



**HAL**  
open science

# Problématique de la conception d'antennes miniatures accordables sur substrats magnéto-diélectriques anisotropes

July Cortes, Alexis Chevalier, Patrick Queffelec

► **To cite this version:**

July Cortes, Alexis Chevalier, Patrick Queffelec. Problématique de la conception d'antennes miniatures accordables sur substrats magnéto-diélectriques anisotropes. 14èmes Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux (JCMM 2016), Mar 2016, Calais, France. hal-01311522

**HAL Id: hal-01311522**

**<https://hal.univ-brest.fr/hal-01311522v1>**

Submitted on 10 May 2016

**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.

# Problématique de la conception d'antennes miniatures accordables sur substrats magnéto-diélectriques anisotropes

J. Cortes<sup>1</sup>, A. Chevalier<sup>1</sup> et P. Queffelec<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lab-STICC, UMR CNRS 6285, Université de Bretagne Occidentale, 6 avenue Le Gorgeu, CS93837, 29238 Brest Cedex 3

July-Paola.Cortes@univ-brest.fr

**Résumé**— Cette étude s'intéresse à la problématique de la conception des antennes déposées sur substrats magnétiques. Le matériau est aimanté pour assurer l'accordabilité des caractéristiques de l'antenne, notamment sa fréquence de résonance. Pour l'aide à la conception de telles antennes, nous proposons un outil de simulation original couplant une analyse magnétostatique, un modèle de tenseur de perméabilité et le logiciel commercial CST Microwave Studio. L'agilité d'une antenne circulaire de type PIFA est étudiée. Les résultats mesurés et ceux issus de la simulation sont comparés et discutés.

**Mots clés**— Antennes miniatures, accordabilité, composites magnéto-diélectriques, tenseur de perméabilité, simulations électromagnétiques.

## I- INTRODUCTION

Les matériaux ferrites sont couramment utilisés dans le domaine des hyperfréquences pour réaliser des circulateurs/isolateurs et des déphaseurs. Leur application aux systèmes antennaires est plus récente. Il a été en effet démontré qu'un substrat d'antenne présentant une perméabilité supérieure à l'unité voyait ses performances améliorées : plus grande compacité, élargissement de la bande passante, meilleure efficacité pour des pertes données [1]. Le substrat idéal présenterait une permittivité unité, une perméabilité la plus élevée possible et de très faibles pertes. Ce matériau n'existe pas. D'une part, les ferrites présentent en hyperfréquence une permittivité comprise entre 11 et 16 et des pertes élevées en ondes décimétriques en raison de la présence de parois magnétiques qui relaxent dans ce domaine de fréquences, engendrant de forts effets dissipatifs. Dans ce contexte, nous nous sommes orientés au laboratoire vers la réalisation de matériaux composites magnéto-diélectriques constitués de particules de taille nanométrique pour garantir leur caractère monodomaine et donc l'absence de parois. Des compositions de type NiZnCo ont été synthétisées et mises en forme par la technique conventionnelle de frittage. Mais pour éviter le grossissement des grains, et donc l'apparition de parois, un traitement thermique particulier basé sur une double calcination de la poudre magnétique et un frittage partiel a dû être mis en place. La mise en forme du substrat est réalisée à partir de la technique de pressage uniaxe. Le matériau est qualifié de semi-dense ou de composite magnéto-diélectrique. Ces composites nous ont permis de réaliser des antennes miniatures en bande UHF dans le cadre du projet ANR NAOMI [2]–[4]. L'étape suivante consiste à exploiter la dépendance de la perméabilité des matériaux magnétiques vis-à-vis d'un champ magnétique statique ou d'une contrainte mécanique pour assurer l'accordabilité des caractéristiques de l'antenne. Pour atteindre cet objectif, qui est celui du projet

ANR MISTRAL dont le démarrage a eu lieu en octobre 2015, la phase de conception d'antennes sur substrats magnétiques s'avère incontournable. Or à ce jour, aucun simulateur électromagnétique (EM) commercial n'est en mesure de prédire le comportement dynamique des matériaux magnétiques en dehors de l'état saturé. Cette communication décrit l'application aux antennes réalisées sur substrats magnéto-diélectriques d'un outil de conception original associant une analyse magnétostatique, un modèle de tenseur de perméabilité et le simulateur commercial CST Microwave Studio [5].

