



**HAL**  
open science

## Intégration de condensateurs variables ferroélectriques dans une antenne reconfigurable en fréquence dans le domaine millimétrique

V Muzzupapa, Laure Huitema, Aurelian Crunteanu, Eric Arnaud, Caroline Borderon, Raphaël Renoud, Hartmut W. Gundel

► **To cite this version:**

V Muzzupapa, Laure Huitema, Aurelian Crunteanu, Eric Arnaud, Caroline Borderon, et al.. Intégration de condensateurs variables ferroélectriques dans une antenne reconfigurable en fréquence dans le domaine millimétrique. XXIIèmes Journées Nationales Microondes, Limoges 8-10 juin 2022, Jun 2022, Limoges, France. hal-03768650

**HAL Id: hal-03768650**

**<https://hal.science/hal-03768650>**

Submitted on 4 Sep 2022

**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.

# Intégration de condensateurs variables ferroélectriques dans une antenne reconfigurable en fréquence dans le domaine millimétrique

V. Muzzupapa<sup>1</sup>, L. Huitema<sup>1</sup>, A. Crunteanu<sup>1</sup>, Eric Arnaud<sup>1</sup>, C. Borderon<sup>2</sup>, R. Renoud<sup>2</sup>, H.W. Gundel<sup>2</sup>

<sup>1</sup> XLIM, UMR CNRS 7252, Université de Limoges, 123 Avenue Albert Thomas, 87060 Limoges, France;

<sup>2</sup> IETR, UMR CNRS 6164, Université de Nantes, 2 rue de la Houssinière, 44322 Nantes CEDEX 3, France;

[vincent.muzzupapa@xlim.fr](mailto:vincent.muzzupapa@xlim.fr)

**Résumé** – Nous présentons la conception et la réalisation d'une antenne patch millimétrique reconfigurable en fréquence par l'intégration de condensateurs variables inter-digités (IDC) incorporant des couches minces ferroélectriques de BST (Titanate de Baryum et Strontium  $Ba_{0,8}Sr_{0,2}TiO_3$ ). Les condensateurs sont dimensionnés pour fonctionner jusqu'à 65 GHz, en offrant des accordabilités de l'ordre de 40% sous des tensions de polarisation de 100 V et présentant des pertes relativement faibles. Afin d'assurer une agilité fréquentielle maximale, un design d'IDC est spécifiquement dimensionné et intégré dans une antenne patch, qui présente 15,4 % d'agilité fréquentielle allant de 27,1 GHz à 31,6 GHz.

## 1. Introduction

Le domaine des ondes millimétriques, (30 GHz à 300 GHz) représente une portion relativement peu utilisée de la ressource fréquentielle du fait des fortes contraintes techniques liées aux fréquences élevées. Il constitue pourtant une solution au problème croissant de la congestion des canaux de télécommunications. Les progrès technologiques de ces dernières années vont permettre d'y adresser un panel d'applications plus large, en l'étendant notamment aux applications civiles telles que la 5G. Outre les fréquences de fonctionnement élevées, il est aujourd'hui attendu des systèmes antennaires une capacité de reconfigurabilité (en fréquences, en polarisation, en rayonnement). Cette capacité offre plus de polyvalence aux systèmes de télécommunications, réduit leur encombrement en facilitant leur intégration. Il est possible d'apporter de la reconfigurabilité à une antenne via l'intégration dans sa topologie de composants variables (résistances, condensateurs, diodes PIN, dispositifs MEMS etc) [1, 2, 3]. Par exemple, l'intégration de condensateurs MEMS dans une antenne patch a permis l'apport d'une agilité fréquentielle de 2% à 15,9 GHz [4], Aussi l'intégration de diodes PIN toujours dans une antenne patch permet de modifier la fréquence de résonance de 5,5 à 12,75 GHz [5].

