

Antennes multibandes à polarisation circulaire exploitant la zone de perméabilité effective négative d'un ferrite

J. Leon Valdes¹, L. Huitema¹, E. Arnaud¹, V. Olivier², T. Monédière¹

¹ Institut de Recherche XLIM UMR 7552, Limoges, France

² Inoveos, Brive-la-Gaillarde, France
jehison.leon@xlim.fr

Résumé – Dans ce travail, deux dispositifs antennaires opérant en polarisation circulaire droite sont présentés. Ils couvrent les bandes de fréquences L1 (1,5756 GHz), L2 (1,227 GHz) et E6 (1,278 GHz) destinées aux applications satellitaires. Ces antennes exploitent les propriétés des matériaux ferrites polarisés, capables de générer naturellement une polarisation circulaire. L'utilisation de tels matériaux permet également une réduction significative des dimensions de l'antenne grâce à leurs valeurs élevées de perméabilité et de permittivité. Enfin, les antennes fonctionnent dans une plage de fréquences où la partie réelle de la perméabilité effective du matériau ferrite est négative ce qui permet d'obtenir un taux d'ellipticité de qualité sur de larges bandes de fréquence.

1. Introduction

Avec l'évolution rapide des systèmes de communication sans fil intégrant plusieurs standards, la conception d'antennes compactes capables d'opérer sur plusieurs bandes de fréquences est devenue un enjeu majeur. Par ailleurs, l'émission en polarisation circulaire constitue une solution particulièrement efficace, tant dans les domaines civils que militaires, pour pallier les désalignements entre émetteurs et récepteurs, réduire les pertes de polarisation liées aux trajets multiples, et limiter les effets de réflexion ou de propagation au sol dans les applications satellitaires. Réunir la compacité, la polarisation circulaire et le fonctionnement multibande au sein d'un même dispositif représente ainsi un défi de conception particulièrement intéressant.

Plusieurs approches permettent de générer une polarisation circulaire dans une antenne [1]-[3]. Les méthodes classiques reposent sur une alimentation spécifique, simple ou multiple, destinée à exciter deux modes orthogonaux avec un déphasage de 90° [2]. D'autres stratégies consistent à introduire des éléments de perturbations géométriques ou à exploiter des matériaux magnétiques [3].

Dans ce cadre, les antennes intégrant des ferrites constituent une alternative prometteuse. Sous polarisation magnétique statique, ces matériaux présentent un comportement anisotrope qui permet la génération naturelle d'une polarisation circulaire. Leur perméabilité supérieure à l'unité, combinée à une permittivité généralement élevée (de l'ordre de 12 à 16), en fait également des candidats privilégiés pour la miniaturisation des structures rayonnantes [3]. De plus,

leurs propriétés magnéto-diélectriques contribuent à améliorer la bande passante d'adaptation par rapport à une antenne reposant sur un substrat purement diélectrique [4].

Dans ce travail, nous explorons la conception d'antennes multibandes à polarisation circulaire basées sur un matériau ferrite opérant dans une zone où la partie réelle de la perméabilité effective (μ_{eff}) devient négative. Des études antérieures [5, 6] ont démontré qu'un patch ferrite pouvait fonctionner dans cette région et produire une polarisation circulaire de qualité. Nous proposons ici deux dispositifs antennaires tri-bandes à polarisation circulaire droite (RHCP), couvrant les bandes L1, L2 et E6. Le premier repose sur un patch unique alimenté par une ligne microruban, gravé sur un substrat composite ferrite-alumine, le ferrite étant polarisé par un aimant permanent. Le second dispositif consiste en un réseau de quatre patches identiques intégrant chacun un ferrite polarisé. Les caractéristiques du matériau, les résultats de simulation, la réalisation expérimentale et les mesures associées seront présentés et discutés.

2. Propriétés du matériau ferrite

Les ferrites polarisés par un champ magnétique statique présentent un comportement anisotrope et non réciproque, décrit par le tenseur de perméabilité de Polder [7] :

$$[\mu_r(\omega)] = \begin{bmatrix} \mu & -j\kappa & 0 \\ j\kappa & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mu_{eff} = \frac{\mu^2 - \kappa^2}{\mu} \quad (1)$$

avec $\mu = 1 + \frac{\omega_m \omega_0}{\omega_0^2 - \omega^2}$, $\kappa = \frac{\omega_m \omega}{\omega_0^2 - \omega^2}$, $\omega_m = \gamma \mu_0 M_s$, $\omega_0 = \gamma \mu_0 H_i + j\omega\alpha$ et $\omega = 2\pi f$, $\gamma = 2.8 \text{ MHz/Oe}$ et $\alpha = \frac{\gamma \Delta H}{2f_0}$.

