

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département électronique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : TELECOMMUNICATION

Spécialité : Système télécommunication

Par

- **Layes Rayane**
- **BoukedjarKaouthar**

Intitulé

Etude des déphaseurs planaires à commande électronique

Soutenu le :

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M. BELAZZOUG Massinissa</i>	<i>MCB</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. MESSAOUDENE Idris</i>	<i>MCA</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. ATTOUI Aïssa</i>	<i>Dr.</i>	<i>Co-encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Mme. BENDIB Sara</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2022/2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Nous souhaitons exprimer nos sincères remerciements et notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à sa réalisation. Tout d'abord, Nous remercions infiniment Dieu le tout puissant pour la santé, la force et le courage qu'il nous a donnée tout au long de notre parcours.

*Un spécial remerciement à notre encadreur Dr. **MESSAOUDENE** pour son expertise, ses précieux conseils et son soutien constant ont été inestimables pour nous. Son engagement envers nous travail, sa patience et sa volonté de partager ses connaissances ont grandement contribué à l'élaboration de ce travail.*

*Nous remercions particulièrement notre co-encadreur Dr. **ATTOUI** pour tous les efforts fournis qui nous a apporté son aide et qui a contribué à l'élaboration de ce mémoire.*

*Nous remercions les plus vifs s'adressent aussi au Dr. **BELAZZOUG** le président du jury au Dr. **BENDIB** membre du jury d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail et l'enrichir par leurs propositions.*

Sans oublier nos familles, nos proches qui nous ont toujours encouragés au cours de la réalisation de ce mémoire.

En fin, nous sommes adressées nos remerciements à tous nos collègues, particulièrement la promotion de deuxième année Master Système de Télécommunication.

Kaouthare et Rayane

Dédicace

Je dédie cette mémoire à mes parents, qui m'ont prodigué une éducation depuis ma plus tendre enfance. Leur soutien, leurs encouragements et leur présence ont été inestimables. Mon père, mon pilier tout au long de mes études, a veillé sur moi et m'a encouragé. Ma mère, symbole de tendresse, s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite.

A mes chères sœurs Sara et Raouane et mon chère frère Salah, merci d'avoir été à mes côtés, de m'avoir soutenu et encouragé.

À mon cher amie et binôme BoukedjarKaouthare, je te remercie pour tes idées brillantes et ton soutien constant ont grandement amélioré la qualité de notre mémoire.

A mes amis : Amira, Marwa, Nada, Bouchra, Karima et ma chère Sorina et à toute ma famille.

Enfin, je souhaite adresser mes remerciements à moi-même pour ma détermination et ma persévérance. J'ai surmonté les obstacles. Cette mémoire est le reflet de ma passion et de mon engagement envers mon domaine d'étude.

Layes Rayane

Dédicace

Je dédie ce mémoire :

A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, à toi mon père « RABAH ».

*A maman « KHADIDJA » la source de ma vie,
Merci Pour son amour, ses sacrifices et son encouragement*

*A mes frères Lakhdar et nour el Houda,
Pour leurs encouragements et leur amour.*

A mon ami et mon binôme Rayane layes, merci pour son soutien, et sa compréhension tout au long de ce projet et son amitié.

*A tous mes amis et mes camarades sur tous Chaima, Hanane, Fatima,
Manel, Nada, Marwa, Bouchra, karima et à tous les membres de ma
famille.*

Boukedjar kaouthar

Table des matières

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	
Résumé	
Introduction générale.....	1
Chapitre I :.....	3
I.1 Introduction.....	4
I.2 Déphaseurs (définition)	4
I.3 Différents types des déphaseurs	4
I.3.1 Déphaseurs à base de composants intégrés des micro-systèmes électromécaniques (MEMS) :	4
I.3.2 Déphaseurs en guides rectangulaires :.....	4
I.3.3 Déphaseurs planaires :	4
I.3.3.1 Déphaseur à commande optique	5
I.3.3.2 Déphaseur coplanaire	5
I.3.4 Déphaseur micro ruban sur substrat diélectrique ferrite	5
I.3.5 Les déphaseurs micro rubans à base des cristaux liquides	5
I.3.5.1 Déphaseur à substrat évidé.....	5
I.3.5.2 Déphaseur micro ruban à accès coplanaire.....	6
I.4 Applications des déphaseurs aux réseaux d'antennes	7
I.5 Etat de l'art sur les déphaseurs.....	8
I.5.1 Déphaseur à cristaux liquides accordable en micro-ondes	8
I.5.2 Déphaseur à cristaux liquides en bande F	10
I.5.3 Un déphaseur et une antenne à faible perte basés sur une structure à surface défectueuse sur une couche de cristal liquide	12
I.5.5 Déphaseur électriquement accordable avec capacité de déphasage améliorée basée sur les cristaux liquides.....	14
I.5.7 Déphaseurs de guides d'ondes diélectriques à base de cristaux liquides en bande W	18
I.5.8 Dispositifs de déphasage à cristaux liquides dans l'environnement des rayonnements spatiaux	20
I.6 Conclusion	21
Chapitre II :	4

Conception et simulation d'une antenne patch et réseaux d'antenne à base de cristal liquide	4
II.1 Introduction	23
II.2 Présentation du logiciel de simulation (HFSS).....	23
II.3 Antenne patch microruban rectangulaire imprimée sur une cellule à cristaux liquides.....	24
II.3.1 Résultats numériques.....	27
II.3.2. Application du voltage sur le cristal liquide	27
II.3.3. Comparaison entre l'antenne avec et sans tension de polarisation.....	29
II.4 Réseau composé de quatre patches alimentés en parallèle.....	32
II.4.2 Application du cristal liquide au réseau d'antenne.....	35
II.4.3 Résultats et discussion.....	37
II.4.4 Application de la tension de polarisation du LC	38
II.5 Conclusion.....	44
Conclusion générale	45
Bibliographie.....	46

Liste des figures

Figure I. 1: a) Structure du déphaseur à substrat évidé, b) Plan de coupe AA' du déphaseur à substrat évidé.....	6
Figure I. 2: Déphaseur micro-ruban à accès coplanaires.....	7
Figure I. 3: Section transversale d'un segment de ligne CPW (à gauche) et d'un condensateur de charge (à droite) (pas à l'échelle).....	8
Figure I. 4: Vue de dessus de la structure réalisée.....	9
Figure I. 5: Paramètres S mesurés pour deux conditions de polarisation extrêmes.....	9
Figure I. 6: Déphasage différentiel extrait (gauche) et efficacité du déphaseur (à droite).....	10
Figure I. 7: Architecture de la structure du déphaseur à base de LC. (a) Structure de la cellule unitaire. (b) Vue de dessus. (c) Vue latérale.....	10
Figure I. 8: Résultats des mesures du coefficient de réflexion pour différentes tensions de polarisation. (a) Variation de l'amplitude et la fréquence (b) Variation de la phase.....	11
Figure I. 9: Résultats de la simulation du coefficient de réflexion de l'anisotropie et de l'hétérogénéité des cristaux liquides. (a) Amplitude. (b) La précision de la phase.....	12
Figure I. 10: Structure du déphaseur DGS proposé sur une fine couche de cristaux liquides de 4 μ m.	13
Figure I. 11: Structure de l'antenne patch.....	13
Figure I. 12: Diagrammes de rayonnement simulés et mesurés (a) dans le plan E, (b) dans le plan H de l'antenne patch avec le déphaseur DGS proposé.....	14
Figure I. 13 : Configuration schématique du déphaseur LC proposé basé sur l'IMSL-DGS. (a) Vue d'ensemble. (b) Vue de dessus.....	15
Figure I. 14: Résultats simulés et mesurés. (a) Coefficient de transmission. (b) Coefficient de réflexion. (c) Déphasage différentiel. (d) Déphasage par longueur d'onde. (e) Temps d'activation et de désactivation. (f) Relation entre la tension et le déphasage.....	16
Figure I. 15: Structure LCPS à ligne microruban proposée, construite à partir d'une ligne microruban chargée périodiquement par une capacité d'équivalence variable.....	17
Figure I. 16: Ampleur du champ E simulé par HFSS sur la vue transversale illustrée à la figure 1c..	18
Figure I. 17: Paramètre S du MLCPS proposé en fonction de la fréquence.....	18
Figure I. 18: Coupe transversale du déphaseur à fibre sub-longueur d'onde utilisé dans ce travail. ...	19
Figure I. 19: Déphasage simulé en fonction de la permittivité du LC GT7-29001 à deux fréquences.	19
Figure I. 20: Diagramme d'antenne simulé dans le plan E.....	20
Figure I. 21: Schéma d'un déphaseur de ligne de méandre (à gauche) et démonstrateur fabriqué par l'UNM (à droite).....	21
Figure I. 22: Résultats du paramètre S pour le déphaseur à ligne méandre.....	21
Figure II. 1: Géométrie de l'antenne, (a) vue dessus, (b) Coupe transversale.....	25
Figure II. 2: Coefficient de réflexion de l'antenne sans tension de commande.....	27
Figure II. 3: Application du voltage sur le cristal liquide V=10V).....	28
Figure II. 4: coefficient de réflexion avec tension de commande de 10V.....	29
Figure II. 5: Coefficient de réflexion avec et sans tension de commande.....	30
Figure II. 6: La comparaison entre le diagramme de rayonnement avec et sans tension de commande.....	31
Figure II. 7: Réseau linéaires de quatre patches alimentés en parallèle.....	33

Figure II. 8: coefficient de réflexion sans LC.....	35
Figure II. 9: Formule chimique du cristal liquide K 15.....	35
Figure II. 10: Dimension du déphaseur à base de cristal liquide (LC).....	36
Figure II. 11: Structure finale du réseau d'antenne avec l'intégration du déphaseur.....	37
Figure II. 12: Coefficient de réflexion (S11) du réseau d'antenne sans excitation.....	38
Figure II. 13: Application de tension (7V) sur un seul patch.....	39
Figure II. 14: comparaisant de coefficient de réflexion de chaque patch avec une tension de $V=7V$	40
Figure II. 15: Digramme de rayonnement pour degrés avec tension de commande (7 v) déférente position d'excitation des patches (1, 2, 3,4).....	41
Figure II. 16: Coefficient de réflexion pour différentes positions d'excitations.....	42
Figure II. 17: Digramme de rayonnement pour déférentes positions.....	43

Liste des tableaux

Tableau II. 1: Dimensions et paramètres des matériaux utilisés dans la conception d'antenne.....	25
Tableau II. 2: Dimensions de l'antenne patch.....	26
Tableau II. 3: Caractéristiques de cristal liquide utilisé.....	28
Tableau II. 4: Comparaison des résultats en termes de coefficient de réflexion obtenus.....	30
Tableau II. 5: Comparaison des résultats de diagramme de rayonnement obtenus.....	32
Tableau II. 6: Dimensions et paramètres des matériaux utilisés.....	33
Tableau II. 7: Dimensions de l'antenne patch.....	34
Tableau II. 8: Caractéristiques des cristaux liquides.....	36
Tableau II. 9: Valeurs optimisés des dimensions des cavités remplie avec cristal liquide.....	37
Tableau II. 10: Comparaison des résultats de coefficient de réflexion obtenus pour l'excitation du déférent patch.....	40
Tableau II. 11: Comparaison des résultats de coefficient de réflexion obtenus pour l'excitation des déférent patch.....	42
Tableau II. 12: Comparaison des résultats de diagramme de rayonnement obtenus pour l'excitation des différents patches.....	44

Liste des abréviations

LC : Cristal liquide .

HFSS : High Fréquence Structure Simulation .

DGS :Defected-ground-structure .

CPW : Coplanar waveguide .

RF : Radio fréquences .

MEMS :Microsystèmes électromécaniques .

AsGa :L'arséniure de gallium .

NLC :Cristaux liquides nématiques .

PI :Polyimide .

MIM :Métal-isolant-métal .

FoM :Facteur de Mérite .

BST :Barium strontium titanate .

PAA : Phased-Array Antenna .

MLCPS :Microstrip LineLcps Structure .

Résumé

Les déphaseurs sont essentiels pour de nombreux systèmes RF et micro-ondes. Ils ont principalement pour but de réguler la phase relative de chaque composant d'un réseau d'antennes à phase dans les systèmes radar. Nous présentons dans cette mémoire un déphaseur microstrip à base de cristaux liquides.

Ces déphaseurs fonctionnent en contrôlant l'orientation de l'anisotropie de la permittivité diélectrique des cristaux liquides (LC) avec un champ électrique, ce qui permet un contrôle externe de la phase du signal micro-ondes. Il est bien connu que la direction d'un faisceau principal peut être modifiée en modifiant les phases relatives des signaux RF alimentant l'antenne réseau.

Mots clés : Déphaseur coplanaire LC, cristaux liquides, réseau d'antenne.

Abstract

Phase shifters are essential for many RF and microwave systems. Their main purpose is to regulate the relative phase of each component of a phased-array antenna in radar systems. In this paper, we present a liquid crystal-based microstrip phase shifter.

These phase shifters work by controlling the orientation of the liquid crystal (LC) dielectric permittivity anisotropy with an electric field, allowing external control of the microwave signal phase. It is well known that the direction of a main beam can be altered by changing the relative phases of the RF signals feeding the antenna array.

Key Word : LC coplanar phase shifter, liquid Crystal, antenna array.

ملخص مغيرات الموجات ضرورية للعديد من أنظمة الراديو الفرعي والميكروويف. تهدف إلى تنظيم المرحلة النسبية لكل مكون في شبكة الهوائيات ذات المرحلة في أنظمة الرادار. نقدم في هذه الورقة العلمية مغير موجات قائم على شرائح السوائل البلورية.

تعمل هذه الأجهزة عن طريق التحكم في اتجاه السماحية الكهربائية للسوائل البلورية (LC) باستخدام حقل كهربائي، مما يسمح بالتحكم الخارجي في مرحلة إشارة المايكروويف. من المعروف جيدًا أنه يمكن تعديل اتجاه الحزمة الرئيسية عن طريق تعديل المراحل النسبية لإشارات الراديو المغذية لشبكة الهوائيات.

الكلمات الرئيسية: محول معاكس قائم على شرائح السوائل البلورية، السوائل البلورية، شبكة هوائية.

Introduction générale

Introduction générale

Ces dernières années, le domaine des micro-ondes a été marqué par une demande croissante et des avancées technologiques considérables. Dans notre société actuelle, les besoins en communication englobent la téléphonie mobile, le multimédia, l'Internet, les systèmes de positionnement, les systèmes de navigation, les télécommunications terrestres et spatiales, la télédétection, les radiomètres et même la médecine.

Les prochaines avancées technologiques dans le domaine des systèmes de télécommunication devront présenter des caractéristiques très attractives en termes de miniaturisation, de reconfigurabilité et de fiabilité, tout en réduisant les coûts de fabrication. Par exemple, les dispositifs de communication devront être capables de fonctionner simultanément selon plusieurs normes, dans le but de proposer un seul dispositif capable de gérer l'ensemble des communications. Le développement des technologies de télécommunication sans fil (telles que le Wi-Fi, le Bluetooth, les réseaux "indoor", etc.) a entraîné une augmentation de la pollution électromagnétique. Une solution pour la réduire consiste à émettre uniquement dans la direction de l'élément avec lequel on communique, ce qui permet de limiter la zone concernée par la communication et de réduire la puissance nécessaire. Dans ce contexte, les dispositifs micro-ondes jouent un rôle important, en particulier les dispositifs micro-ondes reconfigurables. Ces dispositifs sont utilisés pour les fonctions de déphasage, de filtrage et d'émission-réception des ondes électromagnétiques.

Les objectifs de ces avancées technologiques sont de diminuer les coûts de production, d'améliorer les performances et de réduire la taille des circuits.

C'est pour ça qu'on a réalisé notre travail sur «l'étude des déphaseurs planaires à commande électronique».

Le premier chapitre présente une étude théorique des différents déphaseurs déjà réalisés mais notre travail concerne les déphaseurs micro rubans à base de cristaux liquides.

Le deuxième chapitre dédié à la présentation des résultats de simulations des divers dispositifs micro-ondes, tels que l'antenne patch rectangulaire, le réseau d'antennes

imprimées, ainsi que l'application du déphaseur à base de cristal liquide dans les réseaux d'antennes.

Chapitre I :
Les déphaseurs micro ruban

I.1 Introduction

Les déphaseurs jouent un rôle essentiel dans les systèmes de communication en permettant de contrôler la phase des signaux hyperfréquences. Ils sont particulièrement importants dans les réseaux d'antennes à balayage électronique pour régler le pointage des antennes.

Ce chapitre se divise en deux parties distinctes. Premièrement, on fournit une présentation détaillée des dispositifs micro-ondes en exposant les différents types utilisés. Ensuite, on se concentre sur l'application spécifique des antennes à balayage électronique. Enfin, on procédera à une analyse approfondie des déphaseurs d'antennes à base cristal liquide, en examinant leur état actuel de développement. Cette étude vise à évaluer leurs caractéristiques ainsi que les méthodes de fabrication utilisées.

I.2 Déphaseurs (définition)

Un déphaseur est un terme couramment utilisé dans l'étude des formes d'onde et des communications de signaux pour désigner le décalage entre deux signaux lorsqu'ils se propagent dans le domaine temporel. Cela peut être causé par divers dispositifs de traitement du signal, tels que des amplificateurs électroniques ou des filtres passe-bas ou passe-haut, ce qui fait que le signal de sortie diffère de la phase d'origine du signal d'entrée.

