

# Simulation numérique du résonateur R.M.N en trois dimensions

A. Iles, D. Chogueur et F. Lallam  
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR;  
UNIVERSITE A BELKAID - TLEMCCEN  
B.P 230, TLEMCCEN (13 000), ALGERIE  
E\_mail : Ilesadz @ yahoo.fr

**Résumé :** Le sujet de ce travail a été de modéliser numériquement le comportement d'une « sonde » radiofréquence pour la résonance magnétique nucléaire. La sonde est un circuit résonant constitué d'un élément selfique : ligne en anneau fendu. L'élément selfique que nous appellerons, peut être abusivement résonateur joue un rôle capital au niveau de la sonde. Ce résonateur doit avoir un coefficient de qualité aussi grand que possible.

**Mots clef :** RMN, Sonde, Résonateur, impédance caractéristique, coefficient de qualité.

## I. Introduction

De jour en jour, les expériences de résonance magnétique nucléaire (RMN) se multiplient et se diversifient. Après les expériences sur le proton, le carbone13..., en simple irradiation, nous assistons actuellement à l'observation d'une multitude de noyaux en spectroscopie multi-impulsionnelle, l'échantillon à analyser est soumis à de très haute température, il peut être solide ou liquide.... La technologie est donc en perpétuelle sophistication. Cela concerne notamment la configuration géométrique des résonateurs.

Dans ce travail, notre objectif est de simuler numériquement le résonateur en anneau fendu sous écran en simple irradiation. Ce résonateur est un composant d'une importance capitale au sein de la sonde. Il doit avoir un coefficient de qualité aussi grand que possible. Généralement, il est associé à d'autres composants dont le rôle est d'assurer l'accord et l'adaptation avec les autres organes du spectromètre. La sonde joue un rôle pendant la période d'émission. L'émission est une étape qui consiste à exciter ou perturber l'échantillon à analyser par résonance magnétique nucléaire (R.M.N). La sonde intervient également en phase de réception. La réception est une autre étape de l'expérience qui consiste à recueillir la réponse du système perturbé après coupure de l'excitation. Nous comprenons bien la nécessité de l'élément selfique qui constituera une véritable interface. [1] et [2] Il est nécessaire donc de décrire formellement ce résonateur et d'étudier ses caractéristiques.

## II. Description

Le résonateur en anneau fendu blindé ou split-ring resonator est un dispositif constitué de deux cylindres concentriques. Le cylindre extérieur est

porté au potentiel nul. Il joue le rôle de blindage, son rôle consiste à annuler toute interférence entre l'échantillon et les autres parties du spectromètre. Le cylindre intérieur est porté à un potentiel non nul, il joue le rôle d'élément selfique. L'ensemble des deux conducteurs peut être considéré comme une ligne de transmission, son schéma est le suivant : [3]

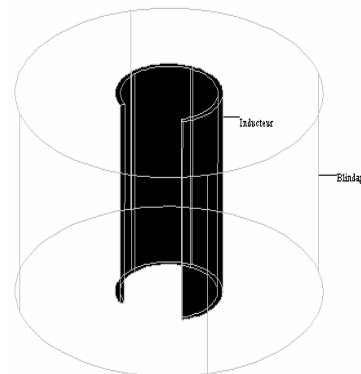


Fig. 1. Inducteur en anneau fendu sous écran.

## III. Théorie : [4]

Partant des équations de Maxwell en régime harmonique. Elles prennent la forme suivante :

$$\text{rot} \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \quad (1)$$

$$\text{rot} \vec{H} = j\omega\epsilon\vec{E} \quad (2)$$

$$\text{div} \vec{D} = 0 \quad (3)$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (4)$$

Où

$\vec{E}$  est le champ électrique.

$\vec{H}$  est le champ magnétique.

$\vec{D}$  est la densité électrique.  
 $\vec{B}$  est la densité magnétique.  
 $\omega$  est la fréquence angulaire, elle est égal à  $2\pi f$ .  
 $\varepsilon$  est la permittivité.  
 $\mu$  est la perméabilité.

On peut établir les relations fondamentales qui nous permettent d'aboutir à l'équation suivante : [5], [6] et [7]

$$\nabla \wedge \left( \frac{1}{\mu} \nabla \wedge \vec{E}(x,y,z) \right) - K_0^2 \varepsilon_r \vec{E}(x,y,z) = 0. \quad (5)$$

Où

$K_0$  est la constante de propagation, elle est égal à  $\omega \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$ .

$\varepsilon_r$  est la permittivité relative.

$\mu_r$  est la perméabilité relative.

