

Démonstration d'une Antenne à Polarisation Circulaire utilisant un Matériau Ferrite Auto-Polarisé

V. Muzzupapa¹, T. Monediere¹, J. Fouany², H. Parvery², A. Hoez³, J.-L. Mattei⁴, A. Chevalier⁴, E. Arnaud¹, C. Guines¹, J. Muzzupapa, L. Huitema¹

¹ Xlim, Limoges, France ; ² CISTEME, France, ³ HIT Mag, Brest, France ; ⁴ Lab-STICC, Brest, France
vincent.muzzupapa@xlim.fr

Résumé – Ces travaux présentent le développement d'une antenne patch circulaire exploitant les propriétés d'anisotropie d'un substrat d'hexaferrite de Baryum auto-polarisé. Ce comportement gyrotropique permet d'obtenir un mode résonant et rayonnant de la polarisation circulaire droite sur la bande 12.8-13 GHz avec un taux d'ellipticité minimal de 0.8 dB. Le substrat qualifié d'« auto-polarisé » conserve un fort état d'aimantation rémanente, ce qui permet de s'affranchir de l'utilisation d'aimants permanents. Combinée à une perméabilité effective supérieure à l'unité ($\mu_{r_{eff}} > 1$) et à une permittivité élevée ($\epsilon_r = 16$) dans la cavité, cette configuration permet de réduire significativement l'encombrement du dispositif.

1. Introduction

La polarisation circulaire suscite un fort intérêt car elle réduit les problèmes de désalignement entre antennes et améliore la transmission dans des environnements complexes (milieux à trajets multiples ou dépolarisants en liaison terre-espace). La polarisation circulaire est en général obtenue en excitant deux modes orthogonaux et déphasés de 90°. Une solution consiste à utiliser plusieurs alimentations [1], mais cela alourdit le système (diviseurs, déphaseurs, lignes supplémentaires) et accroît les pertes d'insertion. Dans les applications contraintes en encombrement, cette approche devient peu viable. Une autre méthode repose sur la perturbation de la géométrie de l'antenne [2], au prix d'une bande passante réduite et d'une dégradation du diagramme de rayonnement. Afin de combiner polarisation circulaire et compacité tout en utilisant une alimentation unique, une solution innovante consiste à utiliser des matériaux ferrites [3]. En effet, grâce à leur anisotropie et à leur comportement non réciproque intrinsèque, les ferrites peuvent générer, sous l'application d'un champ magnétique continu (DC), des modes à polarisations circulaires (RHCP et LHCP). Ces propriétés ont été exploitées pour le développement de circulateurs [4], d'isolateurs [5] et d'antennes [6]. Cependant, la nécessité de polariser ces ferrites par un champ magnétique DC externe, généralement fourni par des aimants permanents encombrants, limite fortement la compacité du dispositif.

Dans ce papier, une hexaferrite de baryum auto-polarisé (BaM) de type M est intégré pour la première fois dans une structure rayonnante. Ce matériau permet de s'affranchir totalement d'aimants externes, ouvrant la voie à des antennes plus compactes et intégrables. L'un

des défis majeurs est la modélisation précise de ce ferrite, indispensable pour fixer la fréquence de fonctionnement dans une zone où son anisotropie est suffisante sans induire trop de pertes. Nous montrerons également que la cavité ferrite ainsi obtenue présente des résonances faibles, et qu'un autre défi consiste à parvenir à l'exciter efficacement pour en faire une antenne fonctionnelle.

2. Hexaferrite de Baryum BaM de type M

Ce matériau a été développé par le LabSticc [7] pour présenter une aimantation rémanente représentée par le rapport M_r/M_s . L'ensemble des caractéristiques du matériau est présenté dans le Tableau 1.

M_s (G)	M_r (G)	M_r/M_s	ϵ_r	ΔH (Oe)	H_K (Oe)	f_{GMR} (GHz)	a (mm)	h (mm)
3154	1514	0.48	16	500	11661	32.6	3.61	0.2

Tableau 1. Caractéristiques de l'hexaferrite de Barium BaFe₁₁Co_{0.5}Ti_{0.5}O₁₉

Pour un ferrite saturé par un aimant externe, le rapport $M_r/M_s = 1$ et sa perméabilité peut être décrite par le tenseur de Polder [8]. Dans notre cas, le ferrite n'est pas saturé ($M_r/M_s = 0.48$) et le tenseur de Polder n'est plus applicable. Il est remplacé par le tenseur de Green & Sandy [9], adapté à la modélisation de ferrites non saturés ($M_r/M_s < 0.8$), dont les expressions sont présentées ci-dessous :