Un déphaseur est un composant à deux ports qui peut changer la phase d'un signal RF sans l'atténuer, avec les propriétés importantes suivantes : faible perte d'insertion, amplitude constante dans tous les états de fonctionnement, réciprocité et planéité de phase sur la bande de fréquence utile. Les déphaseurs à faible perte peuvent fournir de bonnes performances tout en consommant très peu d'énergie. Dans les antennes à formation de faisceaux, une amplitude constante est requise même avec des changements de phase. [1]

I.3 Différents types des déphaseurs

I.3.1 Déphaseurs à base de composants intégrés des micro-systèmes électromécaniques (MEMS) :

La technologie MEMS, qui permet de modifier la phase des signaux entrants en modifiant leur trajet, gagne en popularité dans les systèmes à micro-ondes et à ondes millimétriques. Ce

dispositifs utilisent des structures micro-usinées et offrent plusieurs avantages par rapport aux techniques traditionnelles de déphasage. Ils sont plus légers, plus compacts et conviennent donc parfaitement aux applications portables où ayant un espace limité.

Grâce à leur temps de commutation rapide et à leur faible consommation d'énergie, ces composants sont idéaux pour les systèmes de communication à haut débit.

On peut classer les déphaseurs utilisant des composants MEMS en trois topologies différentes.[2]

- Déphaseurs à lignes commutées
- Déphaseurs à lignes chargées
- Déphaseurs en réflexion

I.3.2 Déphaseurs en guides rectangulaires :

Un déphaseur à guide d'ondes rectangulaire est un dispositif optique qui altère la phase et l'amplitude des ondes électromagnétiques dans un guide d'ondes creux rectangulaire. Il est composé de rails rectangulaires remplis d'un matériau qui modifie la phase en réponse à une tension ou à un champ électrique. Les déphaseurs permettent de contrôler la direction, l'amplitude et la polarisation des ondes électromagnétiques, ce qui les rend précieux dans divers domaines tels que la photonique, l'optique et les communications sans fil. Les guides d'ondes rectangulaires offrent des avantages significatifs pour les déphaseurs, notamment un confinement étroit des ondes électromagnétiques et une facilité de contrôle de la polarisation. [3].

On peut citer quelques types ;

- Déphaseur réciproque
- Déphaseur non réciproque
- Déphaseur conventionnel
- Déphaseur non conventionnel

I.3.3 Déphaseurs planaires :

Ils sont intégrés dans des circuits plats et ils sont fabriqués en utilisant des technologies basées sur les semi-conducteurs ou les couches minces. [4]

I.3.3.1 Déphaseur à commande optique

C'est un dispositif comprenant une ligne coplanaire avec des diodes varactors placées de manière périodique de chaque côté du ruban central[4].

I.3.3.2 Déphaseur coplanaire

Les déphaseurs coplanaires et micro-rubans sont construits à partir de lignes coplanaires, avec une impédance de 50Ω . La partie agile du déphaseur permet la propagation coplanaire et utilise un substrat isolant pour insérer un cristal liquide. Pour maintenir une impédance de 50Ω dans cette partie, la largeur du ruban central et l'espace entre les éléments sont ajustés [4].

I.3.4 Déphaseur micro ruban sur substrat diélectrique ferrite

Les déphaseurs à ferrite micro-ondes sont principalement utilisés dans les réseaux d'antennes pour orienter leurs faisceaux électroniquement.

Les déphaseurs à barreau de ferrite cylindrique (toroïdal) offrent d'excellentes performances électriques, mais ils ont un grand volume et sont difficiles à intégrer aux circuits planaires, ce qui limite leur utilisation dans les systèmes de communication sans fil. Pour résoudre ce problème, il est proposé d'utiliser des matériaux de ferrite dure (hexa ferrites) produits en couches minces pour des applications micro-ondes jusqu'au domaine millimétrique[5].

I.3.5 Les déphaseurs micro rubans à base des cristaux liquides

I.3.5.1 Déphaseur à substrat évidé

Le déphaseur est fabriqué à partir d'une ligne micro ruban imprimés sur un substrat de type ("RT/DUROÏD 6002") avec une permittivité $\epsilon_r = 2,94$ et une épaisseur de $254\mu\text{m}$. Cette ligne a une impédance caractéristique de 50Ω à l'origine. Pour confiner le cristal liquide, une cavité de $150\mu\text{m}$ de hauteur, 2mm de largeur et 10mm de longueur a été usinée localement sous le

ruban. Le cristal liquide est encapsulé par un plan de masse en cuivre maintenu mécaniquement, comme illustré dans les figures I.1 a et b. La commande de cette structure se fait en appliquant un champ magnétique permanent. [6]

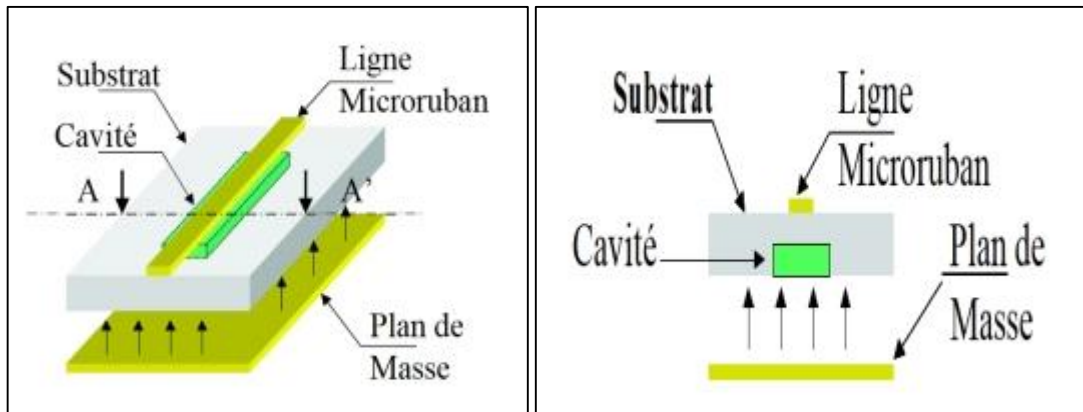


Figure I. 1: a) Structure du déphaseur à substrat évidé, b) Plan de coupe AA' du déphaseur à substrat évidé. [6]

I.3.5.2 Déphaseur micro ruban à accès coplanaire

Une structure spécifique a été développée pour maintenir une impédance de 50Ω dans la partie ajustable d'un déphaseur. Cette structure comprend un capot métallique supérieur formant une cavité dans laquelle un cristal liquide est inséré par capillarité, comme le montre la figure 6. Pour optimiser le comportement électromagnétique, l'espace entre les éléments de la structure est augmenté. La largeur du ruban central par rapport à la hauteur de la cavité est

ajustée pour favoriser le confinement du champ électromagnétique dans le cristal liquide anisotrope tout en maintenant l'impédance de 50Ω . La permittivité du substrat a peu d'impact sur la partie active du déphaseur. La tension de commande peut être réduite en diminuant la hauteur de la cavité, ce qui a également un effet sur les temps de réponse. Le remplissage en cristal liquide requis est relativement faible, et la technologie de fabrication du déphaseur à ruban microstrip à accès coplanaire est généralement simple, avec la réalisation de la cavité dans le capot supérieur étant la partie la plus complexe. [4]

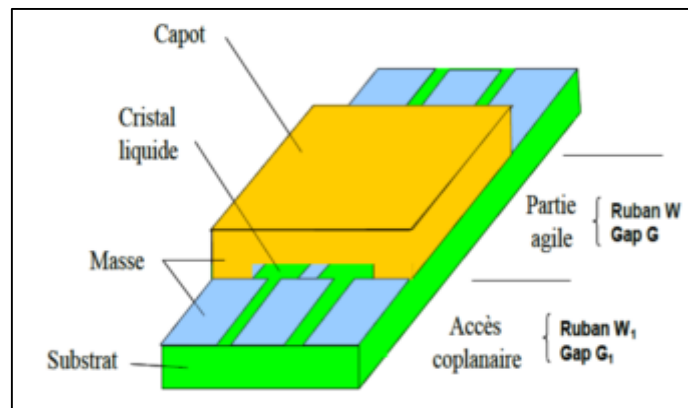


Figure I. 2: Déphaseur micro-ruban à accès coplanaires. [4]

I.4 Applications des déphaseurs aux réseaux d'antennes

Les déphaseurs sont utilisés dans les réseaux d'antennes actives, les antennes intelligentes et les antennes à balayage électronique. Leur fonction consiste à ajuster la phase du signal qui alimente chaque antenne du réseau, ce qui permet de diriger le faisceau dans la direction souhaitée grâce à un contrôle électronique.

Malgré leurs inconvénients (le coût élevé, la taille et la complexité de leur système de commande) les déphaseurs agiles à base de ferrites ont été utilisés dans des systèmes militaires. Des composants actifs basés sur l'arséniure de gallium (AsGa) et les systèmes micro-électro-mécaniques (MEMS) ont également été utilisés pour des fonctions similaires, mais leur coût élevé limite actuellement leur utilisation dans les antennes actives. Le développement des déphaseurs agiles plus petits, à commande électrique permet d'intégrer cette fonctionnalité dans des systèmes embarqués.

Dans le domaine civil, le faisceau des antennes trouve des applications dans des réseaux locaux sans fil tels que les WLANs. Dans ces réseaux, l'utilisation de filtrage spatial pourrait améliorer les capacités de traitement de l'information en séparant le signal utile des interférences en fonction de leur angle d'arrivée.

Les fabricants d'équipements satellitaires sont également intéressés par les déphaseurs agiles. Ils cherchent à réduire le poids, la consommation d'énergie et les coûts, qui sont trois critères

majeurs pour ce type d'applications. En particulier, dans les bandes X et Ka, il y a une demande croissante de déphaseurs agiles compacts offrant une forte linéarité [7].

I.5 Etat de l'art sur les déphaseurs

I.5.1 Déphaseur à cristaux liquides accordable en micro-ondes

Le déphaseur accordable proposé par F. Goelden et al., [8] est basé sur une ligne de transmission à charge périodique qu'est réalisée en utilisant des lignes CPW comme segments de ligne non accordables et des condensateurs à plaques parallèles remplis de LC (cristal liquide) comme élément accordable. La couche de LC est contenue entre deux substrats en silice fondue ($\epsilon_r = 3.8$, $\tan\delta = 10^{-4}$, épaisseur 300 μm).

La figure 3 présente une coupe transversale des segments de ligne CPW utilisés dans la structure. Les électrodes en or ont une épaisseur de 1,5 μm . Les électrodes supérieures externes n'ont pas de signification électrique, mais elles servent de support mécanique pour maintenir une épaisseur constante de la cavité. Des entretoises sphériques sont réparties uniformément sur le substrat avec une densité d'environ 5/mm², sans affecter le champ RF.

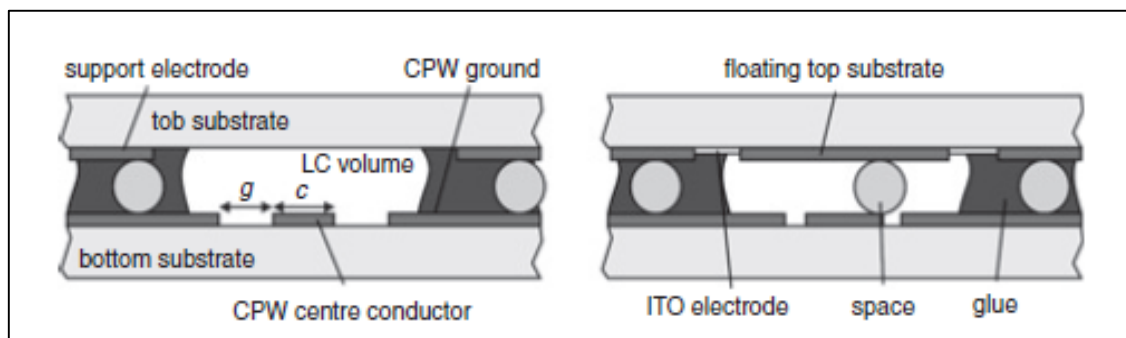


Figure I. 3: Section transversale d'un segment de ligne CPW (à gauche) et d'un condensateur de charge (à droite) (pas à l'échelle). [8]

La figure I.4 présente une vue de dessus de la structure. L'électrode supérieure flottante, située sur le substrat supérieur, joue le rôle d'électrode de support. Pour modifier l'orientation des molécules de LC, une tension de polarisation est appliquée à l'électrode supérieure flottante via une ligne de polarisation dédiée. Cette ligne de polarisation a une largeur de 10 μm et est composée d'oxyde d'indium et d'étain transparent, avec une résistance de feuille de plusieurs 10 $\text{k}\Omega/\square$.

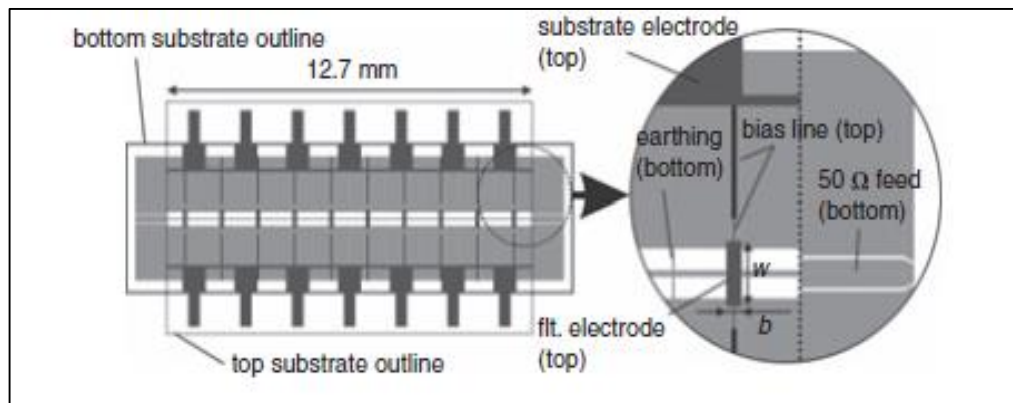


Figure I. 4: Vue de dessus de la structure réalisée. [8]

La figure I.5 montre les paramètres de diffusion mesurés pour l'état accordé et l'état non accordé.

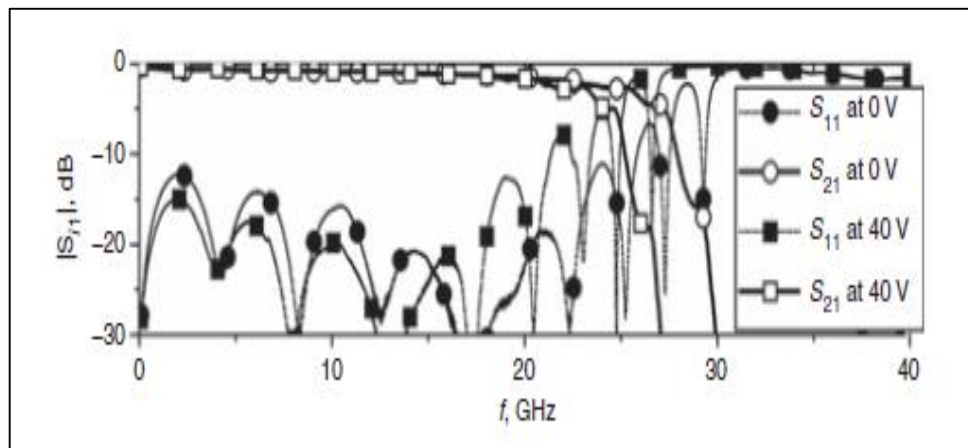


Figure I. 5: Paramètres S mesurés pour deux conditions de polarisation extrêmes. [8]

La figure I.6 illustre le déphasage différentiel maximal $\Delta\Phi$ et l'efficacité du déphaseur, η_{PS} , qui est définie comme $\Delta\Phi$ divisé par l'affaiblissement d'insertion maximal. Il est évident que le critère de conception $\Delta\Phi \geq 90^\circ$ est respecté et que l'efficacité maximale η_{PS} est supérieure à 608/dB.

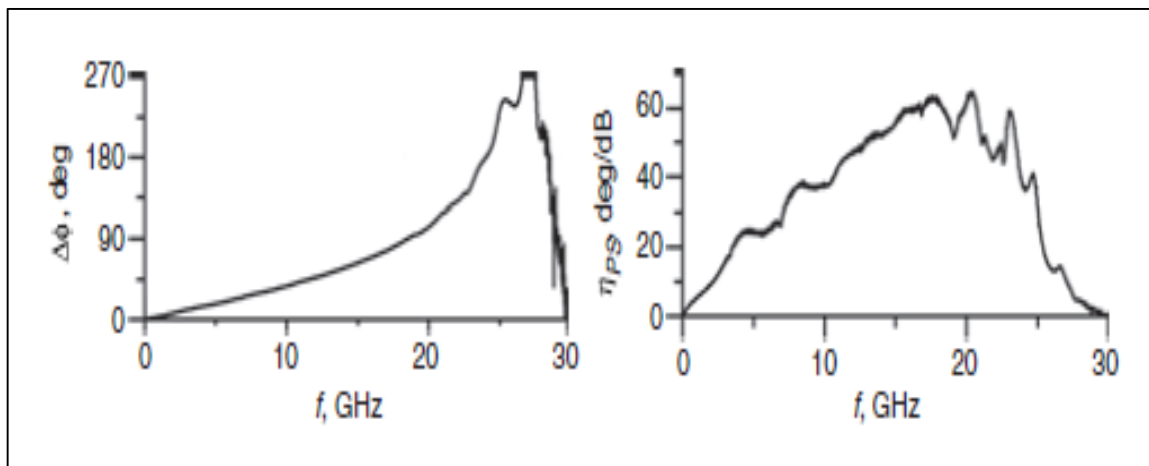


Figure I. 6: Déphasage différentiel extrait (gauche) et efficacité du déphaseur (à droite). [8]

I.5.2 Déphaseur à cristaux liquides en bande F

Dans la référence [9], Shuang-Yuan Sun et al. ont proposé un déphaseur en bande F basé sur les cristaux liquides nématiques (NLC). La Figure I.7 (a) montre un déphaseur LC en THz constitué d'une structure en sandwich avec du quartz en haut comme substrat supérieur et du cristal liquide (LC) sur le plancher métallique comme substrat diélectrique, Une couche de polyimide (PI) est filée sur la surface inférieure de la structure métallique du dipôle supérieur et sur la surface supérieure du plancher métallique pour contrôler l'orientation des molécules de LC. les figures I.7 (b) et (c) indiquent les paramètres spécifiques de la cellule unitaire à déphasage.

