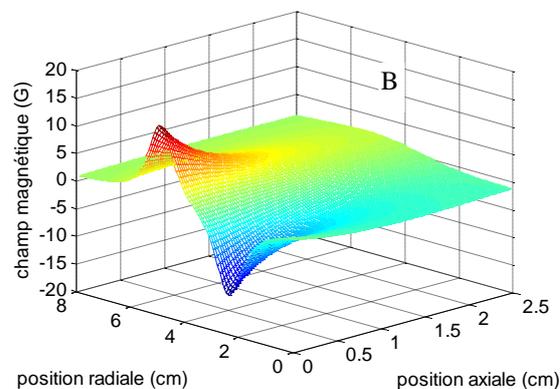
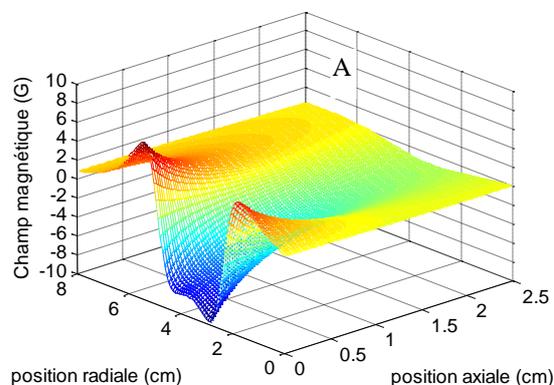


Fig.5 Variation spatiale du champ magnétique créé par les deux aimants (A) : composante axiale, (B) : composante radiale

## V. CONCLUSION

Dans cet article on a présenté les expressions analytiques pour le calcul des composantes de champ magnétique créé par

un ou plusieurs aimants permanents concentriques avec aimantations axiale. Ces expressions valables pour calculer le champ magnétique pour n'importe quel point régulier dans l'espace. Ce type de calcul tout en étant simple est plus rapide en comparaison des calculs numériques de champ magnétique habituel.

#### REFERENCES

- [1] [S. Yonemura, K. Nanbu, "self-consistent particle-in-cell/ Monte Carlo simulation of RF magnetron discharges of oxygen / argon mixture: effect of partial pressure ratio", \*IEEE, Trans. Plas. Sci.\*, vol. 31, N. 4, pp. 471-487, 2003.](#)
- [2] [S. Yonemura, K. Nanbu, "increase of Ar<sup>+</sup> ion density in RF magnetron discharges caused by the addition of a small amount of oxygen", \*IEEE, Trans. Plas. Sci.\*, vol. 33, N. 2, pp. 350-351, 2005.](#)
- [3] [E. Bultin, I. Kolev, A. Bogaerts, D. Depla, "the importance of an external circuit in a particle-in-cell/ Monte Carlo collisions model for a direct current planar magnetron", \*J. Appl. Phys.\*, 103, pp. 013309-1-013309-9, 2008.](#)
- [4] [K.G. Kostov, J. Barroso, "Numerical simulation of magnetic field-Enhanced plasma immersion ion implantation in cylindrical geometry", \*IEEE, Trans. Plas. Sci.\*, vol. 34, N. 4, pp. 1227-1235, 2006.](#)
- [5] [J. Lopez, W.D. Zhu, A. Freilich, A. Belkind, K. Becker, "optical emission from pulsed DC magnetron sputtering plasmas", \*IEEE, Trans. Plas. Sci.\*, vol. 33, N. 2, pp. 348-349, 2005.](#)
- [6] [O. Yamazaki, K. Iyanagi, S. Takagi, "Modeling of Cu transport sputtering using Monte Carlo simulation", \*Jpn. J. Appl. Phys.\* Vol. 41, N. 3A, pp. 1230-1234, 2002.](#)
- [7] [S. I. Babic, "improvement in the analytical calculation of the magnet rings", \*Progress In Electromagnetic Research C\*, vol. 5, pp. 71-82, 2008.](#)
- [8] [R. Ravaud, G. Lemarquand, V. Lemarquand, C. Depollier, "analytical calculation of the magnetic field created by permanent rings", \*IEEE, Trans. Magn.\*, vol. 44, N. 8, pp. 1982-1989, 2008.](#)
- [9] [R. Ravaud, G. Lemarquand, V. Lemarquand, C. Depollier, "magnetic field produced by tile permanent magnet whose polarization is both uniform and tangential", \*Progress In Electromagnetic Research B\*, vol. 13, pp. 1-20, 2009.](#)
- [10] [R. Ravaud, G. Lemarquand, V. Lemarquand, C. Depollier, "Discussion about the analytical calculation of the magnetic field created by permanent magnets", \*Progress In Electromagnetic Research B\*, vol. 11, pp. 281-297, 2009.](#)
- [11] [R. Ravaud, G. Lemarquand, "comparison of the Coulombian and amperian current models for calculating the magnetic field produced by radially magnetized arc-shaped permanent magnets", \*Progress In Electromagnetic Research, PIER 95\*, pp. 309-327, 2009.](#)
- [12] [B.C. Carlson, "Numerical computation of real and complex elliptic integrals", \*Numerical Algorithms\*, vol. 10, pp. 13-26, 1995.](#)
- [13] M. Abramowitz, I. A. Stegun, "Handbook of mathematical functions, National bureau of standard applied mathematics", Series 55, Washington DC, 1972,
- [14] I. S. Gradshteyn, I. M. Ryzhik, "Table of integrals, Series and products", Dover, New york, 1972,