Dans un premier temps, l'antenne étudiée sera présentée. Puis, l'outil de simulation utilisé sera décrit. La confrontation entre les résultats expérimentaux et ceux simulés sera discutée avant de conclure.

## II- ANTENNE CIRCULAIRE PIFA

La topologie antennaire retenue pour ce travail est présentée sur la Figure 1. La structure est constituée d'une antenne patch circulaire du type PIFA. Elle a été conçue pour être adaptée dans la bande UHF à une fréquence de résonance de 611 MHz.

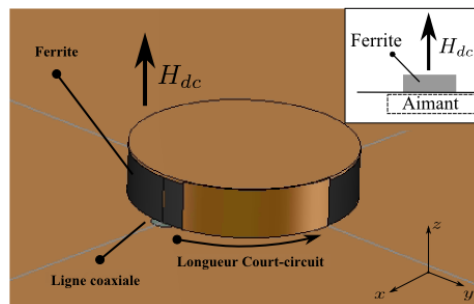


Figure 1. Topologie de l'antenne bande UHF sur composite magnéto-diélectrique.

L'antenne est gravée sur un substrat ferrite circulaire tronqué. Son diamètre est de 36 mm et sa hauteur de 8 mm. L'alimentation de l'antenne est assurée par un port coaxial SMA dont la position a été optimisée pour obtenir une bonne adaptation.

Le principe PIFA consiste à implémenter un court-circuit entre l'élément rayonnant et le plan de masse de l'antenne. Afin d'éviter l'usinage du ferrite, le court-circuit a été implémenté avec un ruban métallique placé sur la tranche du substrat. La longueur du ruban et sa position ont été également optimisées pour garantir une bonne adaptation en bande UHF.

Cette antenne est déposée sur un substrat ferrite de type céramique partiellement fritté constitué de particules nanométriques de ferrite de NiZnCo synthétisées au Lab-STICC [6]. La caractérisation de ce matériau montre que la concentration en matière magnétique est proche de 60 %, ainsi qu'une permittivité autour de 7 et une perméabilité statique à

un niveau de 4,6 avec une résonance gyromagnétique autour de 1.7 GHz (Figure 2).

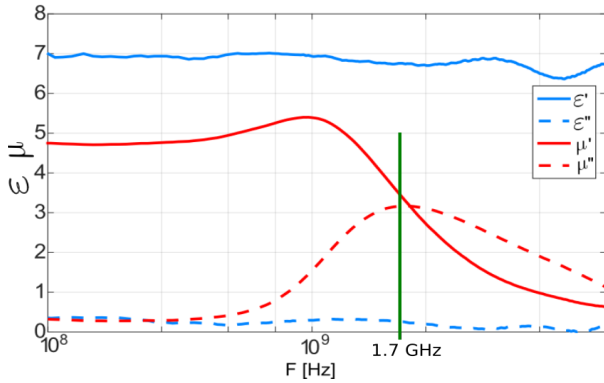


Figure 2. Parties réelles et imaginaires des spectres de permittivité et de perméabilité du composite à l'état désaimanté.

### III-OUTIL DE CONCEPTION DES DISPOSITIFS A FERRITES

#### III-1-Principe de base de l'outil de simulation EM

Pour la simulation EM de l'antenne proposée, nous utilisons l'outil EM dont le diagramme de principe est présenté sur la Figure 3. Cet outil est basé sur l'intégration d'un modèle de tenseur de perméabilité des ferrites, au simulateur commercial CST Microwave Studio à l'aide d'une macro dédiée. Cette macro permet la description de matériaux anisotropes où leurs paramètres intrinsèques sont définis à l'aide d'une grandeur tensorielle.