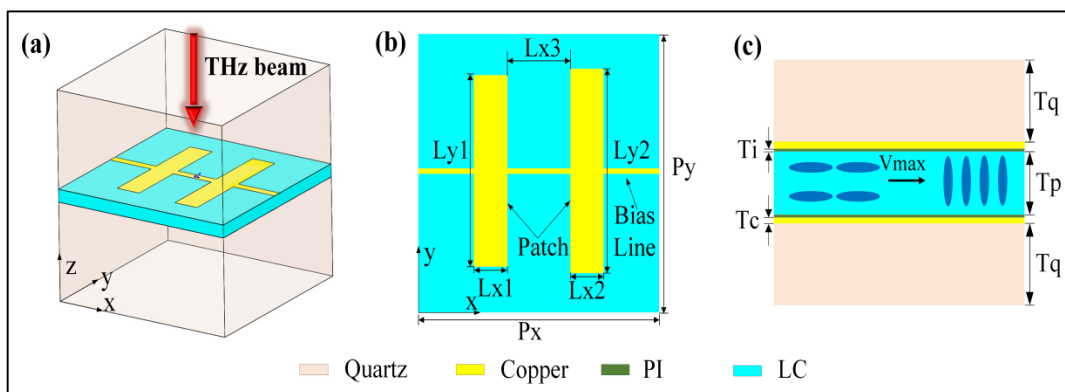


Figure I. 7: Architecture de la structure du déphaseur à base de LC. (a) Structure de la cellule unitaire. (b) Vue de dessus. (c) Vue latérale. [9]

La figure I.8 présente les résultats de mesures du coefficient de réflexion d'un déphaseur à double dipôle à différentes tensions de polarisation. Cependant, les résultats montrent que les largeurs de bande et le déphasage du dispositif sont réduits.

La figure I.8 (a) présente les mesures de l'amplitude et de la phase de l'onde réfléchie du déphaseur à double dipôle sous une tension de polarisation allant de 0 à 20 V, les résultats montrent que la fréquence de résonance varie de 103,2 GHz à 93,5 GHz.

La courbe de déphasage dans la figure I.8 (b) indique que le déphaseur produit un déphasage supérieur à 300° dans la plage de fréquences de 103,5 à 106,1 GHz, atteignant un maximum de $350,7^\circ$ à 104,2 GHz.

La figure I.8 (c) montre le déphasage sous différentes tensions de polarisation à trois fréquences. Premièrement, des erreurs dimensionnelles peuvent survenir lors du traitement de l'échantillon. Deuxièmement, la simulation ne prend pas en compte de manière précise l'anisotropie et l'inhomogénéité de la LC. De plus, la répartition inégale du champ électrostatique résultant d'une couverture partielle des patches dipolaires sur la surface de la LC peut entraîner une non-uniformité et une erreur de simulation de la phase.

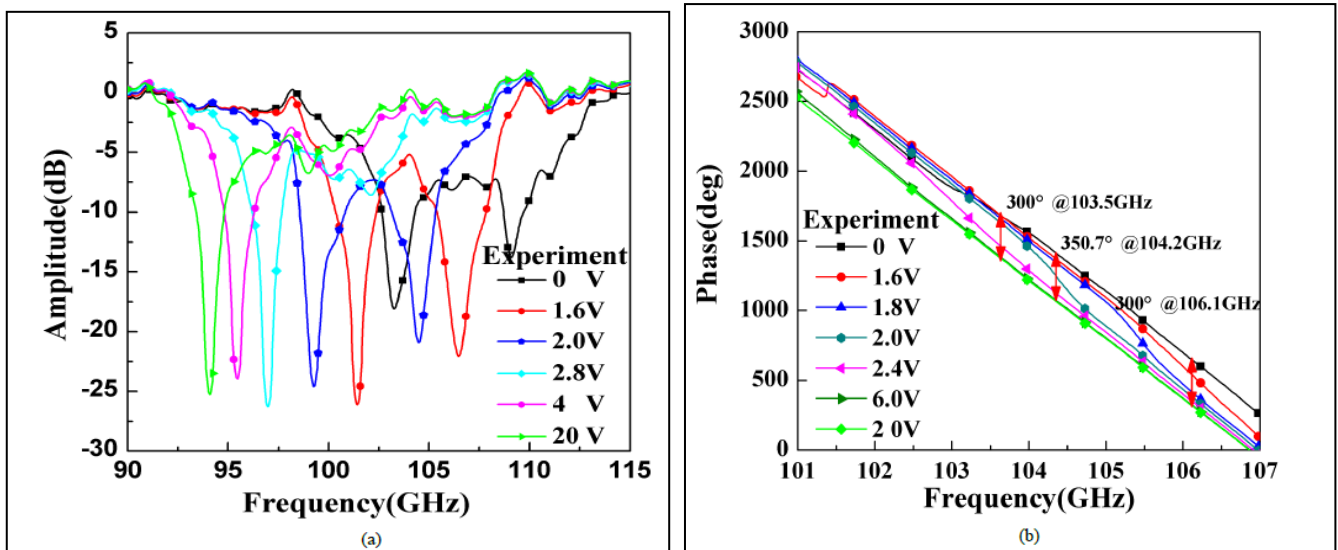


Figure I. 8: Résultats des mesures du coefficient de réflexion pour différentes tensions de polarisation. (a) Variation de l'amplitude et la fréquence (b) Variation de la phase. [9]

Lafigure I.9 met en évidence les effets de l'anisotropie et de l'inhomogénéité du cristal liquide sur la plage de réglage de son constant diélectrique. Les points de résonance du modèle amélioré se situent entre ceux du modèle commun, ce qui indique une plage de réglage plus restreinte de la constante diélectrique des cristaux liquides, entraînant une erreur de déphasage. Le déphasage maximal du modèle amélioré est de 398° à $100,8\text{ GHz}$, avec une erreur de phase de 118° causée par l'anisotropie et l'inhomogénéité de la couche LC par rapport au modèle commun. En comparant le modèle précis avec les résultats expérimentaux, une erreur de phase de $-47,3^\circ$ est obtenue.

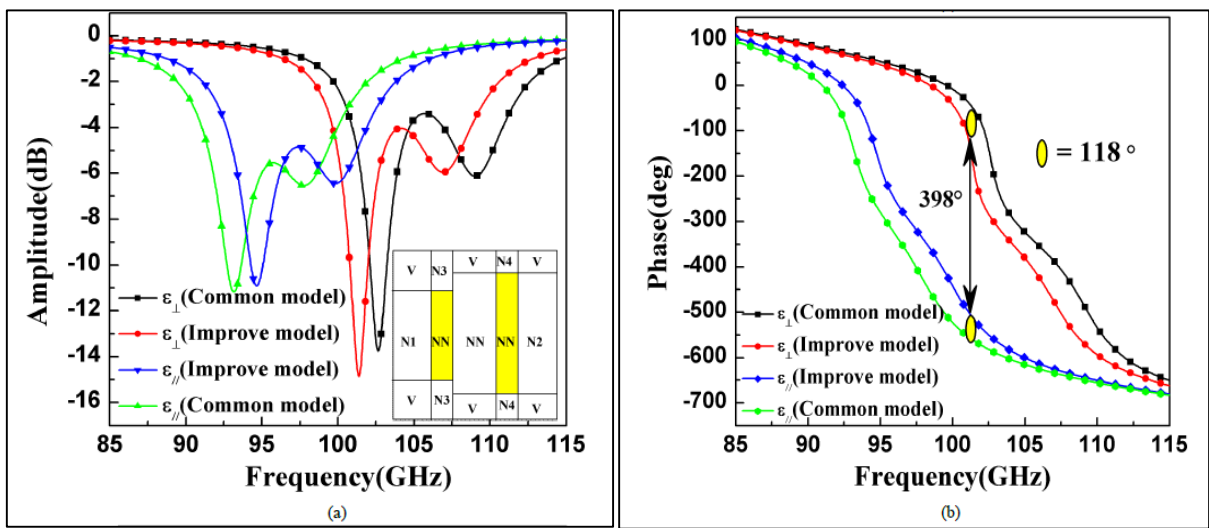


Figure I. 9: Résultats de la simulation du coefficient de réflexion de l'anisotropie et de l'hétérogénéité des cristaux liquides. (a) Amplitude. (b) La précision de la phase. [9]

I.5.3 Un déphaseur et une antenne à faible perte basés sur une structure à surface défectueuse sur une couche de cristal liquide

En [10], Les autours ont proposé un déphaseur à cristaux liquides (LC) en utilisant une ligne de transmission à structure de plan de masse défectueux DGS (defected-ground-structure) sur une couche LC de $4\mu\text{m}$ d'épaisseur, en supprimant partiellement le plan de masse de manière périodique, il est possible d'obtenir une impédance de 50 ohms avec un processus de fabrication de PCB standard. La structure finale est illustrée dans la figure I.10.

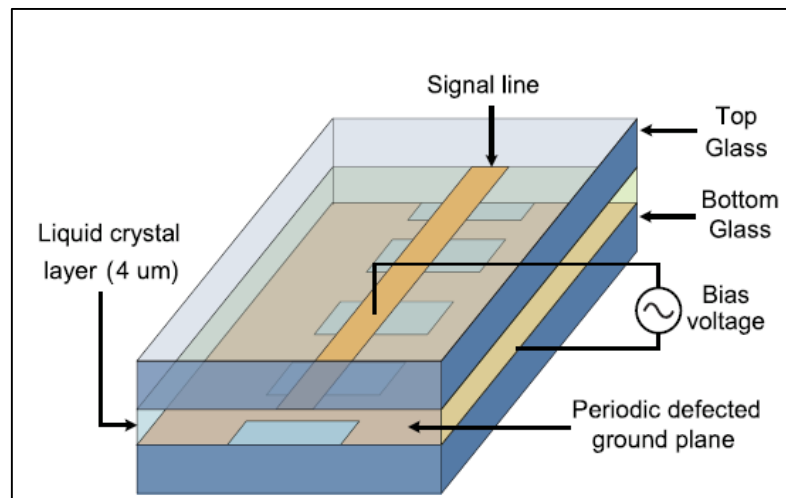


Figure I. 10: Structure du déphaseur DGS proposé sur une fine couche de cristaux liquides de 4μm. [10]

Un déphaseur DGS(defected-ground-structure)est proposé et combiné avec une antenne patch fonctionnant à 18 GHz pour les communications par satellite, présentée dans la figure I.11. Le déphaseur présente un FoM (figure of merit) supérieur à 50 à cette fréquence.

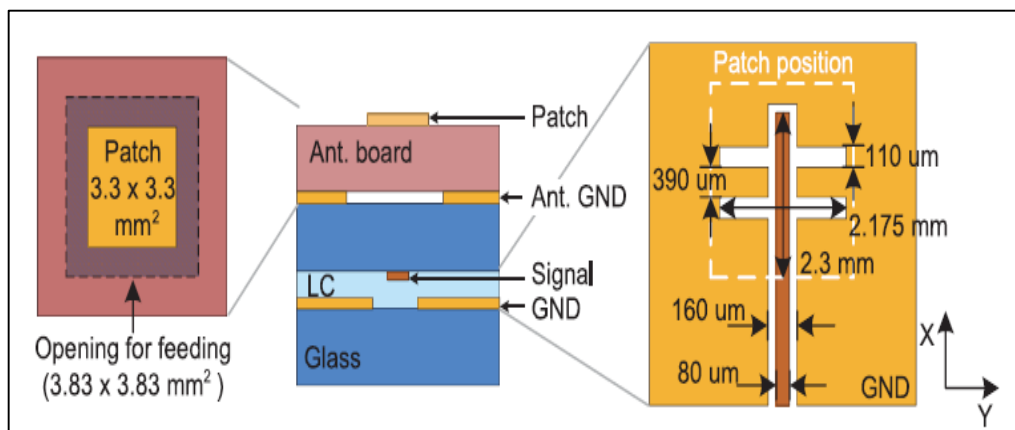


Figure I. 11: Structure de l'antenne patch. [10]

Le déphaseur DGS, qui est une spirale rectangulaire avec un réseau d'alimentation couplé, a une longueur de 4 cm et fournit un déphasage de 360 degrés à fréquence I.18 GHz.

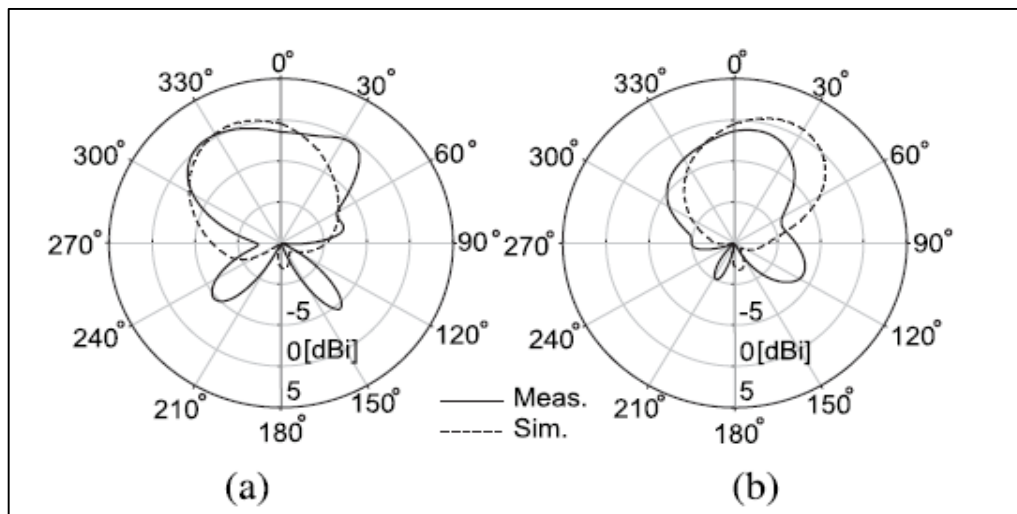


Figure I. 12: Diagrammes de rayonnement simulés et mesurés (a) dans le plan E, (b) dans le plan H de l'antenne patch avec le déphaseur DGS proposé. [10]

L'antenne patch et le déphaseur DGS proposés peuvent servir d'éléments unitaires à faible coût et à faibles pertes pour les réseaux à commande de phase et les systèmes RIS avec contrôle continu de la phase. Cet élément unitaire peut servir de base aux antennes réseau à phase $N \times N$ et aux systèmes RIS.

I.5.5 Déphaseur électriquement accordable avec capacité de déphasage améliorée basée sur les cristaux liquides

Dans la référence [11], Qipeng Wang et al. ont proposé un déphaseur électriquement accordable avec une capacité de déphasage améliorée par longueur d'onde est proposé sur la base de cristaux liquides (LC), ce déphaseur est illustré dans la figure I.13 comprend des structures de transition et est constitué de deux couches de substrat et de deux couches métalliques.

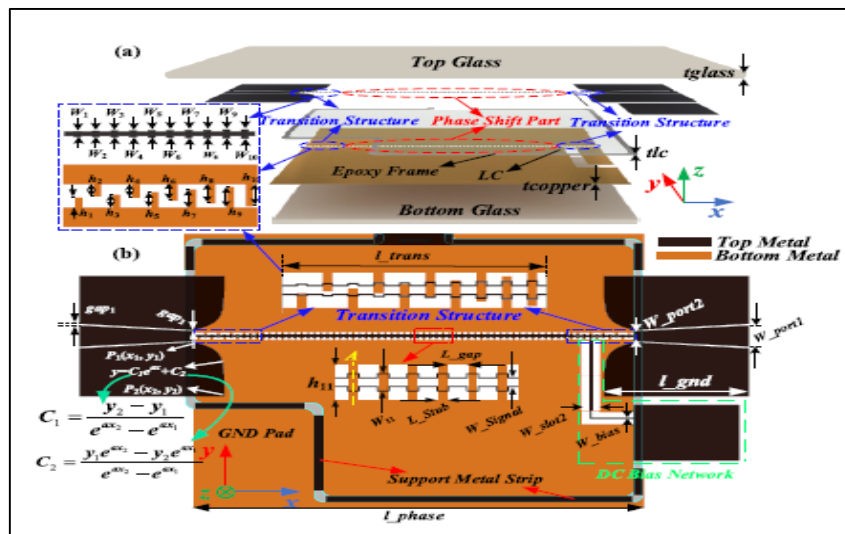


Figure I. 13 : Configuration schématique du déphaseur LC proposé basé sur l'IMSL-DGS. (a) Vue d'ensemble. (b) Vue de dessus. [11]

Les figures I.14(a) et (b) présentent les résultats de simulation (avec HFSS) et de mesure (avec un analyseur de réseau vectoriel Agilent) des paramètres S du déphaseur sous différentes tensions de polarisation. Les coefficients de transmission sont supérieurs à -6 dB et les coefficients de réflexion peuvent être maintenus en dessous de -10 dB entre 9 et 15 GHz. Les points de résonance à des fréquences spécifiques, tels que 8,53 GHz et 16,39 GHz, sont introduits par la ligne de polarisation proposée.