Les paramètres μ et κ dépendent du champ interne (H_i), de l'aimantation à saturation (M_s) et de la fréquence (f). La résonance gyromagnétique apparaît pour $f_0 = \gamma H_i$, autour de laquelle les pertes magnétiques deviennent importantes. Deux régimes de fonctionnement peuvent être distingués : en dessous (champ fort) et au-dessus (champ faible) de cette résonance, où des modes en RHCP et LHCP vont se propager (Figure 1) [3].

Une zone particulière, dite interdite, apparaît dans la zone de champ faible lorsque la partie réelle de la perméabilité effective devient négative ($\mu_{eff} < 0$). Dans cette région, le nombre d'onde associé devient imaginaire, entraînant la formation de modes évanescents [7]. Ce comportement a été étudié à partir de modèles analytiques

sous MATLAB et validé par des simulations électromagnétiques sous CST.

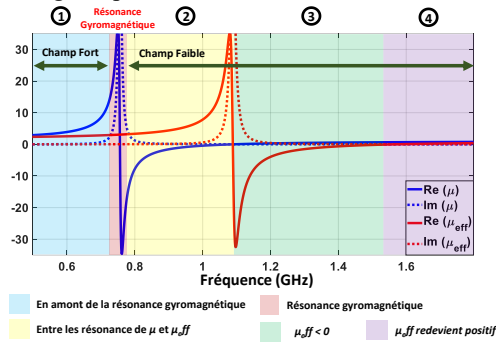


Figure 1. Evolution fréquentielle de μ et μ_{eff} pour le ferrite Y36 avec un H_i de 200 Oe.

Dans ce travail, le matériau ferrite utilisé est le Y36, dont les principales caractéristiques sont présentées dans le Tableau 1. Ce ferrite a été retenu pour la conception d'antennes patch tri-bandes fonctionnant dans la zone où μ_{eff} est négative, comme détaillé dans la section suivante.

Ferrite	$4\pi M_s$ (Gauss)	ΔH_{eff} (Oe)	ΔH (Oe)	ϵ_r	$\tan\delta$ (10^{-4})	Fonction.
Y36	290	4	25	14	2	$\mu_{eff} < 0$

Tableau 1. Caractéristiques du ferrite Y36.

3. Configurations d'antennes et analyse

3.a. Antenne à patch unique

La conception des antennes a été réalisée à l'aide du logiciel CST Studio Suite en deux étapes successives. La première repose sur une modélisation électromagnétique avec un champ magnétique interne uniforme, tandis que la seconde intègre une co-simulation magnéto-statique-électromagnétique (MS-EM) afin de reproduire le champ réel généré par l'aimant permanent destiné à polariser le ferrite.

La première antenne développée (Figure 2) est constituée d'un patch circulaire métallique ($\varnothing = 33,7$ mm) déposé sur un substrat de ferrite cylindrique, lui-même inséré dans un support en alumine ($\epsilon_r = 9,6$, $\tan\delta = 2 \times 10^{-4}$) de dimensions 94×84 mm. Le patch est excité en bordure par une ligne microruban. Ce positionnement est justifié par une analyse modale préalable montrant que le champ est maximal près de la périphérie du résonateur, favorisant ainsi l'excitation du mode fondamental.

Les premiers résultats de simulation (Figure 3) indiquent un fonctionnement autour de 1,18 GHz pour un champ interne $H_i = 200$ Oe, avec un taux d'ellipticité (TE) inférieur à 3 dB sur une bande couvrant les fréquences L1, L2 et E6. L'ajout d'un circuit RLC sur la ligne d'alimentation permet d'obtenir les résonances correspondant aux bandes L2 et E6, tandis que la gravure d'une fente sur le patch assure l'adaptation dans la bande L1 (Figure 2).

La co-simulation MS-EM intègre ensuite un aimant permanent ($B_r = 0,88$ T) en SmCo placé sous le plan de masse. Une plaque en acier (Steel-1010) est ajoutée pour homogénéiser le champ dans le ferrite. L'antenne obtenue présente des dimensions de l'ordre de $\lambda_0/2,6 \times \lambda_0/35$ (longueur $\times$ hauteur) pour la bande L2.