Cependant, ces dernières années, un intérêt particulier est porté sur les matériaux fonctionnels capables de modifier leurs propriétés électriques sous l'influence de stimuli extérieurs [6]. C'est le cas des matériaux

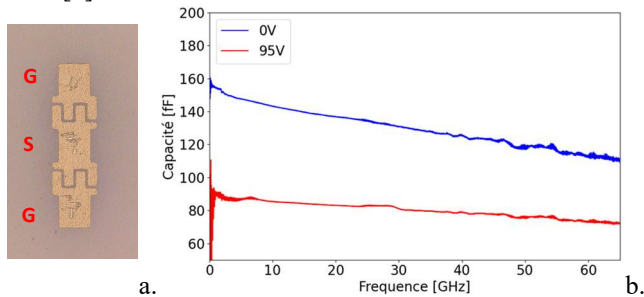
ferroélectriques qui voient leur permittivité évoluer en fonction de leur polarisation par un champ électrique externe. Cette propriété permet de réaliser, entre autres, des condensateurs variables avec de bonnes performances dans le domaine des hyperfréquences [7]. En comparaison avec les matériaux semi-conducteurs, les ferroélectriques peuvent supporter des puissances RF plus élevées, et leur polarisation implique une consommation très faible [6]. Le titanate de baryum et strontium présente des pertes en hautes fréquences relativement faibles, ce qui explique qu'il soit très couramment utilisé pour des applications antennaires. Il est généralement intégré sous forme de couches minces intégrées entre des électrodes métalliques, formant ainsi un condensateur. Si des technologies classiques comme les diodes varicap par exemple, présentent encore des accordabilités plus importantes que les condensateurs ferroélectriques, une intégration judicieuse peut permettre à ces derniers d'apporter aux antennes des performances similaires aux techniques conventionnelles [8]. Pour autant, si le principe d'antenne agile en fréquence intégrant des condensateurs ferroélectriques a été démontré à des fréquences relativement basses [15], il y a peu d'exemples concernant leur intégration dans des antennes millimétriques.

Dans ce travail, nous étudions la réalisation et les performances de condensateurs inter-digités à BST, ainsi que leur intégration dans une antenne patch, fonctionnant dans le domaine des ondes millimétriques, ayant pour but d'amener de la reconfigurabilité fréquentielle.

## 2. Réalisation et performances des IDC

Nous avons réalisé des condensateurs inter-digités (IDC) sur des substrats d'alumine de 500  $\mu\text{m}$  d'épaisseur, recouverts par des couches de Titanate de Baryum et Strontium (BST) de composition  $Ba_{0,8}Sr_{0,2}TiO_3$  de 800 nm d'épaisseur, déposées par la technique sol-gel [9]. La structure métallique des IDC (Ti/Au-10/500 nm) est réalisée par un procédé classique de photolithographie (évaporation des métaux et lift-off) (Figure 1a). Les valeurs de capacités, extraites des mesures des paramètres  $S$  en réflexion, en fonction de la tension de polarisation appliquée aux bornes d'un composant typique, sont présentées sur la Figure 1. L'accordabilité de ce dispositif

IDC est de 38 % à 30 GHz et les pertes, modélisées par une résistance en série avec la capacité, varie entre  $4,8 \Omega$  à 0V (@ 35 GHz) et  $3,6 \Omega$  à 100V (@ 35 GHz). Les performances détaillées de ce dispositif sont présentées dans [7].



**Figure 1. (a) Photographie du dispositif IDC mesuré (doigts de  $33 \times 19 \mu\text{m}$ , gap de  $4.4 \mu\text{m}$ ), (b) Valeurs de capacité en fonction de la fréquence à polarisation de 0 V (courbe bleue) et 95 V (courbe rouge)**

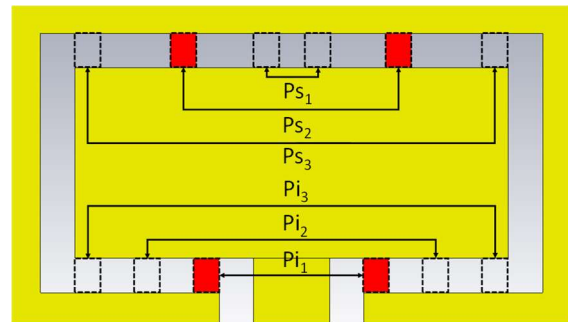
Pour caractériser le temps de réponse des dispositifs IDCs, nous intégrons une IDC en série avec une résistance de  $1 \text{ k}\Omega$  en l'excitant en tension par un signal carré de période  $50 \mu\text{s}$  avec un rapport cyclique de 4% (durée à l'état on de  $2 \mu\text{s}$ ). Les résultats obtenus nous indiquent une constante de temps d'environ  $300 \text{ ns}$ , très peu sensible à l'amplitude des échelons. En considérant la résistance d' $1 \text{ k}\Omega$  en série avec la résistance de pertes (de l'ordre de  $10 \Omega$ ) de l'IDC et sa centaine de femto farads, il est clair que la constante de temps que nous mesurons est trop élevée pour ne correspondre qu'à la capacité ferroélectrique. Ceci nous indique que des capacités parasites perturbent le montage, en masquant la contribution de la capacité ferroélectrique. Bien que des mesures additionnelles plus précises seront nécessaires, nous pouvons en conclure que la constante de temps propre aux IDCs, incluant uniquement leur résistance de pertes série, est inférieure à quelques centaines de nanosecondes, ce qui concorde avec l'état de l'art sur les dispositifs ferroélectriques [10, 11].