$$[\mu] = \begin{bmatrix} \mu & -j\kappa & 0 \\ j\kappa & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_z \end{bmatrix} \quad \begin{aligned} \mu &= \mu' - j\mu'' \\ \mu_z &= \mu'_z - j\mu''_z \\ \kappa &= \kappa' - j\kappa'' \end{aligned} \quad (1)$$

$$\mu' = \mu'_0 + (1 - \mu'_0) \left(\frac{M_r}{M_s} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

$$\kappa' = \frac{\gamma 4\pi M_r}{\omega} \quad (3)$$

$$\mu'_z = \mu'_0 \left(1 - \frac{M_r}{M_s} \right)^{\frac{5}{2}} \quad (4)$$

$$\mu'_0 = \frac{2}{3} \left[1 - \left(\frac{\gamma 4\pi M_s}{\omega} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{et} \quad \omega = 2\pi f \quad (5)$$

$$+ \frac{1}{3}$$

Le modèle de Green & Sandy n'offrant pas d'expressions pour les parties imaginaires des éléments du tenseur, ce

sont les pertes (μ'' , μ_z'' , κ'') données par Polder qui sont prises en compte.

3. Conception de l'antenne

Dans un premier temps, une étude analytique de la cavité ferrite seule a été menée afin d'établir un point de comparaison avec les simulations électromagnétiques. Cette analyse repose sur [6], dont les racines de l'équation de propagation permettent d'identifier les modes de la cavité.

$$J'_n(ka) - n \frac{\kappa}{ka\mu} J_n(ka) = 0 \quad (9)$$

$$k = \omega \sqrt{\mu_{eff} \epsilon} \quad \text{et} \quad \mu_{eff} = \frac{\mu^2 - \kappa^2}{\kappa^2} \quad (10)$$

Où J_n est la fonction de Bessel du premier type d'ordre n , J'_n sa dérivée première, k le nombre d'onde et μ_{eff} la perméabilité effective. L'équation (9) est tracée Figure 1 en fonction de M_r/M_s pour les deux modes fondamentaux RHCP et LHCP ($n = \pm 1$).

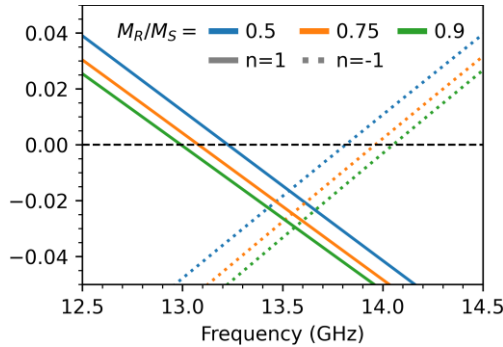


Figure 1. Équation de propagation dans la cavité ferrite en fonction de M_r/M_s pour les modes $n = \pm 1$

L'étude analytique prédit pour $M_r/M_s = 0.5$, les fréquences des modes $n=+1$ (LHCP) et $n=-1$ (RHCP) à 13,21 GHz et 13,8 GHz, soit un écart de 590 MHz. Ces résultats sont comparés à une simulation full-wave du résonateur cylindrique, excité par un port discret. Le ferrite est modélisé par un « full-tensor material » dont les éléments sont calculés selon le modèle de Green & Sandy. L'impédance d'entrée (Figure 2) montre des modes à polarisation circulaire à 12,42 et 12,95 GHz.

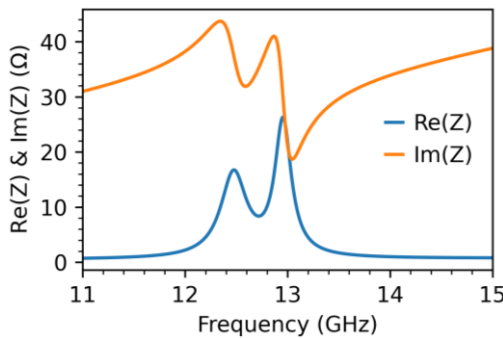


Figure 2. Impédance d'entrée de la cavité ferrite

Bien que légèrement inférieurs aux prédictions analytiques (13,21 et 13,8 GHz), ces résultats sont cohérents, la différence s'expliquant par l'approximation des bords de la cavité comme des murs magnétiques parfaits dans le modèle analytique. L'impédance d'entrée

révèle également que le facteur de qualité des modes est très faible rendant difficile l'adaptation directe sur 50 Ω.

L'architecture proposée (Figure 3) correspond à une antenne patch cylindrique alimentée par couplage. La cavité ferrite cylindrique ($h=200 \mu\text{m}$, $\varnothing=3,61 \text{ mm}$) est placée au-dessus d'une fente de couplage gravée sur le plan de masse d'un substrat d'alumine ($320 \mu\text{m}$). Sur l'autre face, un circuit d'adaptation, composé d'une ligne microstrip terminée par un stub et intégrant un condensateur interdigité, est utilisé pour coupler la cavité. Une transformation guide d'onde coplanaire (CPW) / micro-ruban est insérée à l'entrée pour alimenter le dispositif et permettre sa mesure.