La figure I.14(c) affiche le déphasage différentiel maximal de 401° et supérieure à 67°/dB à 15 GHz. Le déphasage par longueur d'onde de la partie de déphasage et des parties de transition à 15 GHz est de 365°/λ₀, comme illustré dans la figure I.14(d).

Les temps de réponse du déphaseur sont de t_{on} = 76 ms de 0 à 6 V et de t_{off} = 190 ms de 6 à 0 V, comme indiqué dans la figure I.14(e). La relation entre la tension appliquée et l'angle de déphasage est représentée dans la figure I.14(f).

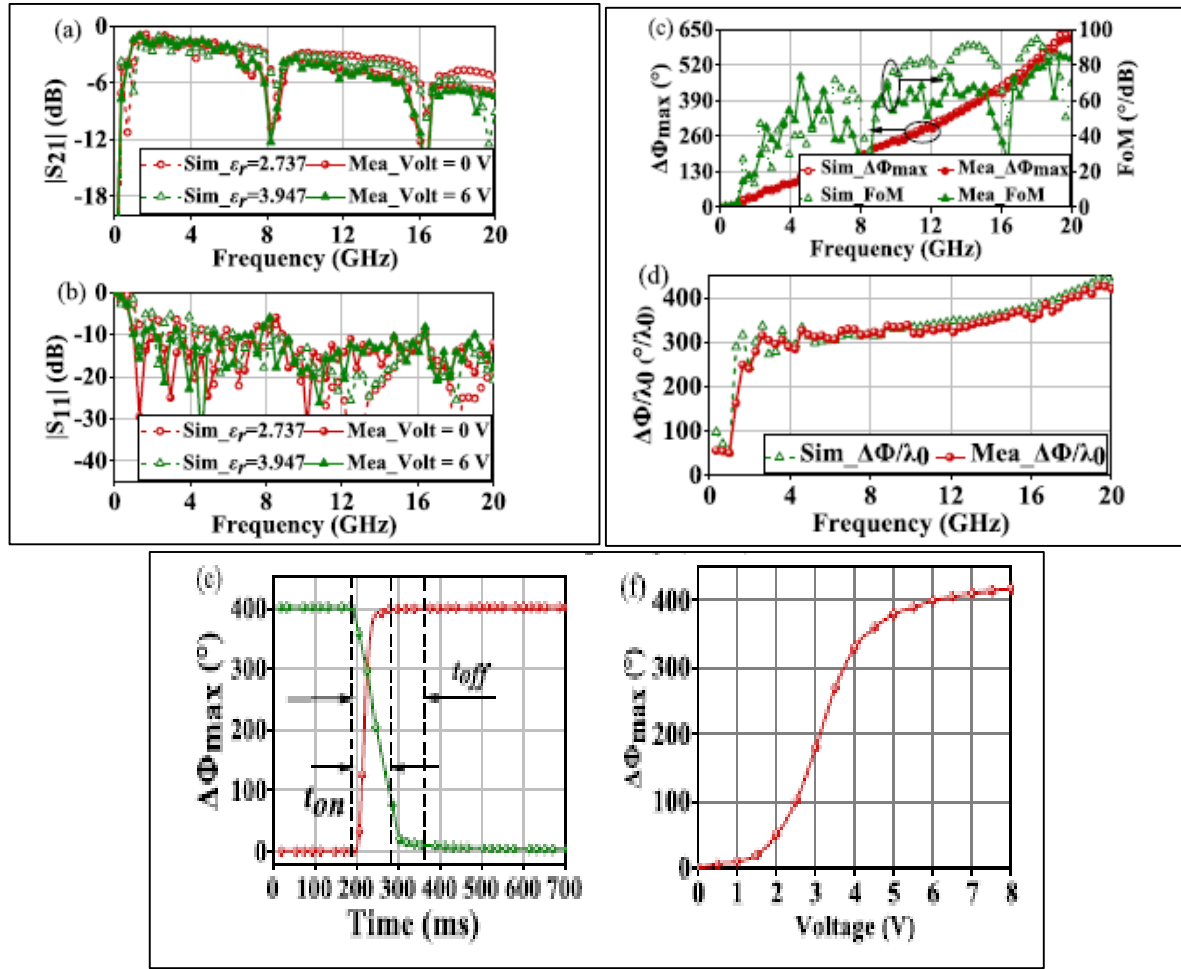


Figure I. 14: Résultats simulés et mesurés. (a) Coefficient de transmission. (b) Coefficient de réflexion. (c) Déphasage différentiel. (d) Déphasage par longueur d'onde. (e) Temps d'activation et de désactivation. (f) Relation entre la tension et le déphasage. [11]

I.5.6 Déphaseur de phase à cristaux liquides à haute FOM

Une structure basée sur la technologie des cristaux liquides (LC) est proposée en [12] pour obtenir un déphaseur à haut facteur de mérite (FOM) qui fonctionne à des fréquences inférieures à 6 GHz. Une approche systématique basée sur un modèle de circuit de ligne de transmission et sur la théorie de la structure périodique est une méthode rapide pour l'optimisation de la conception en utilisant les logiciels ADS et HFSS.

Dans la figure I.15(a), le MLCPS (MICROSTRIP LINE LCPS STRUCTURE) est un composant à deux ports, qui se compose d'une ligne de transmission microruban principale chargée d'un stub de dérivation, créant une structure périodique avec 80 cellules unitaires pour atteindre un déphasage de 360°. La cellule unitaire MLCPS aux dimensions spécifiées est montrée en vue de dessus à la figure I.19 b, et de la section transversale à la figure I.19 c.

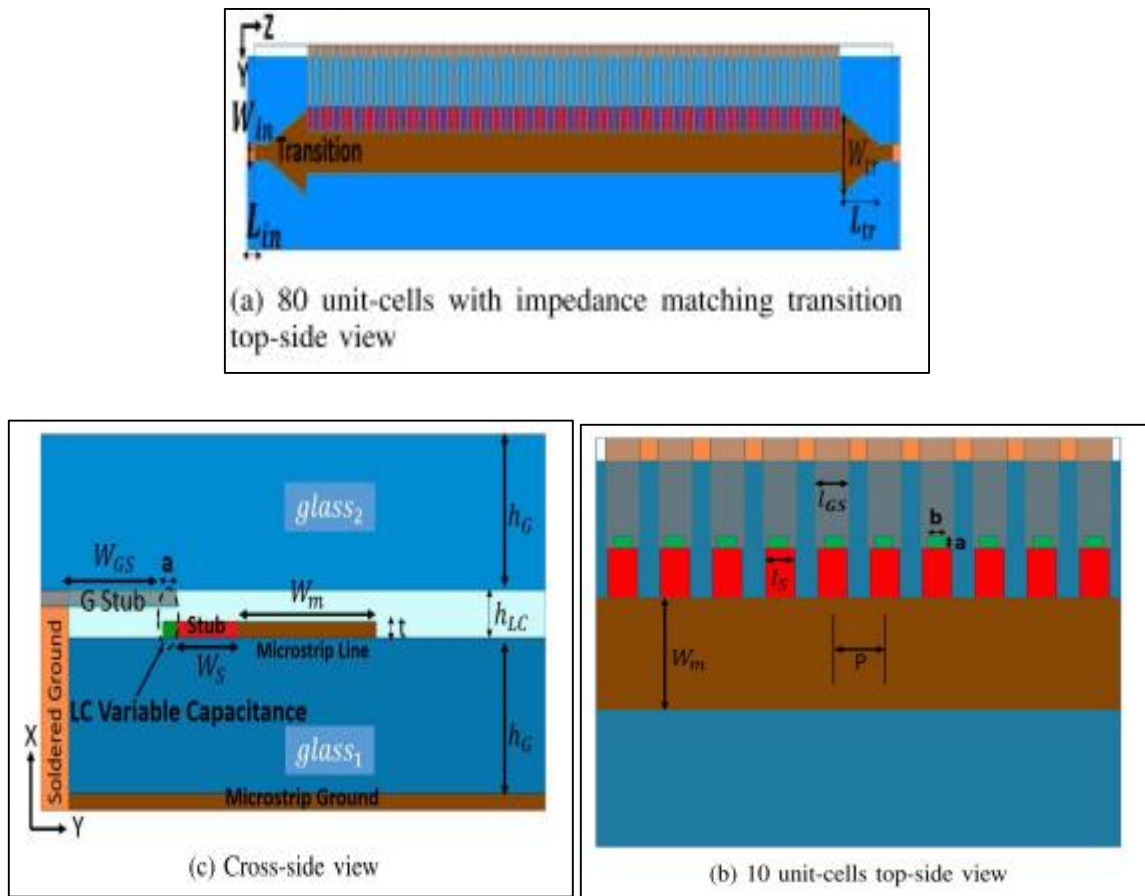


Figure I. 15: Structure LCPS à ligne microruban proposée, construite à partir d'une ligne microruban chargée périodiquement par une capacité d'équivalence variable. [12]

Dans la figure I.16, le paramètre du champ E du MLCPS est calculé en fonction de la fréquence à l'aide de la simulation HFSS et le modèle de circuit ADS.

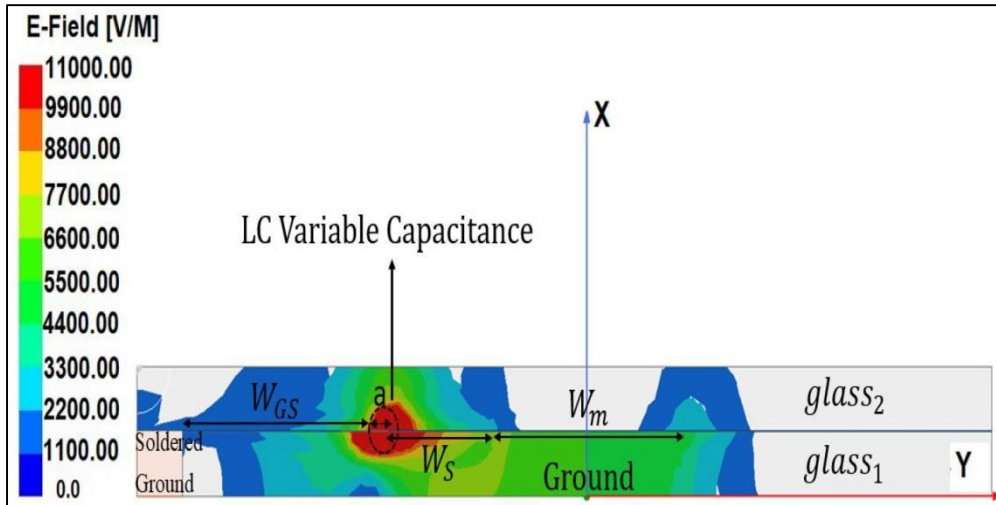


Figure I. 16: Amplitude du champ E simulé par HFSS sur la vue transversale illustrée à la figure 1c. [12]

Dans la figure I.17, le paramètre S du MLCPS en fonction de la fréquence est déterminé à l'aide de HFSS et du modèle de circuit ADS.

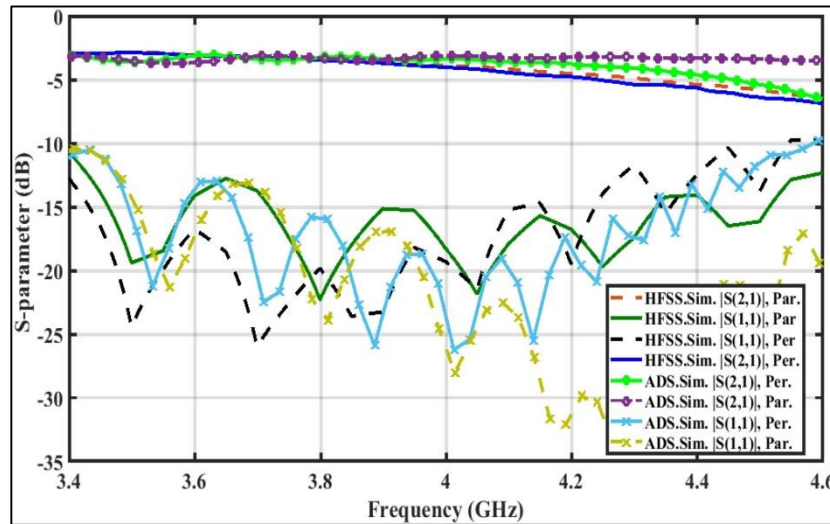


Figure I. 17: Paramètre S du MLCPS proposé en fonction de la fréquence. [12]

I.5.7 Déphaseurs de guides d'ondes diélectriques à base de cristaux liquides en bande W

Dans l'article [13], des déphaseurs sont conçus comme des éléments centraux et utilisent des fibres partiellement remplies d'un cristal liquide micro-onde synthétisé, comme le montre la

figure I.18. Ces déphaseurs présentent un facteur de mérite maximal (FoM) de $145^\circ/\text{dB}$ à la fréquence 102,5 GHz. Pour valider le concept, un réseau de polarisation électrique simplifié est développé, montrant sa capacité à orienter le faisceau en modifiant l'angle de balayage entre les extrémités de la fibre, avec différentes distributions de tension. Le réseau d'antennes présente une adaptation satisfaisante sur toute la bande W, avec une réflexion inférieure à -10 dB. Le gain mesuré de l'antenne varie entre 11,5 et 9,1 dBi à 85 GHz, avec un niveau de lobe latéral compris entre -12 et -10 dB, en fonction de la configuration d'orientation.

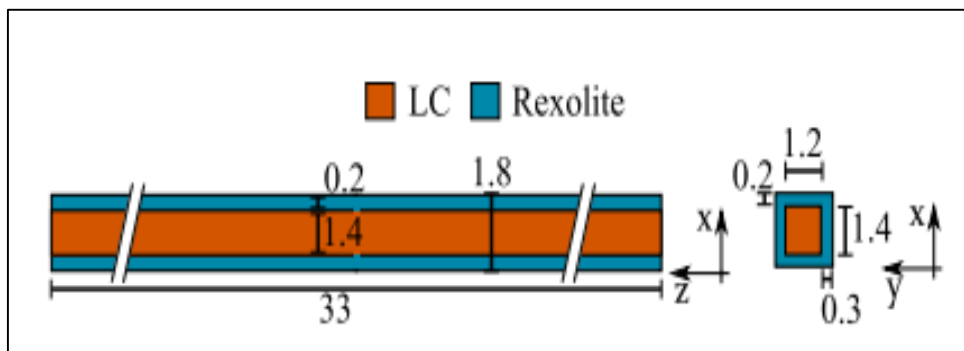


Figure I. 18: Coupe transversale du déphaseur à fibre sub-longueur d'onde utilisé dans ce travail. [13]

Le comportement simulé de la phase différentielle en fonction de la permittivité du LC est représenté dans la figure I.19 pour 85 et 95 GHz, respectivement. Si l'anisotropie de $\Delta\epsilon_r = 1,08$ peut être pleinement exploitée, un déphasage maximal de 680° est possible, alors qu'avec une efficacité d'accord réduite, par exemple avec une anisotropie effective de $\Delta\epsilon_r = 0,6$ seulement, le déphasage maximum serait réduit à 360° .

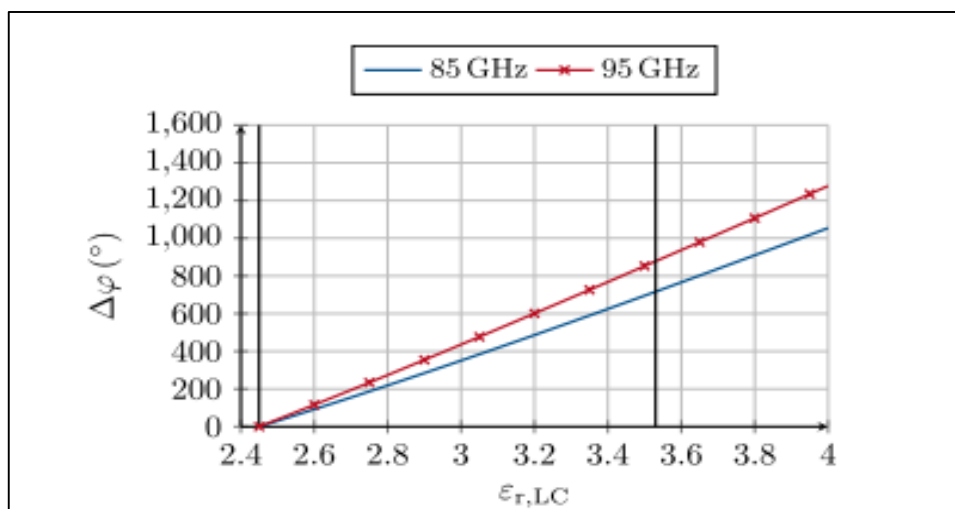


Figure I. 19: Déphasage simulé en fonction de la permittivité du LC GT7-29001 à deux fréquences. [13]

D'après la figure I.20, on peut voir que le couplage en champ proche entre les éléments de l'antenne n'est visible que pour les basses fréquences seule une dégradation du diagramme de 3dB est visible. L'antenne a été excitée dans les simulations à la position du cône diélectrique à l'intérieur du guide d'ondes.