### 3. Intégration des dispositifs IDC dans une antenne patch

L'antenne est conçue pour un fonctionnement autour de 30 GHz, sous la forme d'un patch rayonnant ( $8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ ) déposé sur la face supérieure d'un substrat d'alumine d'épaisseur  $300 \mu\text{m}$ . Le signal RF d'excitation ainsi que la polarisation continue (DC) des IDC sont amenés par une ligne coplanaire placée sur la face inférieure et terminée par une fente-boucle rectangulaire. Quatre IDCs, dimensionnés spécifiquement pour cette antenne, sont intégrés dans le gap de la fente (Figure 3.b). L'influence des positions des IDCs est étudiée en réalisant des simulations électromagnétiques (CST Microwave Studio) (Figure 2). Initialement, deux IDCs sont intégrées dans le brin supérieur de la fente, et deux dans le brin inférieur, respectivement aux positions  $\text{Ps}_n$  et  $\text{Pi}_n$  (Figure 2). Ce choix est réalisé compte-tenu du fait que le champ magnétique dans la fente boucle est plus intense dans ces brins ci que dans les brins latéraux [12].

La simulation électromagnétique de l'antenne est réalisée pour l'ensemble des 9 combinaisons Ps-Pi avec les deux valeurs de capacités extrêmes (à 0 et 100V), nous

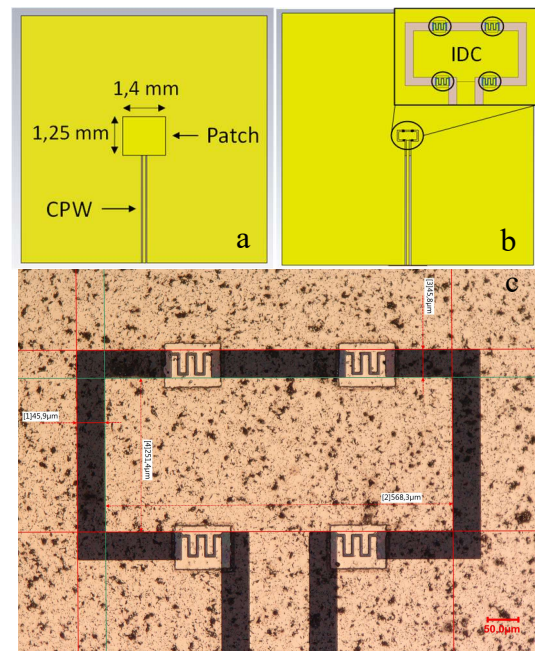
permettant, pour une variation donnée des valeurs des IDCs, de déterminer la variation de l'accordabilité fréquentielle de l'antenne, en fonction de la localisation des IDCs.



**Figure 2: Positions simulées des IDCs dans la fente-boucle. Toutes les positions en pointillés sont étudiées, les positions en rouge sont celles retenues.**

De cette façon, nous avons pu identifier les positions Pi et Ps optimisant l'excursion fréquentielle de la réponse de l'antenne (positions rouges sur la Figure 2). Le modèle simulé de l'antenne est présenté sur la Figure 3.