Afin de calculer le tenseur de perméabilité du ferrite, nous utilisons le modèle général de perméabilité tensorielle « GPT » [7], dont le domaine de validité a été étendu au cas des matériaux composites [8]. Celui-ci décrit de façon prédictive le tenseur de perméabilité des ferrites, quels que soient l'intensité du champ magnétique statique appliqué  $H_{dc}$  et donc l'état d'aimantation du matériau  $M(H_{dc})$ .

L'étude magnétostatique nécessaire pour déterminer l'état d'aimantation  $M(H_{dc})$  est prise en compte par le modèle « GPT » grâce à l'utilisation du modèle énergétique de Stoner–Wohlfarth, qui suppose une aimantation homogène. Il est également aussi possible d'effectuer cette étude en considérant une aimantation non homogène [5], ce qui est plus conforme à la réalité physique des ferrites aimantés.

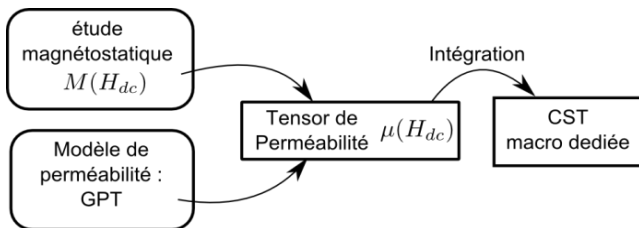


Figure 3. Schéma de principe de l'outil de simulation pour dispositifs à ferrite.

Une fois les spectres des différents éléments du tenseur de perméabilité  $\mu(H_{dc})$  déterminés pour un champ donné, une étape d'intégration est nécessaire afin que le tenseur soit pris en compte par la macro du logiciel CST. Cette étape intermédiaire se base sur une interpolation de chaque composante du tenseur afin de définir un tenseur dépendant de la fréquence [5], [8]. Nous détaillons cette étape ultérieurement.

#### III-2-Modèle de permeabilité adapté aux composites

Le modèle GPT [7] adapté aux composites [8] exprime, de même que les versions antérieures du modèle, chaque composante du tenseur en fonction de la fréquence pour un champ statique  $H_{dc}$  donné. Il s'appuie sur les caractéristiques physiques des ferrites; telles que  $M_s$  l'aimantation à saturation,  $\alpha$  le coefficient d'amortissement, le champ d'anisotropie  $H_a$ , le facteur de forme  $N_z$  et, à présent, la concentration  $C$  en matière magnétique du ferrite semi-dense.

Ce modèle repose sur une modélisation précise des propriétés statique et dynamique de ferrites à grains monodomaines. L'étude magnétostatique permet la détermination du champ interne du grain via le modèle de Stoner et Wohlfarth [9]. Puis ce champ interne est utilisé pour déterminer le comportement dynamique régi par l'équation de Landau-Lifschitz-Gilbert (LLG) [10] appliquée à chaque domaine. Pour remonter à l'aimantation du matériau, une moyenne est réalisée sur une certaine distribution statistique de forme de grains (centrée sur la valeur 1/3 correspondant aux grains sphériques), ainsi qu'une moyenne sur les directions des axes de facile aimantation ( $\phi, \vartheta$ ) (distribution isotrope).

L'équation générale de l'aimantation macroscopique  $\vec{m}$ , lorsqu'une onde hyperfréquence  $\vec{h}$  interagit avec le milieu magnétique, est donnée par :

$$\langle \vec{m}(\vec{h}, H_{dc}) \rangle = C \cdot \int_{\phi} \int_{\vartheta} \int_{n_{g\_min}}^{n_{g\_max}} P_1 \cdot P_2 \cdot \vec{m}_i \cdot dn_g \cdot d\vartheta \cdot d\phi \quad (1)$$

Avec  $P_1$  la densité de probabilité pour l'orientation des axes de facile aimantation et  $P_2$  la densité de probabilité des formes de grain, respectivement.