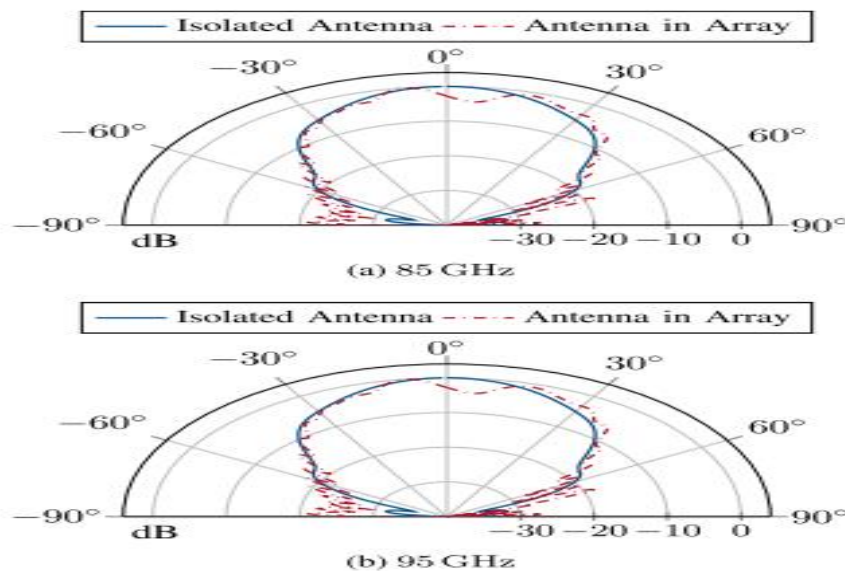


Figure I. 20: Diagramme d'antenne simulé dans le plan E. [13]

I.5.8 Dispositifs de déphasage à cristaux liquides dans l'environnement des rayonnements spatiaux

En 2015, Christopher D. Woehrle et al, ont proposé un déphaseur accordable pour la bande Ka est discuté et décrit en détail en termes de performance et d'efficacité [14]. L'accent est mis sur les performances des cristaux liquides en laboratoire dans des conditions de rayonnement spatial laboratoire, y compris les effets de la charge de surface, des rayons X et des rayons gamma. Les résultats des tests suggèrent que les cristaux liquides résistent bien aux effets néfastes de l'environnement radiatif de l'espace.

Le déphaseur à base de LC est présenté à la figure I.21. La cellule se compose de trois couches (plan de masse, cavité LC et substrat supérieur), où chaque couche est collée et scellée par une résine époxy. Une tension maximale de 30 V a été appliquée au dispositif, ce qui correspondait à une orientation de toutes les molécules LC égale à $\epsilon_r \parallel$.

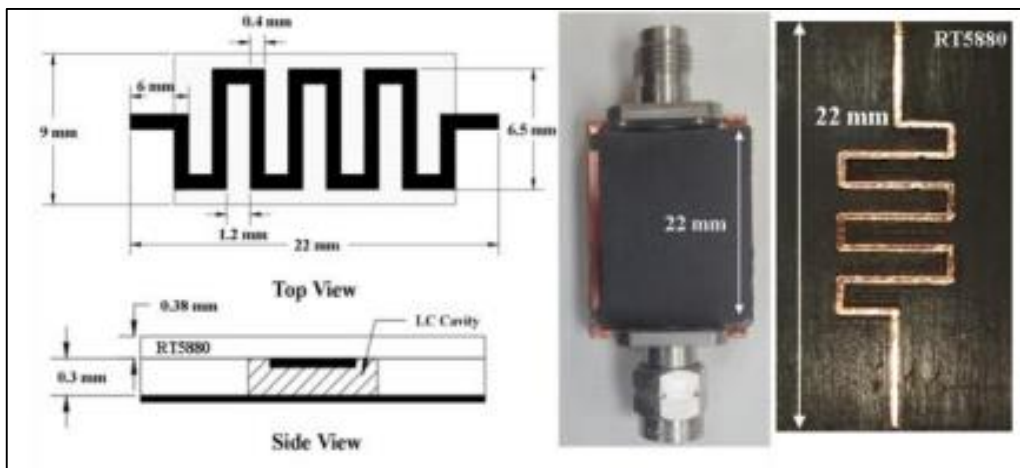


Figure I. 21: Schéma d'un déphaseur de ligne de méandre (à gauche) et démonstrateur fabriqué par l'UNM (à droite). [14]

Comme on peut le voir sur la figure I.22, la ligne de méandre présente une perte de transmission relativement importante (S_{21}) de -8dB à -16dB sur toute la largeur de bande opérationnelle du dispositif. L'importance de l'affaiblissement associé au dispositif n'est pas surprenante, car le dispositif a une grande longueur de ligne effective qui interagit avec la bande passante du dispositif

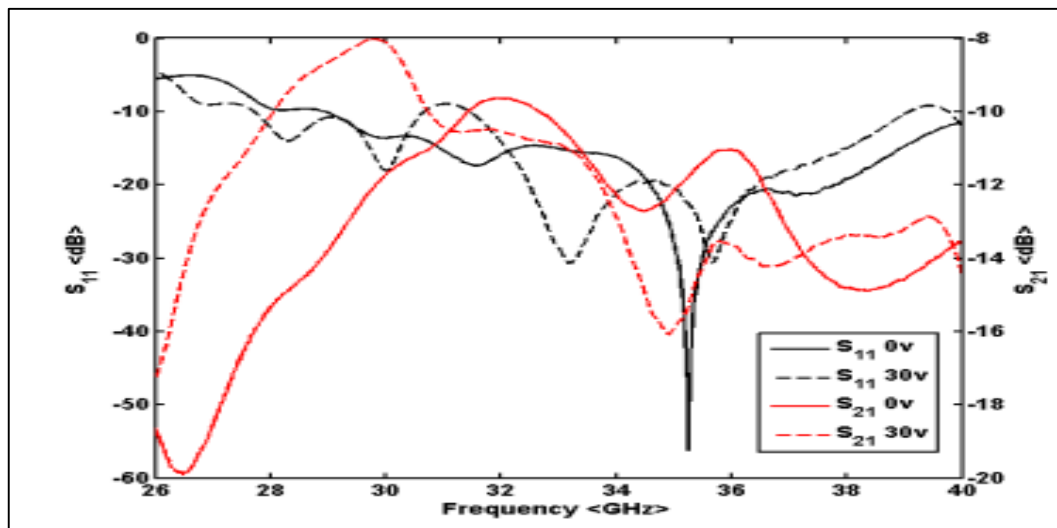


Figure I. 22: Résultats du paramètre S pour le déphaseur à ligne méandre. [14]

I.6 Conclusion

Ce chapitre explore l'utilisation des déphaseurs micro ruban à base de cristaux liquides dans les circuits agiles en fréquence tels que les filtres, les déphaseurs et les antennes. Les cristaux liquides, couramment utilisés dans les écrans, présentent des avantages intéressants pour les

applications micro-ondes, tels qu'un faible champ électrique de commande, une dépendance limitée de la permittivité avec la température et de faibles pertes diélectriques. Cependant, en raison de leur anisotropie diélectrique micro-onde, ils sont mieux adaptés aux fréquences millimétriques. Dans cette gamme de fréquences, les pertes diélectriques des couches minces ferroélectriques sont plus importantes. En conclusion, les déphaseurs micro rubans à base de cristaux liquides offrent des perspectives intéressantes pour les applications micro-ondes, notamment dans la gamme des fréquences millimétriques.

Chapitre II :

Conception et simulation d'une antenne
patch et d'un réseau d'antenne à base du
cristal liquide

II.1 Introduction

Les déphaseurs sont de plus en plus développés pour diverses applications, notamment dans les systèmes d'orientation des faisceaux électroniques à réseau phasé et les communications sans fil à haute vitesse. Contrairement aux techniques existantes qui offrent une modulation rapide mais limitée en résolution, les cristaux liquides présentent une accordabilité diélectrique intéressante. Grâce à leur anisotropie moléculaire, ces cristaux liquides permettent une variation du moment dipolaire en réponse à un champ de polarisation, ce qui permet un réglage continu de la constante diélectrique et un déphasage différentiel lors de l'application d'une tension de polarisation.

Dans ce chapitre, on propose de valider les résultats de la référence [16] et [17], en simulant les structures présentées dans ces articles via le logiciel HFSS. De plus, on effectue également une amélioration, et une étude paramétrique pour déterminer les performances des déphaseurs à base de cristal liquide pour les réseaux d'antennes.

II.2 Présentation du logiciel de simulation (HFSS)

Le logiciel HFSS (High Fréquence Structure Simulation) est un simulateur électromagnétique haut performance pour les modèles 3D. Il intègre des simulations, des visualisations et une interface pour résoudre rapidement et efficacement les problèmes électromagnétiques en 3D. Sa formule mathématique est basée sur la méthode des éléments finis. Cette méthode divise souvent l'espace de résolution du problème en plusieurs millions de régions plus petites et représente le champ de chaque sous-région (chaque élément) par une fonction locale.

Elle permet de créer des graphiques efficaces pour fournir aux utilisateurs des réponses et une compréhension claire des problèmes électromagnétiques en trois dimensions. Le calcul de paramètres tels que le paramètre S, les fréquences de résonance et les champs peut être effectué à l'aide du HFSS.

Il s'agit d'un outil permettant de calculer :

- Le comportement électromagnétique d'une structure.
- Le simulateur dispose d'outils de post-traitement pour une analyse plus approfondie.

- Il permet de calculer les quantités de base dans les champs proche et lointain, les impédances de port caractéristiques et leurs constantes de propagation, ainsi que les paramètres S normalisés par rapport à une impédance de port particulière afin de produire une solution de champ électromagnétique [15].

II.3 Antenne patch microruban rectangulaire imprimée sur une cellule à cristaux liquides

L'antenne étudiée dans la référence [16] consiste en un dispositif qui se compose de : antenne patch et ligne microruban ,trois couches de substrat de type Taconic (TLY-5) avec une permittivité relative 2,2 et une épaisseur de 0.51 mm, une couche de frottement, un plan de masse et une cavité de cristal liquide. Les deux premiers éléments sont imprimés sur le substrat supérieur qui est en contact direct avec la surface supérieure du LC. Le plan de masse se trouve sur la surface supérieure du substrat inférieur. Le substrat central est gravé, ce qui crée une cavité avec un volume qui se trouve sous le patch. La couche de frottement a été formée sur le patch métallique à l'aide d'une fine couche de polyimide pour aider à aligner les molécules de LC. Un insert de 2 mm de profondeur et de 3 mm de largeur a été utilisé afin d'assurer une meilleure adaptation d'impédance entre le microruban et le patch. La structure et ses dimensions sont présentées dans la figure II.1 et les tableaux II.1 et II.2.

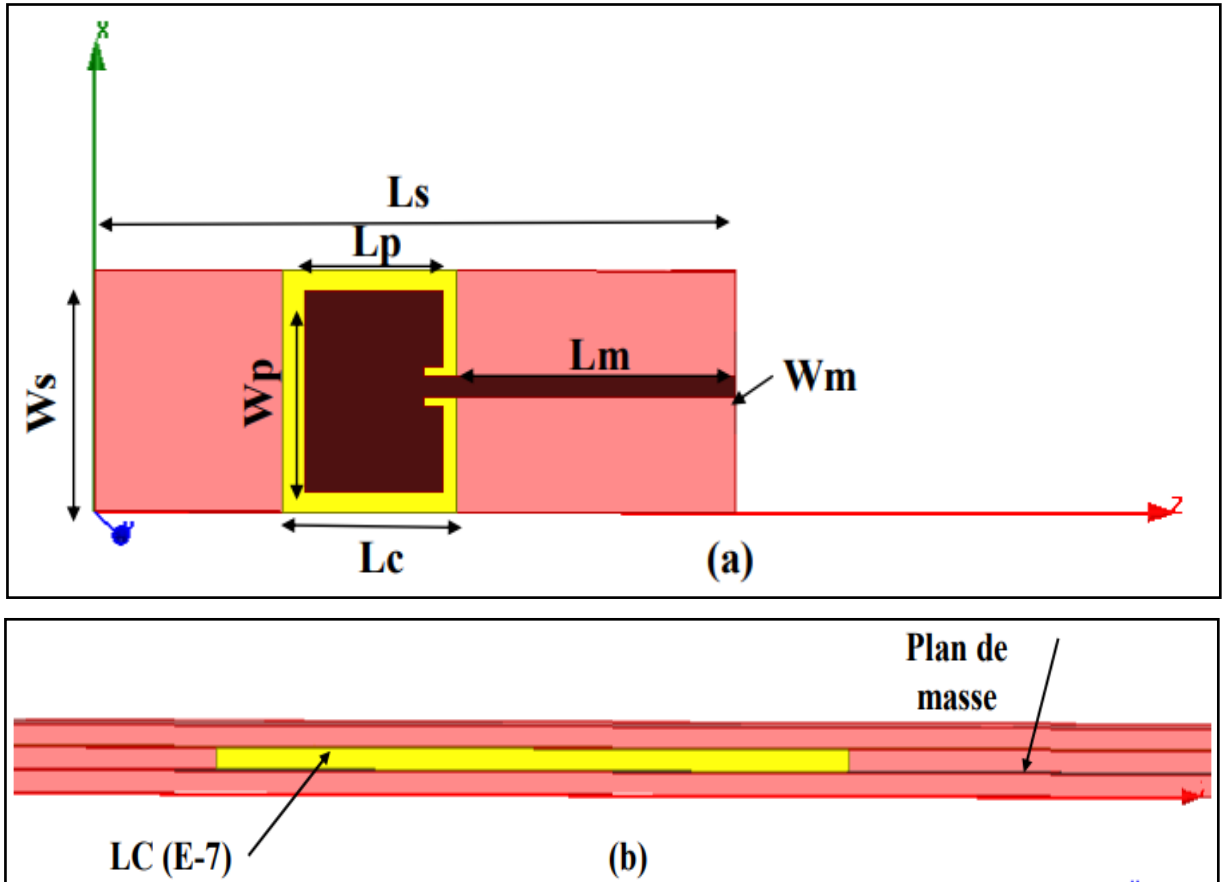


Figure II. 1: Géométrie de l'antenne, (a) vue dessus, (b) Coupe transversale.

Les dimensions et les matériaux utilisés de cette antenne sont montrés dans les tableaux II.1 et II.2.

Tableau II. 1: Dimensions et paramètres des matériaux utilisés dans la conception d'antenne.

Couche	Type du Matériau	permittivité	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Hauteur (mm)
Substrat	Taconic (TLY-5)	2,2	70	24	0.51
Plan de	copper	1	70	24	0.05

Chapitre II Conception et simulation d'une antenne patch et d'un réseau d'antenne à base du cristal liquide

masse					
Patch	copper	1	15	20	0.05
Couche de frottement	polymide	4.3	70	24	0.0001

Tableau II. 2: Dimensions de l'antenne patch.

Paramètres	Valeurs (mm)	Paramètres	Valeurs (mm)
Ws	24	Lc	19
Ls	70	Wm	1.5
Wp	20	Lm	32
Lp	15	h	0.51

II.3.1 Résultats numériques

a. Coefficient de réflexion

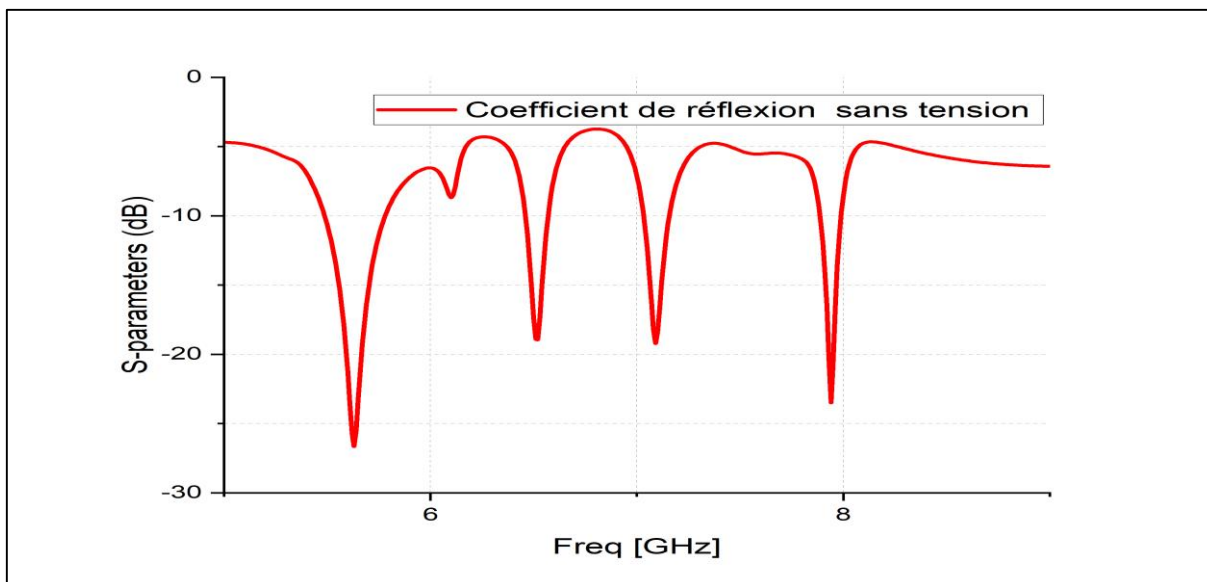


Figure II. 2: Coefficient de réflexion de l'antenne sans tension de commande.

Après la simulation de la structure de l'antenne proposée, le coefficient de réflexion est tracé sur la figure II.2. D'après cette figure, on constate que l'antenne résonne à une bande qui varie de 5.6 à 8 GHz. La courbe de variation simulée de S_{11} en fonction de la fréquence dans la bande de 5 à 8GHz démontre que cette configuration présente quatre fréquences de résonance : la première fréquence est de 5,6 GHz, la deuxième fréquence est de 6,5 GHz, la troisième fréquence est de 7,1 GHz et la quatrième fréquence est de 7,9 GHz.

L'analyse de ces résultats permet de conclure que l'utilisation d'une alimentation avec encoche conduit à une meilleure adaptation de l'antenne, donc un rayonnement amélioré.

II.3.2. Application du voltage sur le cristal liquide

On utilise une cellule de cristal liquide nématique (N-LC) comme support pour une antenne patch à microruban, ce qui permet de régler sa fréquence de résonance en appliquant une tension de polarisation en courant continu ou en courant alternatif à basse fréquence[1].