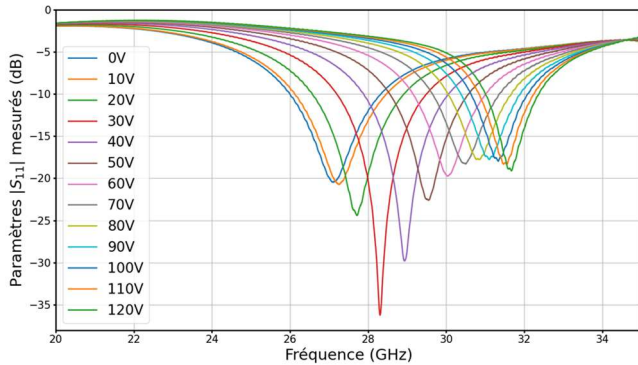
Le couplage entre la fente-boucle et le patch est principalement d'origine magnétique. Il est maximum lorsque les centres de la fente-boucle et du patch sont alignés [12, 13]. La variation des valeurs des IDCs dans le gap de la fente permet de changer le couplage entre la fente et le patch et ainsi de modifier la fréquence de fonctionnement de l'antenne.



**Figure 3. (a) Face supérieure et (b) inférieure du modèle CST de l'antenne (substrat mis en transparence) (c) vue zoomée de la fente-boucle sur la face inférieure d'une antenne réalisée en salle blanche**

Plusieurs antennes ont été fabriquées en salle blanche, puis mesurées en réflexion pour quantifier l'agilité fréquentielle engendrée par la polarisation des IDCs. Les mesures sont réalisées sur un VNA (ZVA Rohde and Schwarz) avec des pointes GSG et un Té de polarisation

permettant d'injecter les tensions de polarisation des IDCs entre 0 V et 120 V. La Figure 4 illustre les paramètres  $|S_{11}|$  mesurés d'une antenne fabriquée, pour différentes tensions de polarisation des IDCs. Dans le cas de cette antenne, l'agilité fréquentielle est de 15,4 % (de 27,1 GHz à 31,6 GHz) et les bandes passantes instantanées sont comprises entre 4,4% et 9,2%.



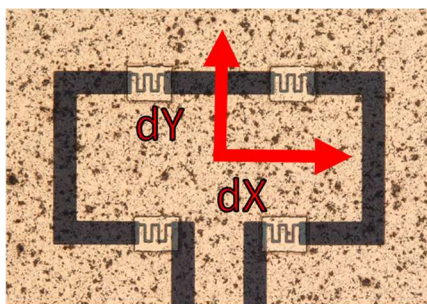
**Figure 4. Paramètres  $|S_{11}|$  mesurés de l'antenne pour différentes tensions de polarisation des IDC**

Les excursions en fréquence sont comprises entre 2,5 GHz et 4,2 GHz pour la meilleure antenne ; ces écarts d'amplitude entre les différentes antennes s'expliquent en partie par la qualité de l'alignement double face entre la fente-boucle et le patch lors de leur fabrication. Le Tableau 1 présente les décalages mesurés (microscopie optique numérique Keyence) suivant les axes présentés en

**Figure 5.**

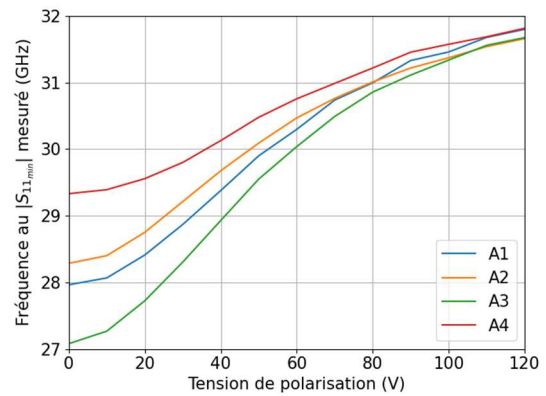
Antenne	A1	A2	A3	A4
dX [ $\mu\text{m}$ ]	105,2	70,9	56,55	225,85
dY [ $\mu\text{m}$ ]	11,85	13,05	0,8	181,4

**Tableau 1. Décalages entre les centres du patch et de la fente boucle**



**Figure 5. Axes de décalages**

La Figure 6 présente les variations en fréquences avec la tension de polarisation des IDC des antennes répertoriées dans le Tableau 1, et met en évidence l'importance de l'alignement entre les centres du patch et de la fente-boucle. Le décalage suivant dY dégrade plus l'excursion en fréquence de l'antenne qu'un décalage suivant dX, comme il peut l'être constaté en comparant les performances d'agilité des antennes A1 et A2. Cette particularité s'explique par le mode de couplage entre la fente-loop et le patch, qui est principalement magnétique, et fortement dépendant de l'alignement de la fente boucle suivant la longueur du patch [12, 13].