De plus, à la différence de la réf. [7], la densité de probabilité sur la forme des grains  $P_2(n_g)$  est choisie de forme gaussienne. Celle-ci est caractérisée par sa valeur moyenne  $a$ , son écart type  $b$ , mais aussi par des limites d'intégration  $n_{g\_min}$  et  $n_{g\_max}$  écartant les formes extrêmes [8].

#### III-3-Intégration du tenseur de perméabilité $\mu(H_{dc})$ dans le simulateur CST "macro dédié".

Le simulateur CST est capable de décrire le comportement EM des matériaux anisotropes. Grâce aux fonctions dites « macro-programming », il est possible d'exécuter des scripts pour des fonctions telles que : la création de structures 3D ou la définition de propriétés des matériaux. Lors de la création des matériaux via un script, il est possible de créer un script du type « tensor formula » qui permet d'accéder directement aux 9 éléments du tenseur de perméabilité ou de permittivité.

Ainsi, chaque élément du tenseur (parties réelle et imaginaire) est défini indépendamment sous la forme d'une fonction dépendant de la fréquence.

L'étape d'intégration correspond alors à la détermination des fonctions dépendant de la fréquence à partir des spectres de chaque élément donnés par le modèle GPT. Cette étape se base sur une routine d'interpolation implémentée avec le logiciel Matlab. La fonction mathématique d'interpolation utilisée est [5]:

$$\mu_{ij}(f) = \frac{A_0 + A_1 f + \dots + A_n f^n}{1 + B_1 f + \dots + B_n f^n} \quad (2)$$

Le nombre des coefficients de numérateur  $N_A$  et du dénominateur  $N_B$  peuvent être ajustés dans la routine afin d'assurer une interpolation la plus précise avec une erreur relative inférieure à 1%. Dans ce travail, les valeurs de  $N_A$  et  $N_B$  utilisées sont, respectivement, 6 et 4.

De plus, les coefficients  $A_{0..n}$  et  $B_{1..n}$  trouvés lors de l'interpolation ne sont valables que dans la bande de fréquence d'interpolation. Cette dernière doit alors correspondre à la bande de fréquences de simulation pour l'antenne.

Une fois chaque élément du tenseur interpolé (9 fonctions réelles et 9 fonctions imaginaires), les fonctions retrouvées sont introduites dans la macro dédiée « tensor formula » sur CST. Cette macro correspond au tenseur de perméabilité du ferrite pour une valeur du champ  $H_{dc}$  donnée.

#### IV-ÉTUDE DE L'AGILITE DE L'ANTENNE : CONFRONTATION THEORIE / EXPERIENCE

Grâce à l'outil développé (Figure 3), nous sommes en mesure d'étudier l'agilité de l'antenne lorsque le champ magnétique externe appliqué  $H_{dc}$  varie.

Par la suite, la présentation des résultats de la confrontation théorie/expérience est réalisée selon deux cas de figure. Dans un premier temps, nous présentons les résultats pour l'état désaimanté de l'antenne, c'est-à-dire pour une valeur de champ  $H_{dc} = 0$ .

Dans un deuxième temps, nous présentons des résultats pour des états d'aimantation partielle du substrat afin de prédire l'agilité de l'antenne. Nous montrons la variation de la fréquence de résonance en fonction de l'intensité du champ magnétique statique appliqué ( $H_{dc} \neq 0$ ).

##### IV-1-Resultats pour l'état désaimanté

La Figure 4 montre la confrontation entre la simulation et la mesure du module du coefficient de réflexion de notre antenne patch PIFA dans le cas désaimanté. Il est constaté que l'antenne est adaptée à une fréquence de 611 MHz à -17 dB et présente une efficacité de 24.3%. Nous observons que le résultat de l'outil de simulation présenté est en très bon accord avec la mesure de cette caractéristique de l'antenne.