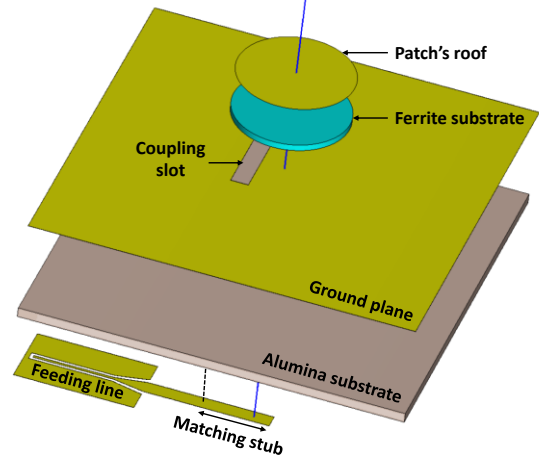


Figure 3. Vue explosée de l'antenne proposée

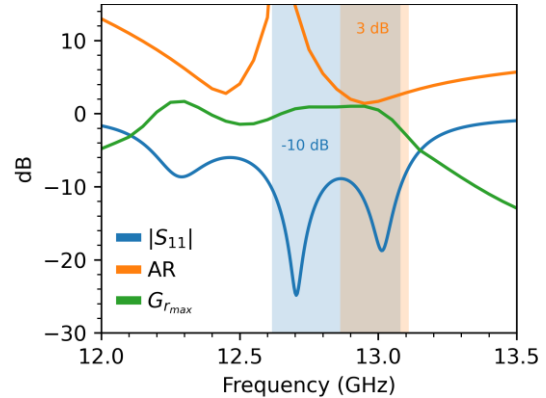


Figure 4. Performances simulées de l'antenne

Les performances simulées sont présentées en Figure 4 : Le circuit d'adaptation permet de faire fonctionner l'antenne sur son mode $n=-1$ (RHCP) avec un taux d'ellipticité (TE) inférieur à 3 dB et un gain réalisé maximal de 1.55 dB.

4. Fabrication de l'antenne

L'antenne a été fabriquée en salle blanche du laboratoire Xlim. Les couches métalliques de Ti/Au ($40 \text{ nm} / 5 \mu\text{m}$) ont été déposées par e-beam PVD puis l'épaisseur d'or a été augmentée par électrolyse. Les motifs (fente, ligne) ont été réalisés par lithographie laser et gravure liquide. L'antenne fabriquée est présentée sur la Figure 5, à la fois nue et montée sur son support en Rohacell, assurant l'alignement du ferrite sur la fente de couplage et son maintien contre le plan de masse.

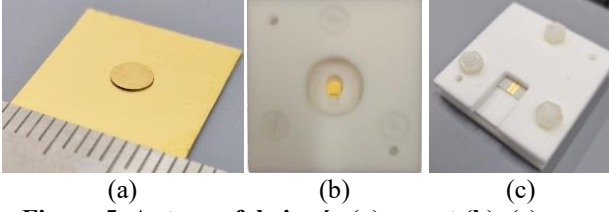


Figure 5. Antenne fabriquée (a) nue et (b), (c) avec son support en Rohacell.

5. Résultats & Discussions :

Les performances de l'antenne ont été évaluées avec un scanner 3D développé à l'institut XLIM, permettant des mesures en sonde GSG en environnement semi-anéchoïque. La Figure 6 présente le paramètre $|S_{11}|$, le TE dans l'axe et le gain réalisé maximum mesurés.

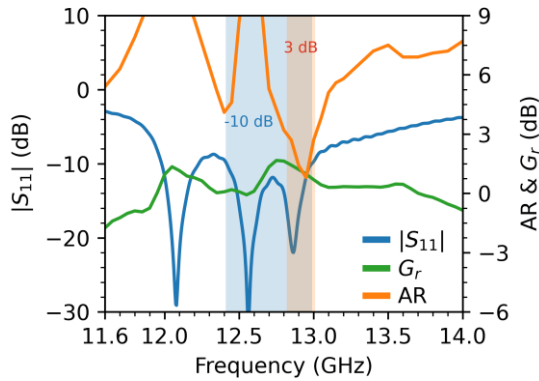


Figure 6. Performances mesurées de l'antenne

Les mesures confirment les résultats des simulations : la bande d'adaptation avec un $|S_{11}| < -10$ dB s'étend de 12,41 GHz à 12,99 GHz, le TE dans l'axe présente une bande à 3 dB de 180 MHz entre 12,82 GHz et 12,99 GHz, avec un minimum de 0,8 dB à 12,95 GHz. La bande passante utile, respectant les deux critères $|S_{11}| < -10$ dB et TE < 3 dB, est donc de 170 MHz, entre 12,82 GHz et 12,99 GHz. Dans cette plage, le gain réalisé maximal varie entre 0,75 dB et 1,55 dB.