**Figure 6. Fréquence au minimum du  $|S_{11}|$  mesuré pour différentes tensions de polarisations des IDCs de quatre des neuf antennes réalisées**

Le Tableau 2 compare les résultats obtenus avec des travaux issus de la littérature utilisant d'autres solutions de reconfigurabilité.

	Technologie	Agilité fréquentielle	Type d'agilité
Ce travail	IDC ferroélectrique	15.3% @ 29,35 GHz	Continue
[14]	MIM ferroélectrique	10.7% @ 13.1 GHz	Continue
[4]	Condensateur MEMS	2% @ 15.9 GHz	Continue
[5]	Diode PIN	5,5 – 12,75 GHz	Discrete
[15]	MIM ferroélectrique	14,5 % @ 900 MHz	Continue

**Tableau 2. Comparaison de l'agilité fréquentielle de différentes antennes**

Les résultats obtenus démontrent le principe de reconfigurabilité fréquentielle basé sur les matériaux ferroélectriques, préalablement démontré en basses fréquences [15], mais ici dans le domaine des ondes millimétriques et avec une agilité équivalente.

En comparant l'antenne mesurée avec celle développée dans la référence [14], dont les condensateurs MIM présentent une accordabilité de 70%, notre approche offre une agilité fréquentielle environ 50% plus élevée, apportée par l'intégration des IDCs au plus près de l'élément rayonnant.

Dans [5], les diodes PIN utilisées permettent d'obtenir des agilités fréquentielles relativement fortes en modifiant les dimensions de l'élément rayonnant. Cependant, cette solution fonctionne à des fréquences inférieures, n'offre qu'un accord en fréquence discret, et requiert un circuit de polarisation DC plus puissant [6].

Le diagramme de rayonnement de l'antenne a été étudié en simulation et mesuré sous pointes sur le banc de mesures disponible à XLIM et présenté en Figure 7, pour une tension de polarisation des IDCs de 0V. Les vues en coupes de ces diagrammes sont présentées sur la Figure 8, avec les plans  $\phi = 0^\circ$  et  $\phi = 90^\circ$  correspondant, respectivement, à un plan de coupe perpendiculaire et parallèle à la ligne d'excitation CPW de l'antenne. L'allure des diagrammes atteste du rayonnement du patch sur son mode fondamental  $\text{TM}_{10}$ , et confirme l'absence de

rayonnement arrière lié à une résonance de la fente-boucle. L'efficacité de rayonnement de l'antenne extraite des simulations électromagnétiques est de 30 % lorsque la polarisation des IDCs est nulle, et s'élève à 70 % lorsque la polarisation des IDC est de 100 V. Ces valeurs sont cohérentes, compte-tenu du fait que l'antenne est miniature (les dimensions du patch sont environ  $\lambda_0/8 \times \lambda_0/9$  à 27,1 GHz).

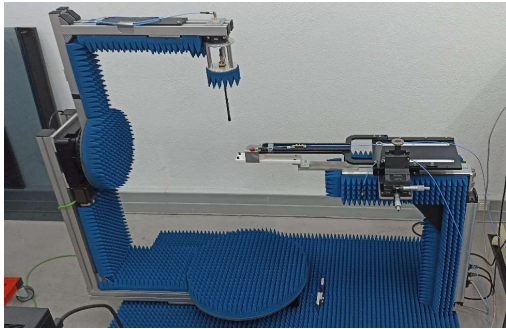


Figure 7. Banc de mesure utilisé pour l'évaluation du diagramme de rayonnement des antennes en position  $\theta = 0^\circ, \phi = 0^\circ$

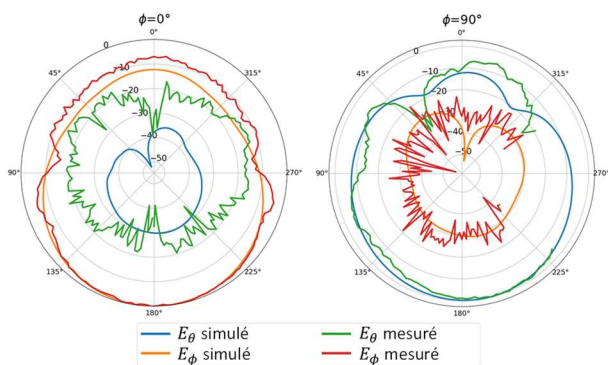


Figure 8. Diagrammes de rayonnement normalisés d'une des antennes fabriqués dans les plans  $\phi = 0^\circ$  et  $\phi = 90^\circ$ , correspondant à un plan, respectivement normal et orthogonal à la ligne d'excitation CPW de l'antenne.