Les conditions aux limites utilisées sont :

$n \wedge \vec{E} = 0$  pour un conducteur électrique parfait.

$n \wedge D \wedge \vec{E} = 0$  pour un conducteur magnétique parfait.

La puissance P et le courant I sont donnés par:

$$P = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \oint_s \vec{E} \wedge \vec{H}^* ds \quad (6)$$

$$I = \oint_c \vec{H} \cdot d\vec{l} \quad (7)$$

Où s est une section droite du résonateur et c la courbe fermé du conducteur.

le conducteur considéré ici est un conducteur flottant. Le courant se circule à travers la courbe c.

Nous pouvons déterminer l'impédance caractéristique comme suis :

$$Z_c = \frac{P}{I^*} \quad (8)$$

Où  $I^*$  est le conjugué du courant.

#### IV. Résolution numérique

En effet, le problème est de déterminer le champ électrique E en tout point du domaine formé par plusieurs morceaux: L'intérieur de l'anneau, la fente et l'espace inter conducteur. La résolution analytique du problème n'est pas possible. Seule une solution numérique pouvait être envisagée. Nous proposons dans ce travail la méthode des éléments finis pour résoudre le problème.

Notre étude, consiste à trouver les caractéristiques électromagnétiques du résonateur en anneau fendu. Le logiciel est capable de nous donner toutes les informations sur ces caractéristiques telles que l'inductance, la capacité, la résistance... Nous pouvons alors localisé notre travail sur les variations de l'impédance caractéristique et du coefficient de qualité.

Nous avons considéré une structure ayant les dimensions suivantes :

Diamètre du blindage : DB=160 mm

Diamètre du résonateur : DR= 20 mm

La longueur du résonateur : L= 80 mm

L'ouverture :  $\theta = 80^\circ$

L'épaisseur : epr=1 mm

Un diélectrique : l'air  $\varepsilon_r = \mu_r = 1$ .

La fréquence de travail : f=100 Mhz.

Pour simuler numériquement l'anneau fendu avec son écran nous commençons par l'étape de maillage de la structure, la cartographie du champ magnétique et celle du champ électrique, enfin le calcul des paramètres.

La cartographie des champs électrique et magnétique est donné par la figure (2) et (3) respectivement.

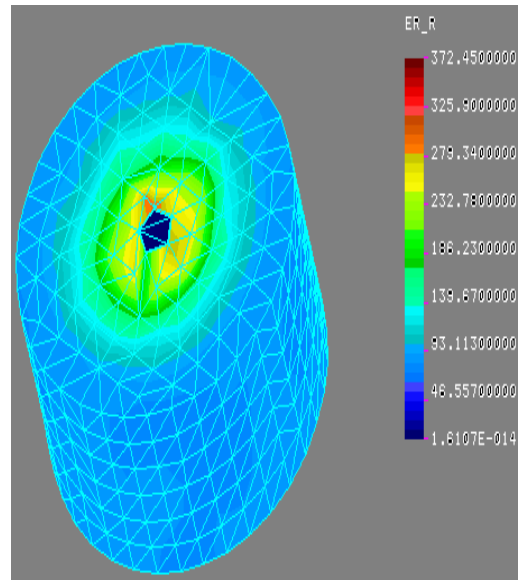


Fig. 2. Distribution du champ électrique

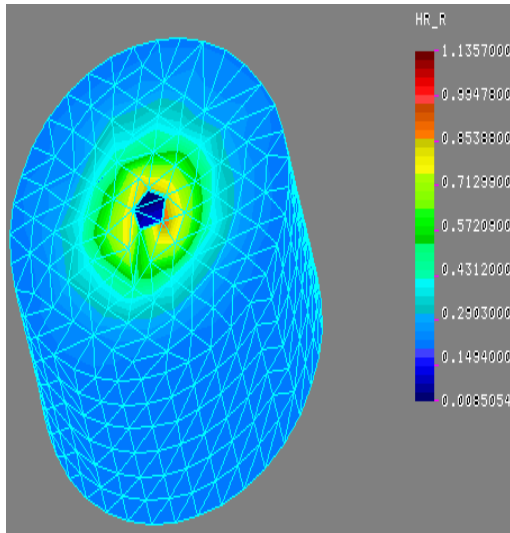


Fig. 3. Distribution du champ magnétique.