Afin de valider l'apport d'un outil de simulation basé sur une modélisation rigoureuse du tenseur de perméabilité avec le modèle GPT, la mesure de l'antenne est confrontée avec plusieurs résultats de simulation. Tout d'abord, le résultat de simulation issu du modèle GPT, puis celui issu du modèle de ferrites de référence pour l'état désaimanté, le modèle de Schlömann [11], enfin, un troisième résultat de simulation qui utilise une valeur constante de perméabilité relative du ferrite, autour de 4.6 qui correspond à la valeur mesurée de la perméabilité initiale statique (à champ de polarisation nul, cf. figure 2). Cette valeur est parfois utilisée par les concepteurs pour des raisons de simplicité et par manque de modèle prédictif sur lequel s'appuyer.

Nous constatons que le paramètre  $S_{11}$  issu du modèle de Schlömann ( $f_r = 601\text{MHz}$ ) et celui issu de l'utilisation de la valeur statique de la perméabilité ( $f_r = 620\text{ MHz}$ ) s'écartent de la réponse mesurée de l'antenne. Pour le premier résultat, le décalage s'explique par le fait que le modèle de Schlömann ne prend pas en compte le caractère semi-dense (porosité) du

ferrite et aussi, sa représentation très simplifiée des ferrites polycristallins. Le deuxième résultat met en évidence que l'approche qui consiste à utiliser la valeur statique de la perméabilité n'est pas suffisante pour décrire le comportement de l'antenne à ferrite. Par contre, nous observons un très bon accord théorie/mesure lorsque le modèle GPT est utilisé pour simuler le comportement de l'antenne.

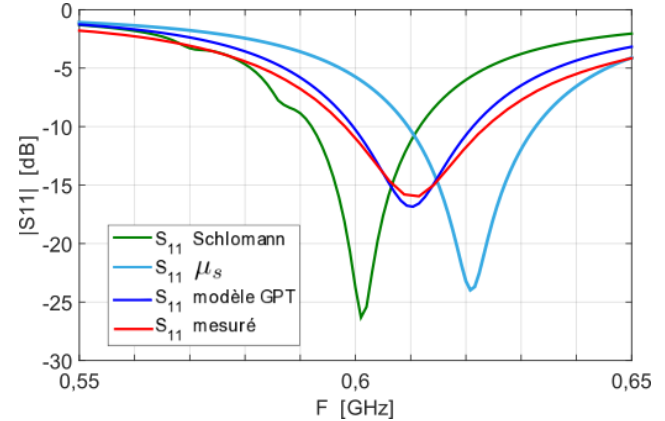


Figure 4. Confrontation simulation-mesure pour le module du coefficient de réflexion  $S_{11}$  dans le cas du ferrite désaimanté.

##### IV-2-Resultats en agilité de fréquence

A présent ; un champ magnétique statique  $H_{dc}$  est appliqué suivant l'axe z pour tester l'agilité de l'antenne proposée et son intensité varie de 0 à 4500 Oe. Ce champ est appliqué à l'aide d'aimants permanents qui sont placés au-dessous du plan de masse, comme l'indique le dessin inséré dans la Figure 1.

La Figure 5 montre l'évolution du module du paramètre  $S_{11}$  mesuré de l'antenne PIFA pour plusieurs intensités du champ magnétique statique appliqué.

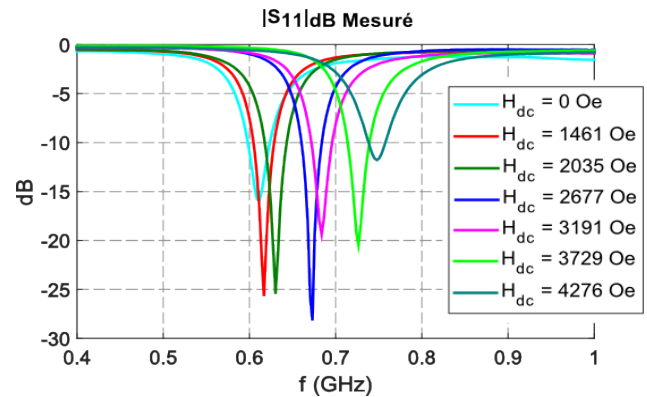


Figure 5. Evolution du  $S_{11}$  mesuré pour différentes intensités de  $H_{dc}$ .