Le cristal liquide utilisé dans cette étude est de type E7 élaboré par Merck laboratoires. Les propriétés des cristaux liquides sont listées dans le tableau II.3.

Chapitre II Conception et simulation d'une antenne patch et d'un réseau d'antenne à base du cristal liquide

Tableau II. 3: Caractéristiques de cristal liquide utilisé.

Type de CL	ϵ_{\perp}	$\tan\delta_{\perp}$	ϵ_{\parallel}	$\tan\delta_{\parallel}$	$\Delta\epsilon$
E-7	5,2	0.033	19	0.050	13,8

On applique une tension de polarisation de 10V entre le patch et la masse à travers le LC comme montre la figure II.3.

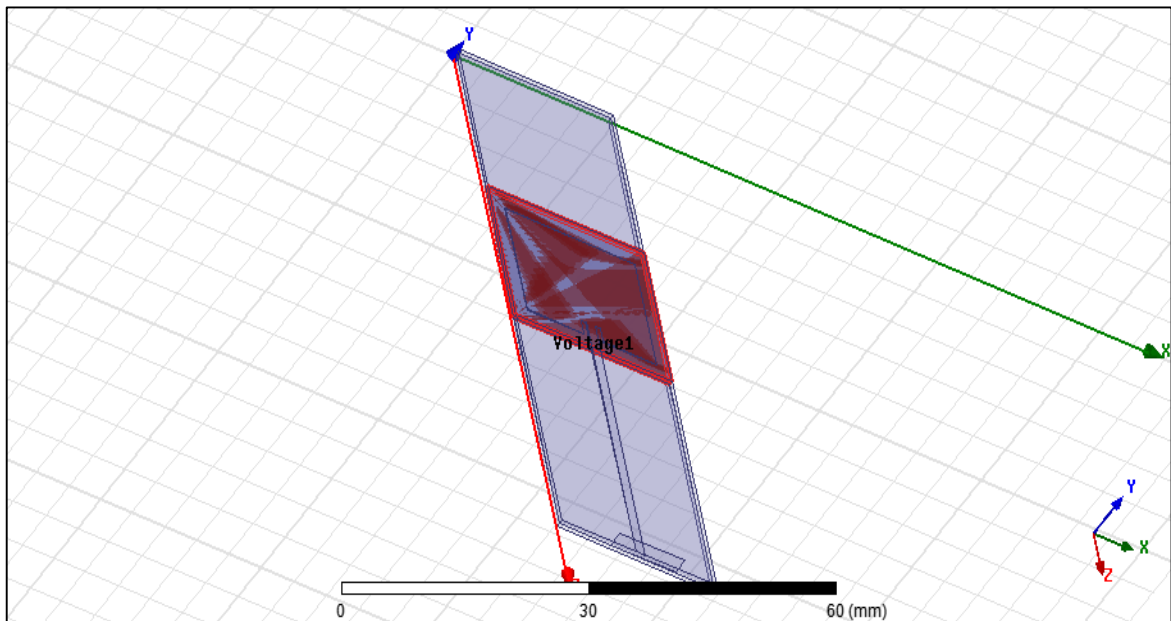


Figure II. 3: Application du voltage sur le cristal liquide $V=10V$).

a. Coefficient de réflexion

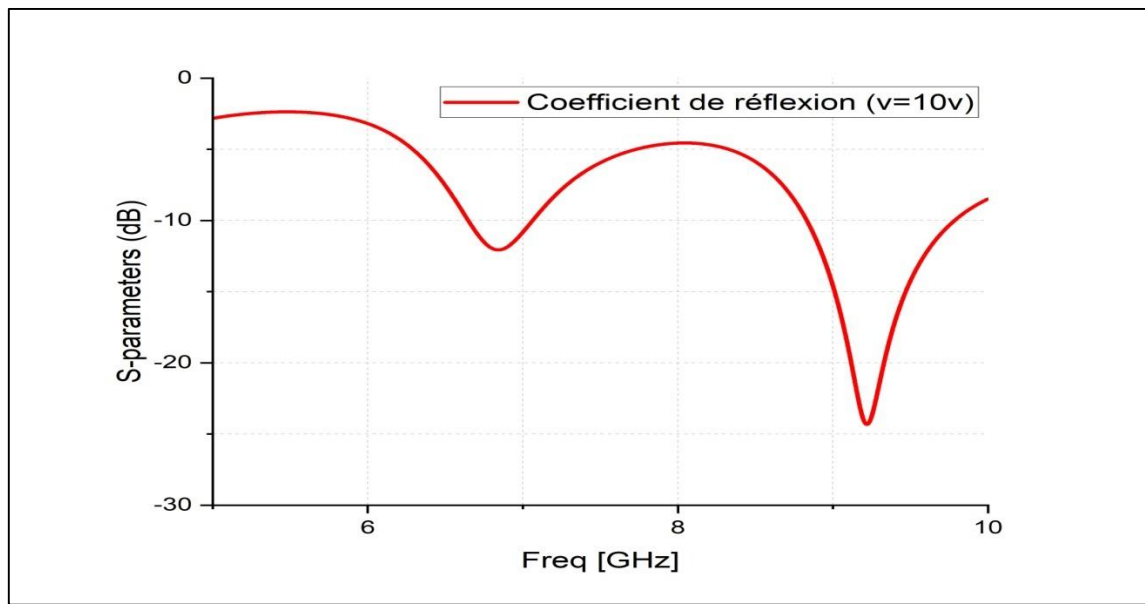


Figure II. 4: coefficient de réflexion avec tension de commande de 10V.

On observe qu'on a généré deux fréquences de résonances, la première à 6.85 GHz avec un coefficient de réflexion de -12.04 dB et une deuxième résonance alentour de la fréquence 9.22GHz pour une adaptation de -24.26 dB.

II.3.3. Comparaison entre l'antenne avec et sans tension de polarisation

Cette section assure une petite comparaison entre les performances de l'antenne avec et sans l'application de commande, en termes de coefficient de réflexion et diagramme de rayonnement.

a. Coefficient de réflexion

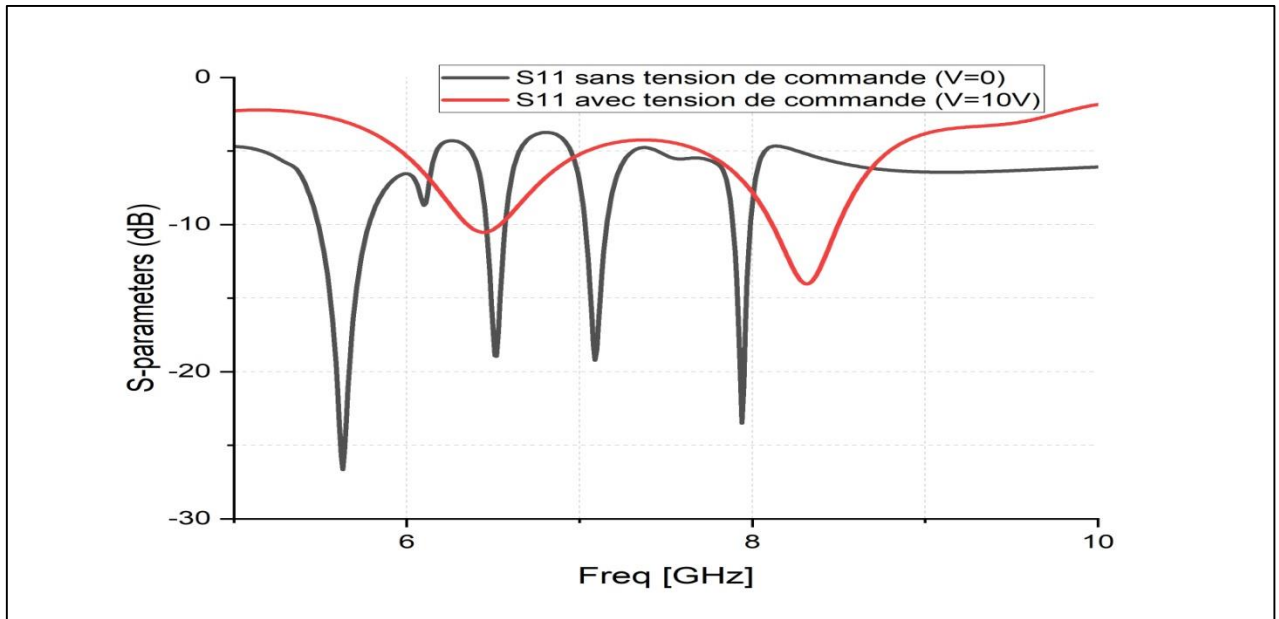


Figure II. 5: Coefficient de réflexion avec et sans tension de commande.

La figure II.5 illustre les variations de la fréquence de résonance et du coefficient de réflexion pour deux différentes tension de polarisation de cristal liquide y compris ; $V=0V$ et $V=10V$. On observe que lorsque la tension de commande est de $0V$, il y a quatre fréquences de résonance Par contre, si la tension de commande est à $10V$, on remarque que seulement deux fréquences de résonance sont générées ce qui assure une reconfigurabilité en fréquence. Les résultats numériques obtenus des simulations des deux cas précédents sont résumés et comparés dans le tableau II.4.

Tableau II. 4: Comparaison des résultats en termes de coefficient de réflexion obtenus.

	Avec tension de commande V=10V	Sans tension de commande V=0V
fréquence de résonance (GHz)	F1=6.85, F2=9.22	F1=5.6, F2=6.5 F3=7.1, F4=7.9

coefficient de réflexion (dB)	-12.04, -24.26	-27, -19 -19, -24
--------------------------------------	----------------	----------------------

b. Diagramme de rayonnement

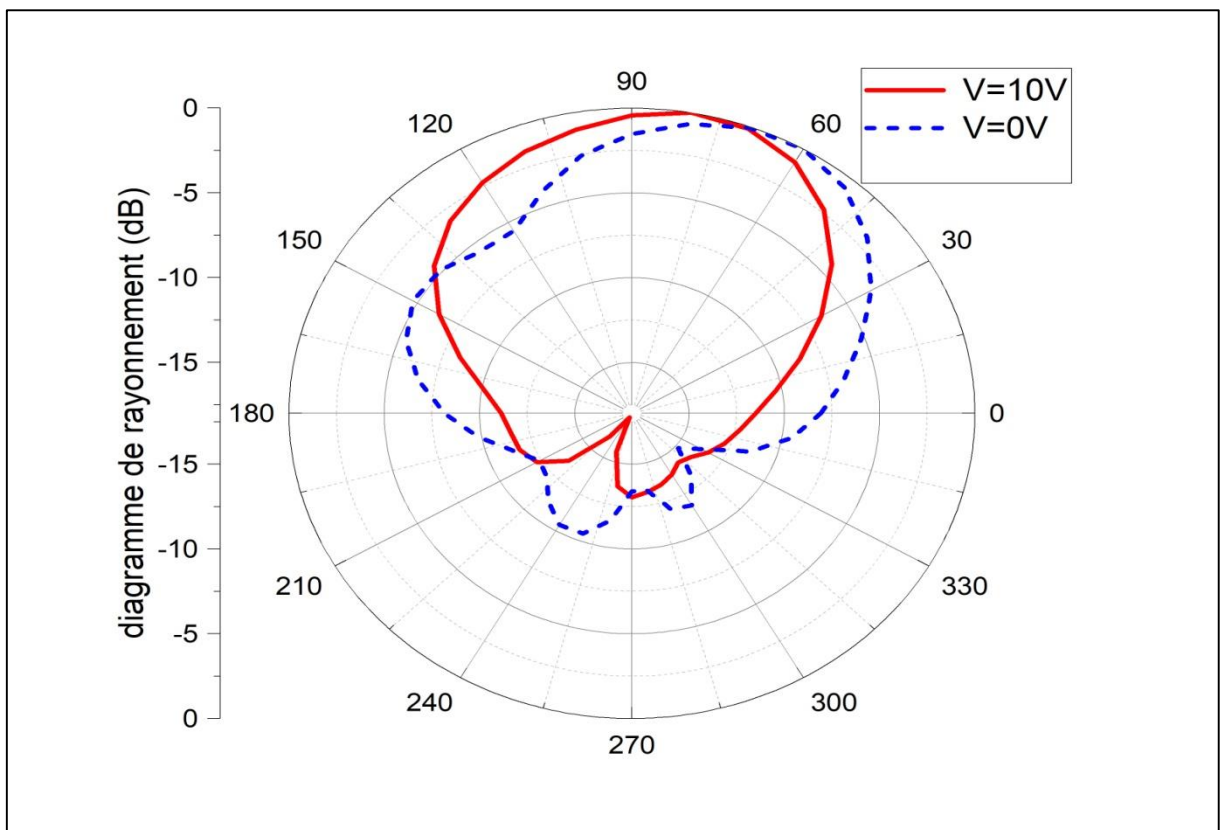


Figure II. 6: La comparaison entre le diagramme de rayonnement avec et sans tension de commande.

On observe un changement du diagramme de rayonnement avec la variation d'excitation de patch. L'orientation d'un angle change quand on applique le voltage, le faisceau est orienté vers 14° pour le diagramme sans excitation et vers 24°, donc on remarque qu'il a un déphasage.

Tableau II. 5: Comparaison des résultats de diagramme de rayonnement obtenus.

	Le déphasage
Sans tension de commande	15%
Avec tension de commande	20%

II.4 Réseau composé de quatre patchs alimentés en parallèle

L'antenne étudiée dans la référence [17] consiste en un dispositif qui se compose de quatre patchs de forme rectangulaire alimentés en parallèle, des lignes de transmission microruban pour l'alimentation et un plan de masse. Les deux premiers éléments sont imprimés sur la face supérieure d'un substrat de type 'Bakelite' avec une permittivité relative 4.8 et une épaisseur de 1.6 mm. Le plan de masse est imprimé sur la face inférieure du substrat. La structure et ses dimensions sont présentées dans la figure II.7. La simulation de l'antenne est effectuée à l'aide de logiciel de simulation HFSS.

Tableau II. 7: Dimensions de l'antenne patch.

Paramètres	Valeur (mm)	Paramètres	Valeur (mm)
Ws	50	L14	0.637
Ls	40	W15	2.86
Wp	7.39	L15	7.39
Lp	10.36	Wpo	7
Wc	0.318	Hpo	1.6
Lc	2	Wg	50
W11	0.637	Lg	40
L11	4.63	Hs	1.6
W12	13.757	Hp	0.05
L12	0.196	Hg	0.05
W13	1.49	Hligne	0.05
L13	4.7	W14	27.73

II.4.1 Résultats et discussion

a. Coefficient de réflexion

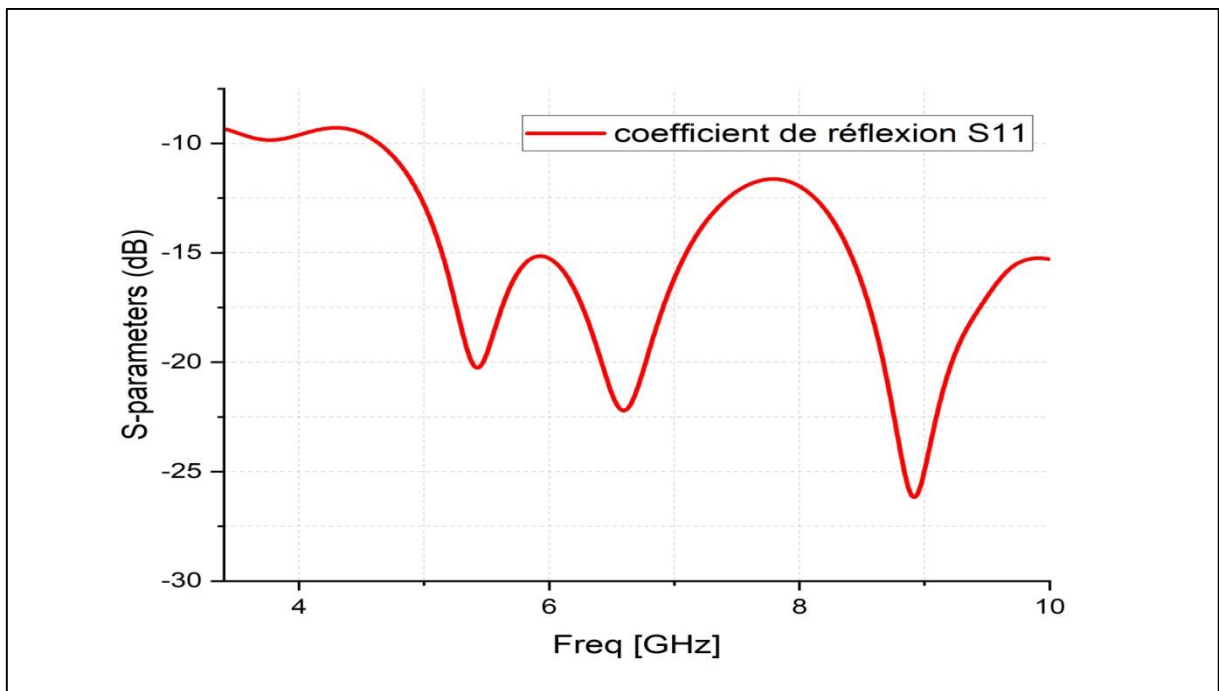


Figure II. 8: coefficient de réflexion sans LC.

La figure II.8 montre que l'antenne résonne dans une large bande qui varie de 5.55 à 8.9 GHz. La courbe de variation simulée de S_{11} en fonction de la fréquence dans la bande de 3.4 à 10 GHz démontre que cette configuration présente trois pics de coefficient de réflexion : le premier est de -20 dB à 5,6 GHz, le deuxième est de -22.5 dB à 6,5 GHz et le troisième est de -27 dB à 8.9 GHz.