Enfin, les gains réalisés droit et gauche mesurés (Figure 7) dans les plans $\varphi=0^\circ$ et $\varphi=90^\circ$ à 12,9 GHz confirment un rayonnement en polarisation circulaire droite. Ces performances valident l'approche et démontrent l'intérêt des ferrites auto-polarisés pour obtenir une polarisation circulaire avec des gains satisfaisants.

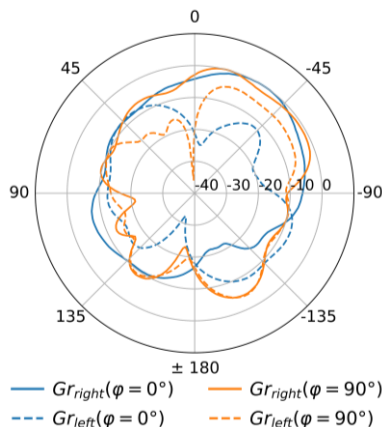


Figure 7. Diagramme de rayonnement mesuré

6. Conclusion

Ce travail présente la première démonstration d'une antenne utilisant un ferrite auto-polarisé pour générer une polarisation circulaire avec une architecture simple et compacte. L'anisotropie intrinsèque du matériau permet d'obtenir la polarisation circulaire sans aimant externe, sans réseau d'alimentation complexe ni géométrie particulière, tout en étant miniature puisque la structure résonante a des dimensions de $\lambda_0/6,4 \times \lambda_0/6,4 \times \lambda_0/117,2$ à 12,9 GHz. Les mesures confirment les simulations : l'adaptation, la polarisation circulaire droite, le gain et le taux d'ellipticité sont en excellent accord, validant le modèle du ferrite. Le prototype fonctionne de 12,82 à 12,99 GHz, avec un TE minimal de 0,8 dB et un gain réalisé supérieur à 0,75 dB, démontrant que la polarisation circulaire peut être générée avec un seul point d'alimentation et sans aimant externe.

7. Remerciements

Ces travaux ont été financés par l'Agence de l'Innovation de Défense (AID) et l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) dans le cadre des projets CONTACT (ANR-20-ASTR-0010) et CAFE (ANR-24-ASTR-0019). Ils ont été menés au sein du laboratoire commun INOGYRO entre la PME Inoveos et les instituts de recherche XLIM et Lab-STICC (<https://inogyro.xlim.fr/>). Tout ou partie des expériences ont été réalisées à la plateforme d'essais PLATINOM d'XLIM, membre du réseau CNRS RF-Net.

Références

- [1] A. H. Mohammed *et al.*, « A Circularly Polarized Microstrip Antenna with Dual Circular Polarization Using a 90° Hybrid Coupler and Proximity-Coupled Feeding for LTE 43 5G Applications », *Applied Sciences*, vol. 14, n° 24, p. 11877, 2024.
- [2] S.-S. Hao *et al.*, « A High-Gain Circularly Polarized Slotted Patch Antenna », *Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 19, n° 6, p. 1022-1026, juin 2020.
- [3] J. Helszajn, *Principles of microwave ferrite engineering*. London, New York: Wiley-Interscience, 1969.
- [4] V. Olivier *et al.*, « Dual-Band Ferrite Circulators Operating on Weak Field Conditions: Design Methodology and Bandwidths' Improvement », *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.*, vol. 68, n° 7, p. 2521-2530, juill. 2020.
- [5] S. Khim, J. L. Valdes, H. Parvery, L. Huitema, et T. Monediere, « Planar Isolator Based on Field Displacement in Ferrite Substrate », in *2024 54th European Microwave Conference (EuMC)*, Paris, France: IEEE, sept. 2024, p. 172-175.
- [6] D. M. Pozar, « Radiation and scattering characteristics of microstrip antennas on normally biased ferrite substrates », *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 40, n° 9, p. 1084-1092, 1992.
- [7] A. Hoëz *et al.*, « New Manufacturing Process for Granular Texture Management in Polycrystalline BaM Hexaferrites through the Goethite Crystallite Laths Aspect Ratio, and a Specialized Law of Approach to the Magnetic Saturation for Partly Polarized Uniaxial Materials », *Magnetochemistry*, vol. 9, n° 1, p. 30, janv. 2023.
- [8] D. Polder, « On the theory of ferromagnetic resonance », *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 40, n° 300, p. 99-115, janv. 1949.
- [9] J. J. Green et F. Sandy, « Microwave Characterization of Partially Magnetized Ferrites », *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 22, n° 6, p. 641-645, 1974.