Enfin, un prototype a été fabriqué pour validation expérimentale (Figure 4). Les métallisations ont été réalisées par procédés de microfabrication en salle blanche (XLIM), et les gravures de la face supérieure effectuées par une machine de prototypage laser LPKF par la société Inoveos.

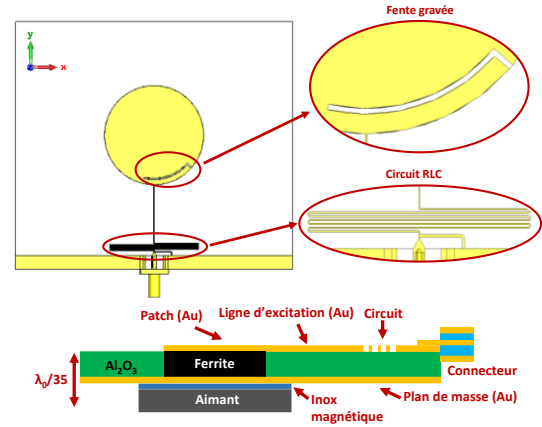


Figure 2. Configuration de l'antenne.

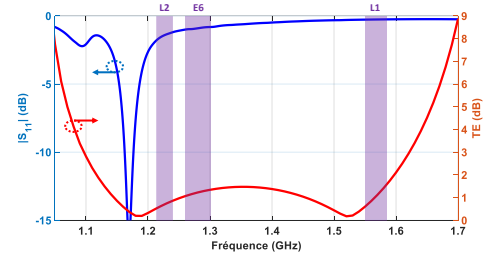


Figure 3. $|S_{11}|$ et TE en simulation EM avec un H_i de 200 Oe uniforme dans le ferrite.



Figure 4. Substrat de ferrite-alumine et l'antenne fabriquée après la métallisation et la gravure laser.

Les résultats co-simulés et mesurés des paramètres $|S_{11}|$ et du TE sont présentés sur la Figure 5.

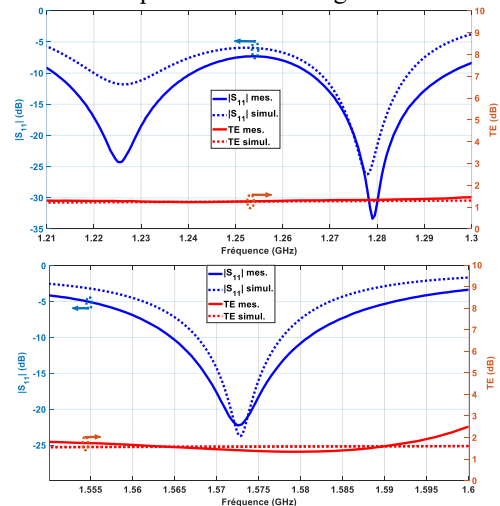


Figure 5. Mesures et des cosimulations MS-EM des paramètres $|S_{11}|$ et du TE.

Les trois bandes de fonctionnement, centrées à 1,225 GHz, 1,279 GHz et 1,573 GHz, montrent un bon accord entre mesures et simulations. Le TE reste inférieur à 1,6 dB pour les trois bandes de fréquences.

3.b. Antenne réseau reconfigurable

La seconde configuration antennaire a été développée à la suite de l'antenne ferrite à patch unique alimentée par ligne microruban décrite précédemment. Le dispositif proposé est un réseau de quatre patches excités indépendamment par quatre ports, tout en conservant la même taille de substrat en alumine que l'antenne élémentaire (Figure 6). Quatre éléments ferrites sont insérés sous chaque patch, l'ensemble étant polarisé par un unique aimant permanent placé sous le plan de masse.

L'adaptation en impédance est assurée, comme pour l'antenne précédente, par l'emploi de méandres sur les lignes d'alimentation pour les bandes L2 et E6, et par une fente sur le patch pour la bande L1.

L'objectif de cette architecture est d'obtenir une reconfigurabilité du diagramme de rayonnement, permettant un dépointage contrôlé du faisceau en fonction du déphasage appliqué à chaque port. Cette antenne conserve une RHCP tout en offrant une reconfigurabilité du rayonnement, combinant ainsi polarisation stable et contrôle directionnel.