Les figures (4) et (5) montre la distribution des champs à l'intérieur du résonateur:

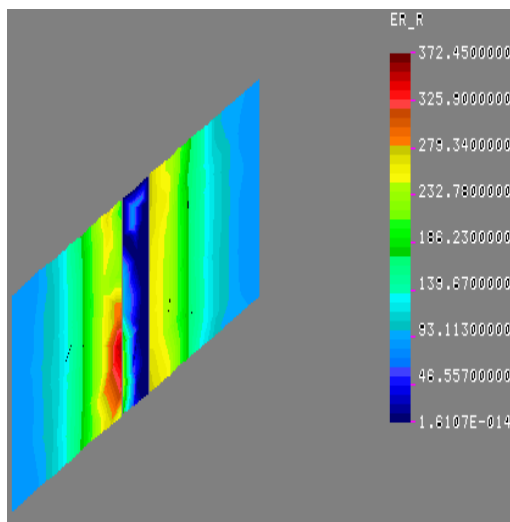


Fig. 4. Distribution du champ électrique après une coupure longitudinal du résonateur.

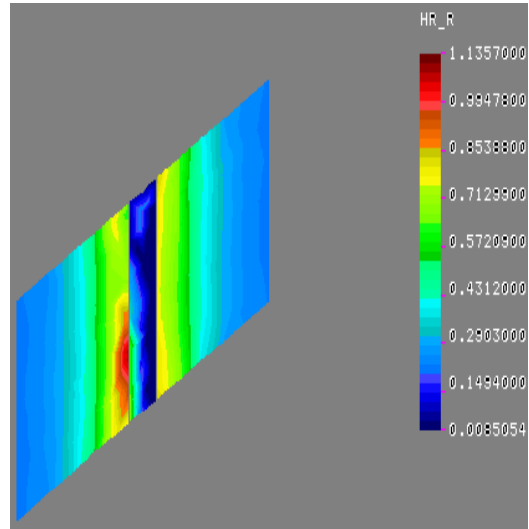


Fig. 5. Distribution du champ magnétique après une coupure longitudinal du résonateur.

Pour cette même configuration géométrique, nous avons étudié la dépendance de l'impédance caractéristique et de l'ouverture  $\theta$ . Cette dépendance est illustrée sur la figure suivante

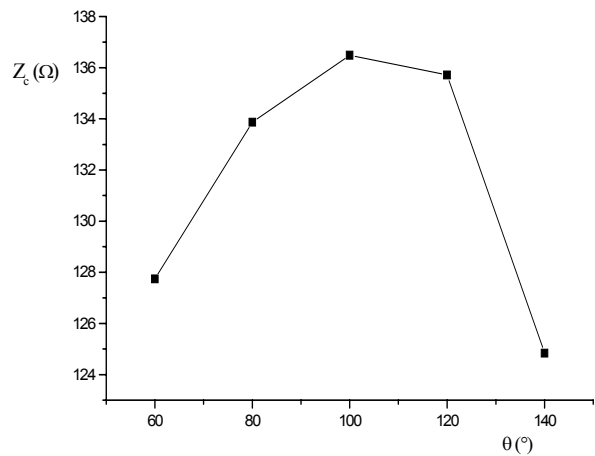


Fig. 6. L'influence de l'ouverture sur l'impédance caractéristique.

Nous remarquons que la dépendance  $Z_c = f(\theta)$  passe par un maximum où l'anneau fendu se comporte comme un élément inductif. Plus l'angle d'ouverture augmente plus l'anneau fendu est capacitif. Cela est justifié parfaitement en pratique par le fait d'augmenter l'ouverture se traduit par le renforcement du caractère capacitif de l'anneau fendu d'où une diminution de l'impédance caractéristique.

Nous nous sommes intéressés également à la dépendance du coefficient de qualité et de l'angle  $\theta$ .

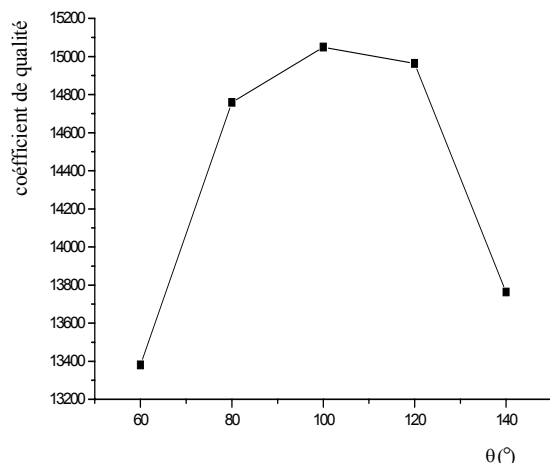


Fig. 7. L'influence de l'ouverture sur le coefficient de qualité.