La Figure 6 présente l'évolution de la fréquence de fonctionnement de l'antenne en fonction de l'intensité du champ magnétique statique appliqué pour la réponse mesurée et la réponse simulée.

L'évolution de la fréquence de résonance simulée suit le comportement général de celle mesurée, principalement pour des champs appliqués inférieurs à 2000 Oe. Il est toutefois noté un décalage par rapport à la mesure pour des champs forts. Ce décalage est probablement lié à la non-uniformité du champ magnétique créé par les aimants permanents.

Nous observons deux zones distinctes de variation. Une première où la variation de fréquence est faible (inclinaison faible) jusqu'à 2000 Oe environ, puis au delà de cette valeur,

une variation de fréquence plus importante. Ce comportement s'explique par l'effet démagnétisant lié à la forme macroscopique de l'échantillon. Cet effet décrit par Kittel [12] contrecarre l'influence du champ statique appliqué  $H_{dc}$  vu par les moments magnétiques.

A l'état désaimanté, l'organisation des moments magnétiques est influencée par la forme de l'échantillon. C'est dire que leur orientation privilégie les directions appartenant au plan  $xOy$ , vu la forme aplatie de l'échantillon de ferrite utilisé (Figure 1).

Lorsque l'intensité du champ augmente, les moments tendent à s'orienter progressivement dans la direction du champ appliqué ( $Oz$ ). Pour des intensités modérées de  $H_{dc}$  les moments tendront à rester dans leurs positions d'équilibre car l'effet démagnétisant est fort, vu que le champ appliqué est suivant la dimension la plus faible de l'échantillon, i.e. son épaisseur. Par conséquent une variation limitée de la fréquence de résonance est observée.

Plus l'intensité de  $H_{dc}$  est élevée, plus les moments basculent et lorsque la majorité des moments ont basculé, l'effet démagnétisant est surmonté à partir d'une certaine intensité du champ de polarisation  $H_{dc}$ . Alors lorsque l'intensité de  $H_{dc}$  augmente nous pouvons observer une variation de la fréquence de résonance qui suit un comportement quasi-linéaire.

Ce comportement linéaire est déterminé à partir des courbes de tendance obtenues à partir des points de mesure et de simulation. Celles-ci sont présentées sur la Figure 6. Nous observons que ces courbes présentent des valeurs de pente et d'ordonnée à l'origine très similaires. Nous avons alors un comportement équivalent mais légèrement décalé entre la mesure et la simulation.

Ces décalages sont probablement liés, d'une part, à l'incertitude sur l'estimation de l'amplitude du champ  $H_{dc}$  qui dépend de la position où elle est mesurée sur l'aimant permanent, et d'autre part, à la non-uniformité du champ dû au placement de la connectique de l'antenne qui n'est pas pris en compte dans la simulation.

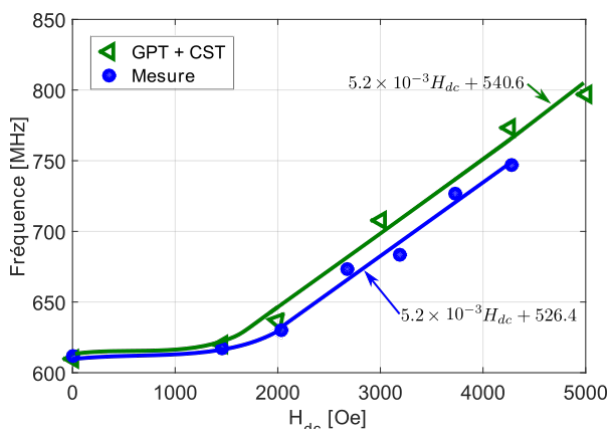


Figure 6. Evolution de la fréquence de résonance de l'antenne, mesurée et simulée, en fonction de l'intensité du champ appliqué.