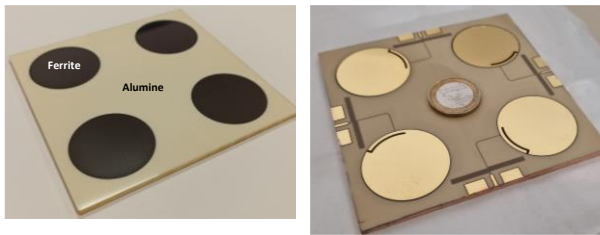


Figure 6. Substrat de ferrites-alumine et l'antenne fabriquée.

Les résultats de simulation des paramètres $|S_{11}|$ et du TE de cette topologie sont présentés sur la Figure 7 et montrent une adaptation de l'antenne dans les trois bandes de fréquence étudiées, avec un TE inférieur à 3 dB.

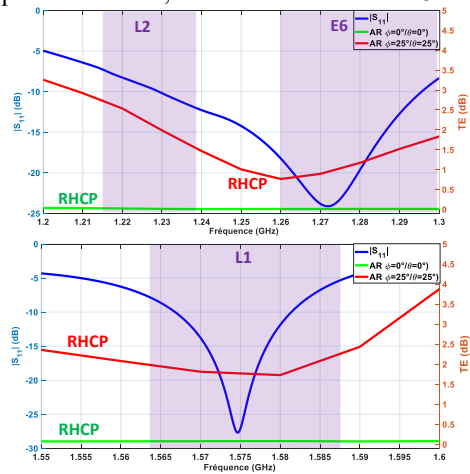


Figure 7. $|S_{11}|$ et TE co-simulés pour deux directions de rayonnement.

L'antenne conserve une RHCP aussi bien lorsque le rayonnement est dirigé sur l'axe principal (courbe verte, Figure 7), que lorsqu'un dépointage du faisceau est obtenu

par application de déphasages aux quatre ports d'alimentation, entraînant une direction de rayonnement à $\Phi = 25^\circ$ et $\theta = 25^\circ$ (courbe rouge, Figure 7). Sa polarisation circulaire est également préservée pour d'autres directions de dépointage, confirmant la stabilité de la polarisation RHCP et la reconfigurabilité angulaire du réseau proposé.

Les résultats expérimentaux des deux antennes, incluant les mesures de gain, d'efficacité et de taux d'ellipticité, ainsi que leur comparaison avec les simulations, seront présentés et discutés lors de la conférence.

4. Conclusion

Deux antennes à base de ferrites polarisés ont été présentées : une antenne patch unique et un réseau de quatre patches. Les deux dispositifs exploitent la zone de fonctionnement du ferrite où $\mu_{eff} < 0$, permettant d'obtenir une polarisation circulaire droite sur les bandes L1, L2 et E6 avec une structure compacte. Le réseau, polarisé par un aimant unique, introduit en plus une reconfigurabilité du diagramme de rayonnement via le contrôle de phase appliqué aux ports. Ces résultats démontrent le potentiel des ferrites pour concevoir des antennes miniaturisées, multibandes et reconfigurables pour applications GNSS.

5. 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 l'institut de recherche XLIM (<https://inogyro.xlim.fr/>).

Les mesures en rayonnement ont été réalisées au sein de CISTEME (Stargate SG24, <https://cisteme.net/>).

Tout ou partie des expériences ont été réalisées à la plateforme d'essais PLATINOM d'XLIM, membre du réseau CNRS RF-Net.

Références

- [1] E. Arnaud, et al. « Miniaturization of a Circular Polarized Antenna using Ferrite Materials », in 12th EuCAP, London, UK, p. 558 (5 pp.)-558 (5 pp.), 2018.
- [2] E. Aloni, et al. « Analysis of a dual circularly polarized microstrip antenna fed by crossed slots », IEEE TAP, vol. 42, no 8, p. 1053-1058.
- [3] S. Jemmeli, et al. « Design of a Miniature Circularly Polarized Antenna Operating in Three Frequency Bands Using a Polarized Ferrite Material », IEEE TAP, vol. 69, no 8, p. 4304-4312, 2021.
- [4] R. C. Hansen, et al., « Antennas with magneto - dielectrics », Microwave and Optical Technology Letters, vol. 26, no 2, 2020.
- [5] J.L. Valdes et al., « Multi-Band Circularly Polarized Ferrite Antenna Operating with Negative Effective Permeability », IEEE TAP, 2025.
- [6] S. Jemmeli, et al., « Ultra-Miniature and Circularly Polarized Ferrite Patch Antenna », IEEE TAP, vol. 71, no 8, p. 6435-6443, 2023.
- [7] D. Polder, « On the theory of ferromagnetic resonance », Physica, vol. 15, no 1-2, 1949.