II.4.2 Application du cristal liquide au réseau d'antenne

Le cristal liquide utilisé dans ce travail est celui de K15 (5cb) qui présente qu'une phase nématique entre $\varphi = 22,5^\circ$ et $\varphi = 35^\circ$. La figure II.9 montre la caractérisation diélectrique du CL K15 à température ambiante [18].

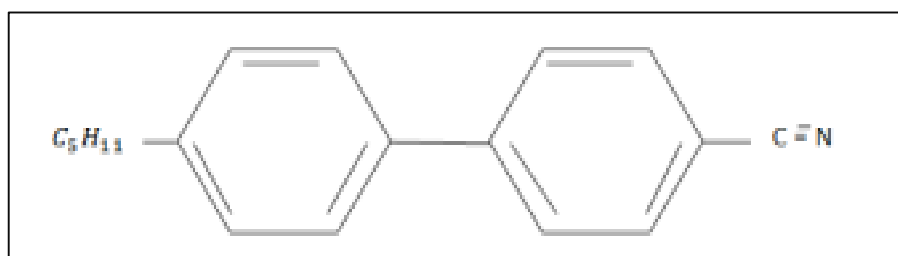


Figure II. 9: Formule chimique du cristal liquide K 15.

Les caractéristiques diélectriques des cristaux liquides sont résumées dans le tableau II.8.

Tableau II. 8: Caractéristiques des cristaux liquides.

Type de CL	ϵ'_{\perp}	$\text{Tan } \delta_{\perp}$	ϵ''_{\parallel}	$\text{Tan } \delta_{\parallel}$
K15 (5cb)	2.64	0.031	2.98	0.014

Dans cette phase, les LCs sont des matériaux anisotropes avec une permittivité complexe présentée sous la forme d'un tenseur [18].

$$\epsilon^* = \begin{bmatrix} \epsilon^*_{\parallel} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon^*_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon^*_{\perp} \end{bmatrix}$$

Pour réaliser la reconfigurabilité du réseau d'antenne, on a intégré des cavités en LC. Ces cavités sont placées sur les lignes de transmission. Le tableau II.9 et la figure II.10 montrent les dimensions des cavités intégrés et la figure II.11 montre la structure finale du réseau d'antenne après l'intégration des déphaseurs en LCs.

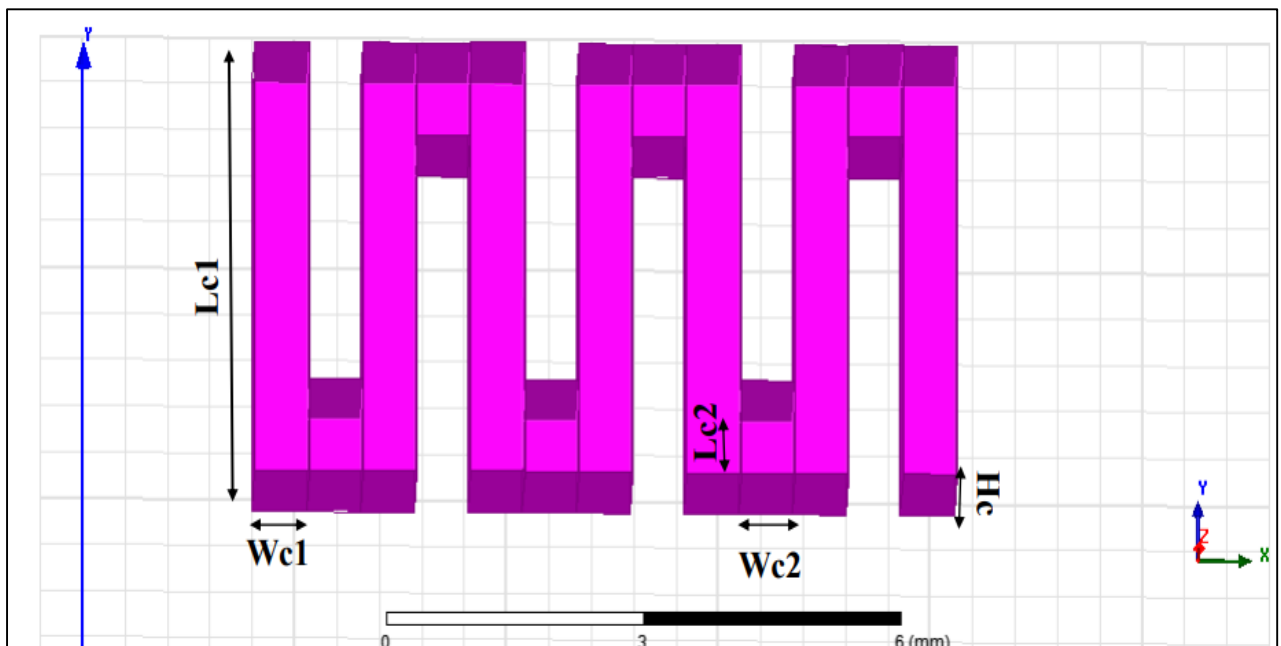


Figure II. 10: Dimension du déphaseur à base de cristal liquide (LC).

Tableau II. 9: Valeurs optimisés des dimensions des cavités remplies avec cristal liquide.

Paramètre	Wc1	Wc2	Lc1	Lc2	Hc
Valeur (mm)	0.637	0.637	4.63	1	1.6

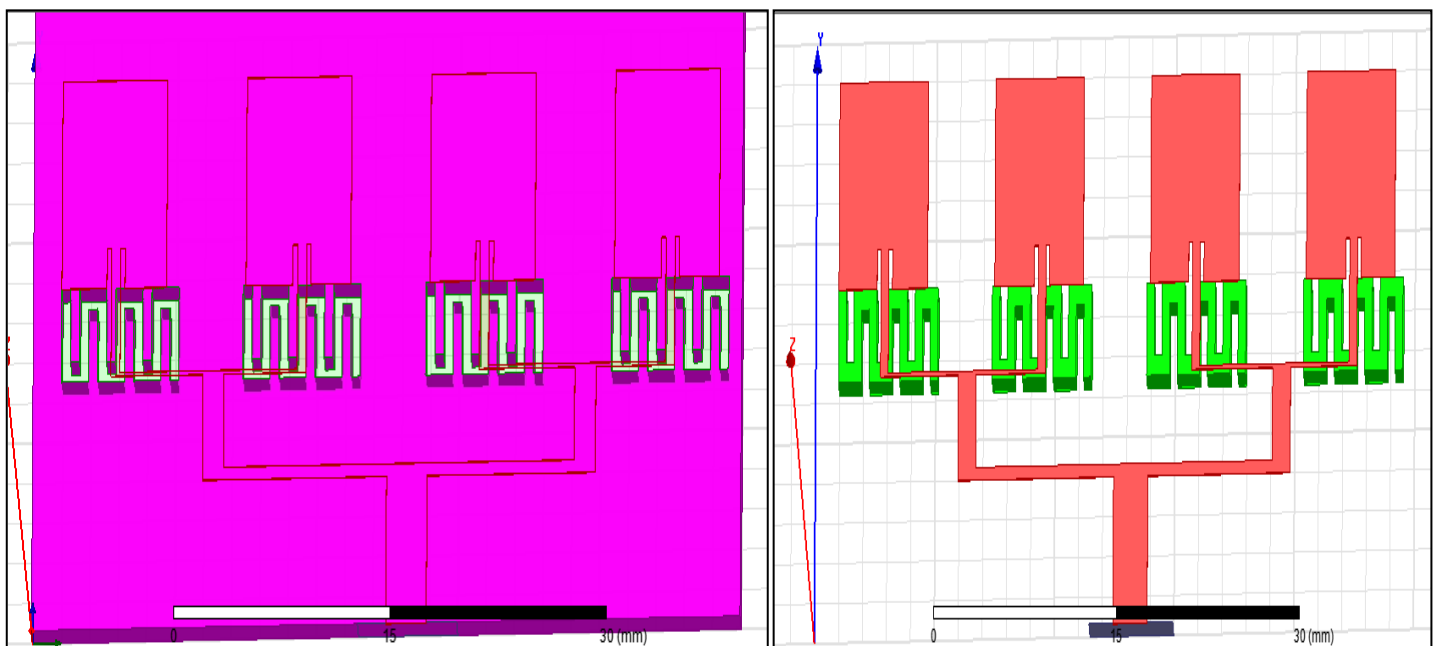


Figure II. 11: Structure finale du réseau d'antenne avec l'intégration du déphaseur.

II.4.3 Résultats et discussion

Après la simulation de la structure présentée ci-dessus via le logiciel de modélisation électromagnétique HFSS. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure II.12 ci-dessous.

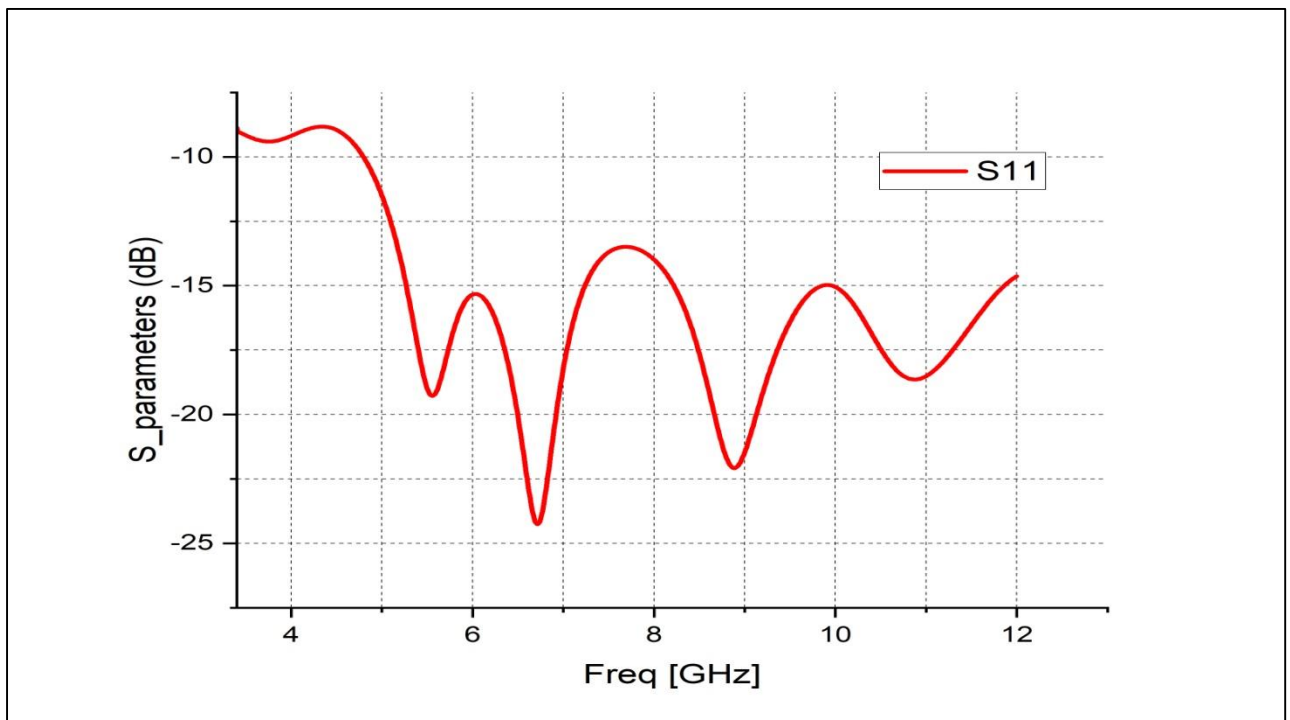


Figure II. 12: Coefficient de réflexion (S_{11}) du réseau d'antenne sans excitation.

Le coefficient de réflexion du réseau d'antennes est illustré à la Figure II.12. La réponse en fréquence à -10 dB couvre la bande de fréquence de 5,2 à 10,8 GHz (antenne large bande). La variation simulée de S_{11} en fonction de la fréquence a trois pics de coefficient de réflexions : le premier est de -19 dB à la fréquence 6.72 GHz, le deuxième est de -24.8 dB centré à 6.72 GHz et le troisième est de 21.9 dB alentour de 8.92 GHz.

II.4.4 Application de la tension de polarisation du LC

L'intégration du déphaseur est réalisée en utilisant des cristaux liquides, et le changement de phase du signal est réalisé en appliquant une tension de polarisation aux cristaux liquides, donc on a appliqué une tension de 7 V à chaque patch comme le montre la figure II.13.

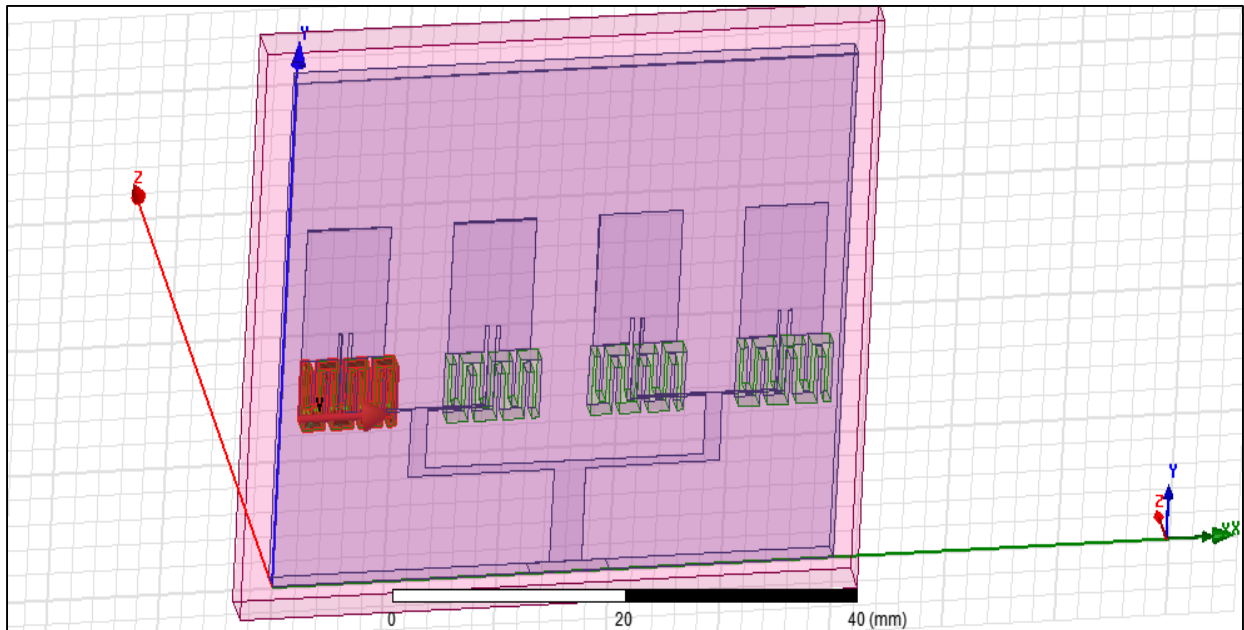


Figure II. 13: Application de tension (7V) sur un seul patch.

Cette section assure une petite comparaison entre les performances de l'antenne avec et sans l'application de commande pour chaque patch, en termes de coefficient de réflexion et diagramme de rayonnement.

a. Coefficient de réflexion

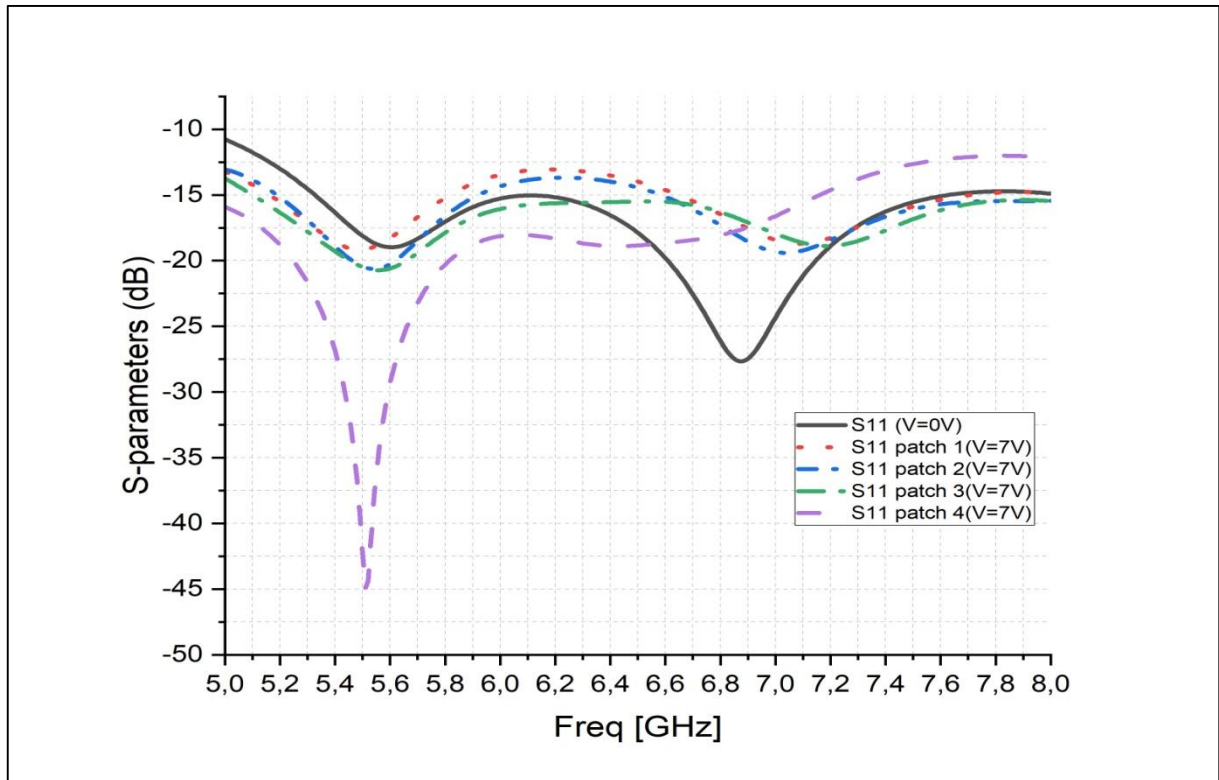


Figure II. 14: comparaisant de coefficient de réflexion de chaque patch avec une tension de $V=7V$.