La confrontation théorie/expérience effectuée (Figure 6) démontre le caractère prédictif de l'outil EM développé et du modèle GPT pour étudier l'agilité d'une antenne sur substrat magnétique anisotrope.

## V- CONCLUSION

Cette communication souligne l'intérêt d'un outil prédictif pour la conception des antennes imprimées sur substrat magnétique aimanté. L'outil proposé comprend l'intégration du modèle GPT adapté aux matériaux composites dans le simulateur commercial CST®. Cet outil est valable quelle que soit l'intensité du champ magnétique appliqué, ce qui est intéressant pour la conception de dispositifs à ferrites accordables (déphaseurs, filtres, antennes, etc.). En outre, une étude magnétostatique qui permettrait de considérer un champ non-uniforme pourrait apporter des améliorations dans la réponse simulée, notamment en champs forts.

## REFERENCES

- [1] R. C. Hansen et M. Burke, « Antennas with magneto-dielectrics », *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 26, n° 2, p. 75-78, juill. 2000.
- [2] D. Souriou, J.-L. Mattei, A. Chevalier, et P. Queffelec, « Influential parameters on electromagnetic properties of nickel-zinc ferrites for antenna miniaturization », *J. Appl. Phys.*, vol. 107, n° 9, p. 09A518, 2010.
- [3] F. Canneva, F. Ferrero, A. Chevalier, J.-M. Ribero, J.-L. Mattei, P. Queffelec, et R. Staraj, « Miniature Reconfigurable Antenna with Magneto Dielectric Substrate for DVB-H Band », *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 55, n° 9, p. 2007-2011, sept. 2013.
- [4] L. Huitema, T. Reveyrand, J.-L. Mattei, E. Arnaud, C. Decroze, et T. Monediere, « Frequency Tunable Antenna Using a Magneto-Dielectric Material for DVB-H Application », *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 61, n° 9, p. 4456-4466, sept. 2013.
- [5] A. Le Gouellec, G. Verissimo, P. Queffelec, V. Laur, I. Albert, et T. Girard, « Ferrite-based phase shifters design: The modeling problem of non-saturated anisotropic ferrites », in *Microwave Symposium Digest (IMS), 2013 IEEE MTT-S International*, 2013, p. 1-4.
- [6] J.-L. Mattei, E. Le Guen, A. Chevalier, et A.-C. Tarot, « Experimental determination of magnetocrystalline anisotropy constants and saturation magnetostriction constants of NiZn and NiZnCo ferrites intended to be used for antennas miniaturization », *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 374, p. 762-768, janv. 2015.
- [7] P. Gelin et P. Queffelec, « Generalized Permeability Tensor Model: Application to Barium Hexaferrite in a Remanent State for Self-Biased Circulators », *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, n° 1, p. 24-31, janv. 2008.
- [8] J. Cortes, « Développement d'un outil de simulation EM pour la conception des dispositifs accordables sur substrat magnétique : application aux antennes miniatures », Université de Bretagne occidentale, Brest, France, 2015.
- [9] E. C. Stoner et E. P. Wohlfarth, « A Mechanism of Magnetic Hysteresis in Heterogeneous Alloys », *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. Math. Phys. Sci.*, vol. 240, n° 826, p. 599-642, avr. 1948.
- [10] L. Landau et E. Lifshitz, « On the theory of the dispersion of magnetic permeability in ferromagnetic bodies », *Phys Z Sowjetunion*, vol. 8, n° 153, p. 101–114, 1935.
- [11] E. Schlömann, « Behavior of ferrites in the microwave frequency range », *J. Phys. Colloq.*, vol. 32, n° C1, p. C1-443-C1-451, févr. 1971.
- [12] C. Kittel, « Ferromagnetic resonance », *J. Phys. Radium*, vol. 12, n° 3, p. 291-302, 1951.