#### 4. Conclusion

Nous avons réalisé et évalué les performances des IDCs intégrant des couches de BST dans le domaine des ondes millimétriques, permettant de valider expérimentalement le concept d'une antenne millimétrique reconfigurable en fréquence intégrant ce type de dispositifs. L'agilité fréquentielle obtenue autour de 29 GHz rejoint l'état de l'art sur les antennes intégrant des composants reconfigurables à base de matériaux ferroélectrique. Les travaux en cours visent la confirmation expérimentale des performances en rayonnement de l'antenne (efficacité, gain, directivité) lors de la polarisation des IDCs.

#### Références

[1] S. F. Jilani, S. M. Abbas, K. P. Esselle and A. Alomainy, «Millimeter-wave frequency reconfigurable T-shaped antenna for 5G networks» 2015 IEEE 11th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), pp. 100-102, 2015

[2] Z. Mahlaoui, E. Antonino-Daviu, M. Ferrando-Bataller, H. Benchakroun and A. Latif, «Frequency reconfigurable patch antenna with defected ground structure using varactor diodes» 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), pp. 2217-2220, 2017

[3] W. A. Awan, A. Zaidi, N. Hussain, S. Khalid, Halima and A. Baghdad, «Frequency Reconfigurable patch antenna for millimeter wave applications» 2019 2nd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET), pp. 1-5, 2019

[4] E. Erdil et al., «Frequency Tunable Microstrip Patch Antenna Using RF MEMS Technology», IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol 55, no 4, 2007

[5] A. Mittal, P. Kumar, M. Mahto, A. Dwivedi, «Frequency Reconfigurable Microstrip Rectangular Patch Antenna for Wireless Communication by Inset Feed Technique», 9th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization, 2021

[6] G. Subramanyam, M. W. Cole, N. X. Sun, T. S. Kalkur, N. M. Sbrockey, G. S. Tompa, et al., «Challenges and opportunities for multi-functional oxide thin film for voltage tunable radio frequency/microwave components», J. Appl. Phys., 114, 191301, 2013

[7] A. Crunteanu, V. Muzzupapa, A. Ghalem, L. Huitema, D. Passerieux, C. Borderon, R. Renoud, H. W. Gundel, «Characterization and Performance Analysis of BST-Based Ferroelectric Varactors in the Millimeter-Wave Domain», Crystals, vol 11, n°3, p.277, 2021

[8] M. V. Carballo, D. Borah and T. S. Kalkur, «U-Slot Dual-band Frequency Reconfigurable Patch Antenna Tuned With Commercial Ferroelectric BST capacitors» 2019 IEEE International Conference on Microwaves, Antennas, Communications and Electronic Systems (COMCAS), pp. 1-6, 2019

[9] C. Borderon, D. Averty, R. Seveno, H. W. Gundel, «Preparation and Characterization of Barium Strontium Titanate Thin Films by Chemical Solution Deposition», Ferroelectrics, 362, p.1-7, 2008

[10] A. B. Kozyrev, O. I. Soldatenkov et al., «Response time and power handling capability of tunable microwave devices using ferroelectric films», Integrated Ferroelectrics, vol 22, pp. 329-340, 1998

[11] A. Ahmed, I. A. Goldthorpe, A. K. Khandani, «Electrically tunable materials for microwave applications», J. Appl. Phys., 011302, no 2, 2015

[12] L. Giauffret, J. -. Laheurte and A. Papiernik, «Study of various shapes of the coupling slot in CPW-fed microstrip antennas», IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 45, no. 4, pp. 642-647, 1997

[13] D. M. Pozar, «Microstrip antenna aperture-coupled to a microstripline», Electronics Letters, vol 21, no 2, 1985

[14] H. Jiang, M. Patterson, C. Zhang, G. Subramanyam, «Frequency Agile Microstrip Patch Antenna Using Ferroelectric Thin Film Varactor Technology», IEEE Antennas and Propagation, pp. 1-4, 2009

[15] V. H. Nguyen, R. Benzerga, C. Borderon, S. Pavy, et al., «Antenne Notch miniature et reconfigurable à base de couches minces BST », 13<sup>ème</sup> Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux, 2014