Le graphe de la figure (7) nous montre que cette dépendance passe aussi par un maximum  $\theta = 100^\circ$ . Ce passage par un maximum s'explique par deux effets qui s'opposent : l'effet de diminuer l'angle d'ouverture augmente le caractère selfique mais augmente la résistance de la nappe de courant.

Il est également intéressant d'étudier l'influence du rapport  $db/dr$  et de l'épaisseur sur le coefficient de qualité.

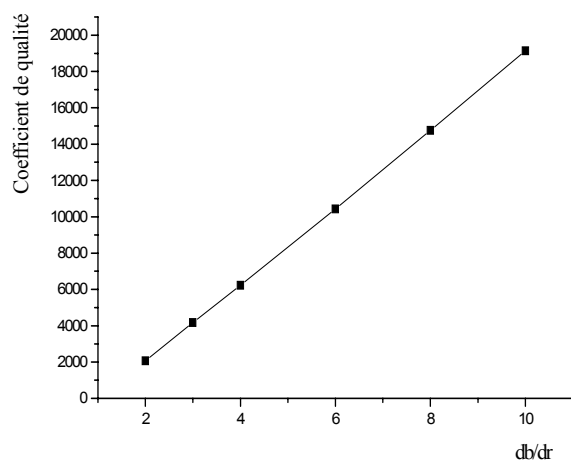


Fig. 8. L'influence de  $db/dr$  sur le coefficient de qualité

En effet, la figure (8) montre que le coefficient de qualité à vide croît avec l'éloignement du blindage, nous agissons alors sur le couplage électrique de l'armature interne de l'anneau fendu et de son écran. Si le couplage est fort la perte d'énergie magnétique se fait au profit de l'énergie électrique. Cela se traduit par une baisse du coefficient de qualité.

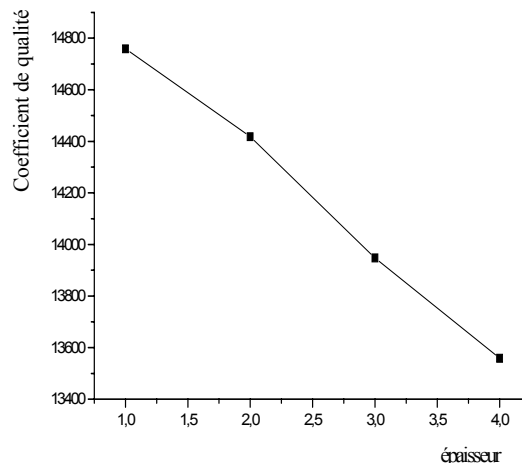


Fig. 9. L'influence de l'épaisseur sur le coefficient de qualité.

Pour une bonne expérience RMN, il faut choisir un résonateur d'épaisseur faible.

## V. Conclusion

Notre contribution se résume à décrire formellement une sonde à base d'une ligne en anneau fendu. Il faut donc calculer le champ magnétique généré par cette ligne.

En établissant la configuration géométrique du résonateur en anneau fendu blindé en 3D et le matériau qu'il le constitue ; pour une fréquence de travail fixée selon les conditions expérimentales de l'analyse par résonance magnétique nucléaire, le logiciel nous donne les différentes caractéristiques électromagnétiques du résonateur.

Pour avoir un coefficient de qualité très élevé lors d'une expérience RMN, il faut choisir un résonateur en anneau fendu avec :

- Un angle d'ouverture de  $100^\circ$  environ
- Un blindage loin du résonateur ( $db \approx 8dr$ )
- Une épaisseur faible.

## Références

- [1] M. Khelif, "Simulation numérique des résonateurs RF et applications en RMN à des études de très haute température," Thèse de doctorat, UPMC Paris Déc. 1991.
- [2] N. Ben ahmed, "Simulation numérique du résonateur à bandes symétriques et application à la résonance magnétique nucléaire," Thèse de magister 1997.
- [3] W.N. Hardy and L.A. Whitehead Rev. Sci. Instrum. 52 (2) (1981)
- [4] O.P.Gandhi, Microwave Engineering and application, Pergamon Press, 1987

[5] Daniel R. Lynch and Keith D. Paulsen, "Origin of vector parasites in numerical Maxwell solutions," IEEE Trans. Microwave Theory Tech. March 1991

[6] M. Koshiba, K. Hayata and M. Suzuki, "Finite element formulation in terms of the electric field vector for electromagnetic waveguide problems," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-30, pp.900-905, 1985.

[7] A. Taflovit and M.E. Brodwin, "Numerical solution of steady-state electromagnetic scattering problems using the time dependent Maxwell's equations," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-23, pp.623-630, 1975.