Les coefficients de réflexions des différentes excitations sont effectués et tracés sur la figure II.14. D'après les courbes de cette figure, lorsque une tension de polarisation est appliquée ($V = 7V$). Nous constatons un décalage du coefficient de réflexion et une variation de fréquence en fonction de la position d'excitation par rapport au diagramme lorsque la tension est de $0V$. nous observons que l'excitation dans le patch 4 est la meilleure parmi les autres patches.

Tableau II. 10: Comparaison des résultats de coefficient de réflexion obtenus pour l'excitation du différent patch.

Position D'excitation	Sans tension	1	2	3	4
fréquence de résonance(GHz)	6.72	5.51	5.51	5.51	5.51

coefficient de réflexion (dB)	-24.25	-19	-20.44	-20.45	-40
--------------------------------------	--------	-----	--------	--------	-----

b. Diagramme de rayonnement

Les résultats du diagramme de rayonnement pour différentes positions d'excitation (patch 01, 02, 03 et 04) sont représentés sur la figure II.15.

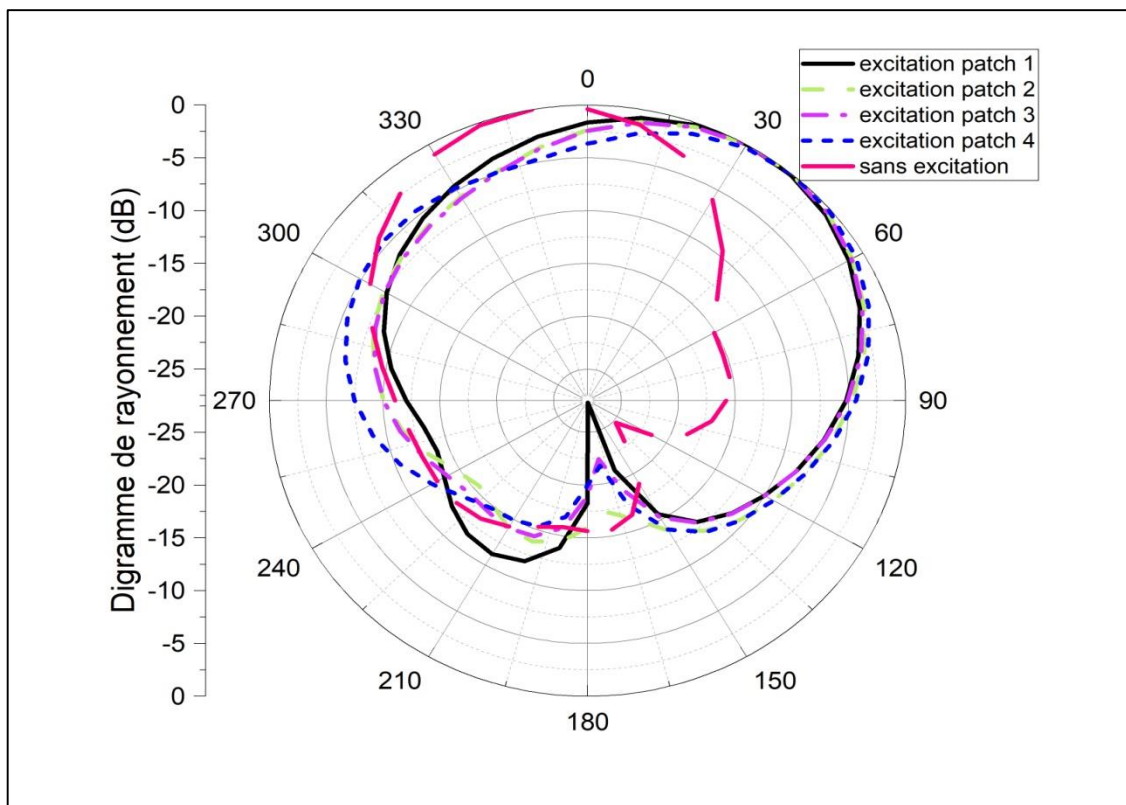


Figure II. 15: Digramme de rayonnement pour degrés avec tension de commande (7 v) déférente position d'excitation des patches (1, 2, 3,4).

On observe un changement du diagramme de rayonnement avec la variation de la position d'excitation des patches. L'orientation d'un angle change selon la position d'excitation, patch 1, 2 et 3 le faisceau est orienté vers 15° et le patch 4 vers 20° par rapport au diagramme sans excitation qui dirigé vers -15°.

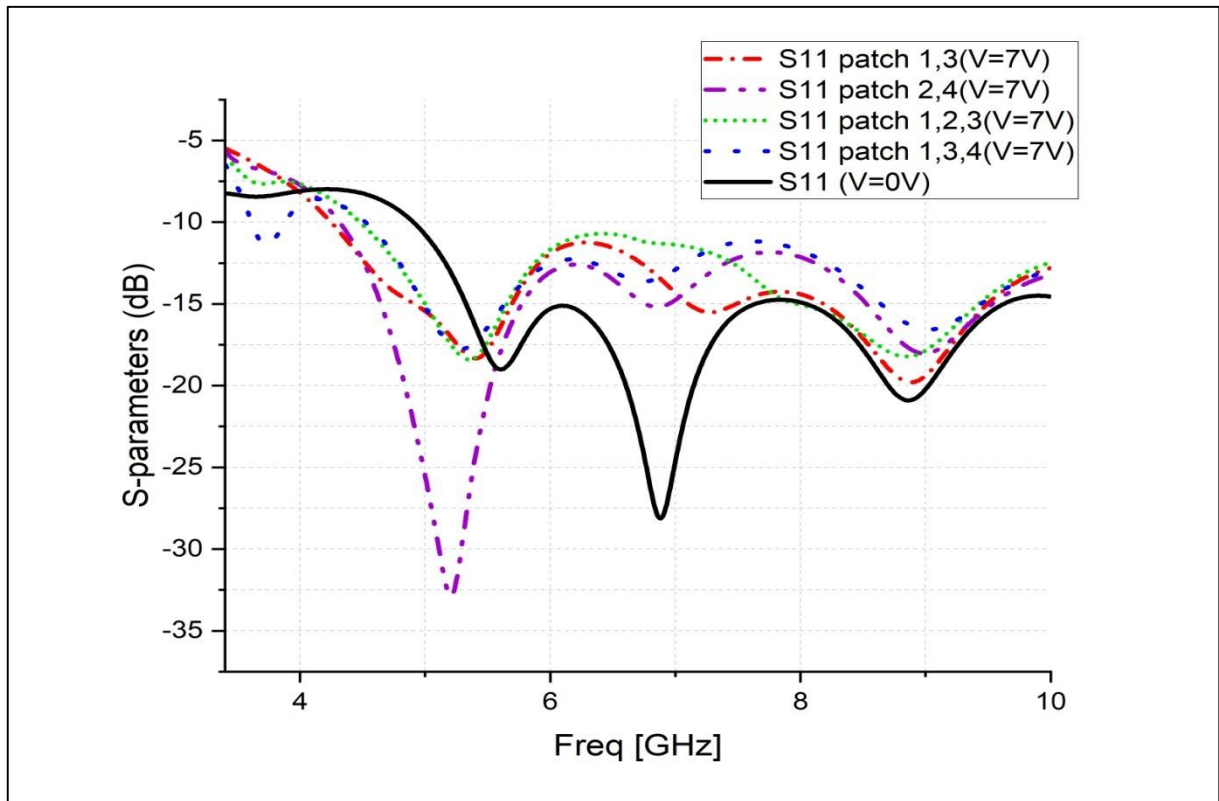


Figure II. 16: Coefficient de réflexion pour différentes positions d'excitations.

La figure II.16 montre les variations de la fréquence de résonance et le coefficient de réflexion en excitant deux patchs en même temps.

Tableau II. 11: Comparaison des résultats de coefficient de réflexion obtenus pour l'excitation des différents patchs.

Patchs excités	1et3	2et4	1, 2 et 3	1, 3 et 4
Fréquence de résonance(GHz)	8.86	5.31	5.42	5.32
coefficientde réflexion(dB)	-17.98	-23.72	-17.25	-17.29

Les résultats numériques en diagramme de rayonnement pour l'excitation de deux patches et trois patches en même temps (patch 1 et 3, 2 et 4, 1 et 3 et 4, 1 et 2 et 3) sont tracés sur la figure II.17. Cette figure montre une orientation du diagramme de rayonnement. L'orientation d'angle se change selon le nombre et la position d'excitation. Afin de clarifier l'effet de cette méthode sur les performances du réseau d'antenne, le tableau II.12 récapitule les résultats obtenus.

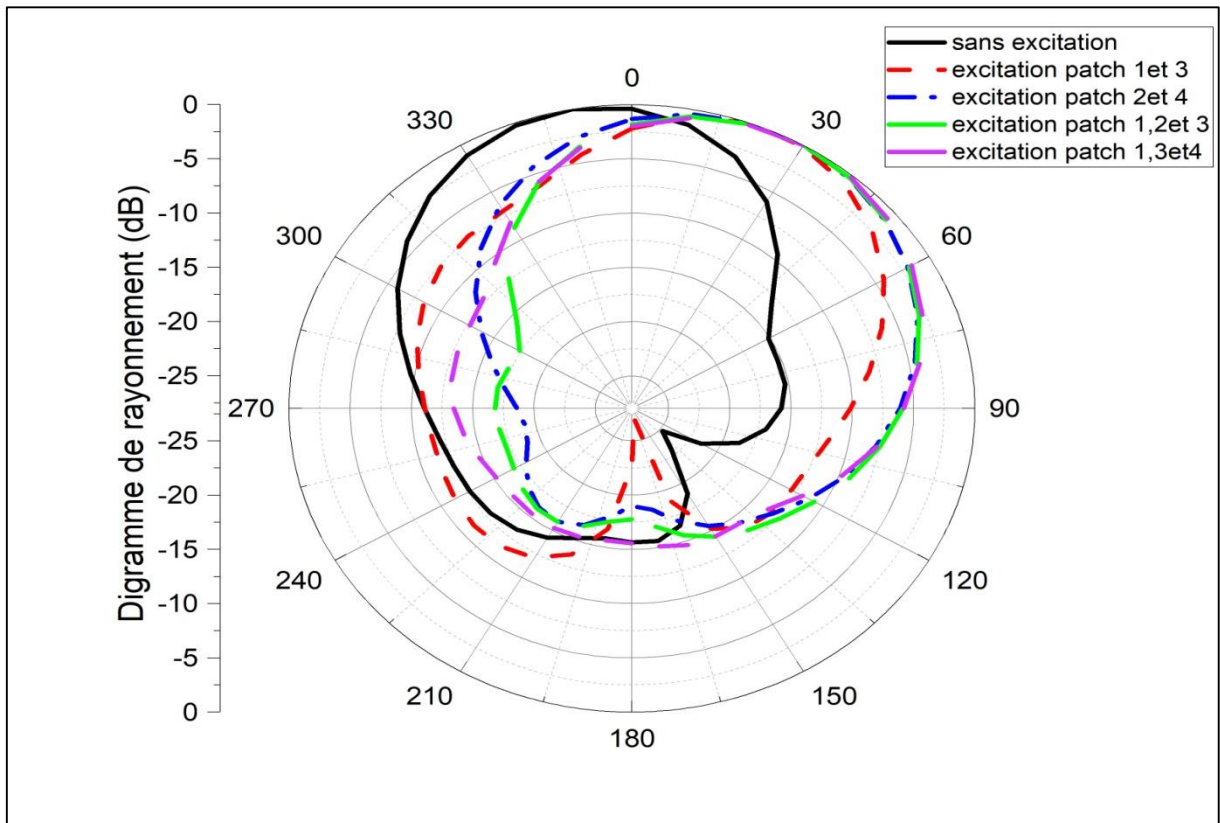


Figure II. 17: Diagramme de rayonnement pour différentes positions.

On observe un changement du diagramme de rayonnement avec la variation de la position d'excitation des patches. L'orientation d'un angle change selon la position d'excitation, patch 1, 2,3 et 4 le faisceau est orienté vers 40° par rapport au diagramme sans excitation qui dirigé vers -30° , donc on remarque qu'il a un déphasage de 70° .

Chapitre II Conception et simulation d'une antenne patch et d'un réseau d'antenne à base du cristal liquide

Tableau II. 12: Comparaison des résultats de diagramme de rayonnement obtenus pour l'excitation des différents patches.

Position d'excitation	Déphasage
Sans excitation	-30°
Patch 1,3	0°
Patch 2,4	30°
Patch 1,2 et 4	15°
Patch 1,3 et 4	15°

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté la simulation d'une antenne patch rectangulaire, puis on a simulé un réseau de quatre patches alimentés en parallèle. De plus, on a intégré le cristal liquide sous l'antenne patch et le réseau d'antennes afin d'ajuster la direction du diagramme de rayonnement du réseau sans changer la position de l'antenne. En appliquant des tensions de 0V et 7V sur les différents patches. On a obtenu les diagrammes de rayonnement souhaités.

Les résultats obtenus ont démontré que :

- L'utilisation de cristaux liquides dans les dispositifs reconfigurables est possible.
- Le déphaseur peut être contrôlé en ajustant à la fois la tension d'excitation et sa position.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif principal de cette étude est de démontrer qu'il est possible d'intégrer un déphaseur microonde accordable à couche active à cristaux liquides dans un réseau d'antennes imprimées tout en conservant ses propriétés électriques et de rayonnement. Grâce à ces déphaseurs, le rayonnement émis par le réseau d'antennes peut être contrôlé électroniquement. Les déphaseurs étaient encombrants, mais les progrès de la microélectronique ont permis de les intégrer directement avec les antennes imprimés.

La première partie du travail consiste à développer une étude sur les différents dispositifs micro-ondes accordables, en mettant l'accent sur les propriétés des cristaux liquides et leur utilisation dans la réalisation de ces dispositifs. Il était essentiel de commencer par la définition des déphaseurs, les différents types des dispositifs et leur application. Enfin, on a réalisé un état de l'art sur les différents types de déphaseurs micro-ondes à base de cristal liquide déjà étudiés, publiés et commercialisés.

Dans la deuxième partie, on a étudié une antenne patch rectangulaire, un réseau d'antennes et on a intégré un déphaseur à base de Cristal Liquide avec un réseau d'antennes composé de quatre patches rectangulaires alimentés en parallèle. L'objectif était de contrôler la direction de rayonnement d'un réseau d'antennes conventionnel sans changer la position de l'antenne. On a placé un déphaseur micro-ondes à base de cristal liquide devant chaque élément rayonnant (patch rectangulaire). Afin d'obtenir un diagramme de rayonnement souhaité selon un angle d'élévation θ , on a appliqué un système d'excitation de 0V et 7V sur les différents patches.

Les simulations réalisées ont démontré que le déphasage obtenu est directement proportionnel à la tension de commande appliquée.

Ce travail a montré que les capacités des cristaux liquides utilisés dans des applications nécessitant une grande agilité en fréquence, tout en utilisant des tensions de commande faibles.

Bibliographie

- [1] Mme Daniela DRAGOMIRESCU M. Alexandru TAKACS « Développement d'une solution Core-chip MMIC en technologie BiCMOS pour la formation des faisceaux pour antennes agiles » Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse (INSA de Toulouse).
- [2] Fabien MAURY « *Conception, réalisation et test de déphaseurs micro-ondes intégrant une technologie MEMS* » thèse pour obtenir le grade de docteur de l'université de Limoges 2009.
- [3] Israël Boudreau, « étude d'un déphaseur large bande en technologie de guide d'ondes intégré au substrat », Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées, Université de Montréal, avril 2012.
- [4] Manirakiza Ferdinand, Irankunda Alida « Contribution à l'étude des déphaseurs micro rubans Application aux réseaux d'antennes imprimées », Université 08 Mai 1945 –Guelma, 2013.
- [5] nicolastentillier « Contribution à la Caractérisation Diélectrique Micro-onde de Cristaux Liquides. Application aux Circuits Agiles en Fréquence » thèse de doctorat en électronique, université des sciences et technologies de Lille.
- [6] F. Goelden, A. Gaebler, M. Goebel, A. Manabe, S. Mueller and R. Jakoby, « Tunable liquid crystal phase shifter for microwave frequencies » ELECTRONICS LETTERS 18th June 2009 Vol. 45 No. 13.
- [7] Amrani Houssam, Boulbazine Ahmed « caractérisation des déphaseurs micro-ondes à base de cristal liquide » mémoire de fin d'étude de master en télécommunication, université 8 mai 1945 Guelma en 2014.
- [8] Shuang-Yuan Sun, Xuan Yu, Peng-Jun Wang, Chao-Fan Wan, Jun Yang, Zhi-Ping Yin, Guang-Sheng Deng, and Hong-Bo Lu, « Electronically Tunable Liquid-Crystal-based F-Band Phase Shifter », IEEE Access, 2017.

Les références bibliographiques

- [9] SUNGEUN KIM, CHAN-BYOUNG CHAE, (Fellow, IEEE), AND BYUNG-WOOK MIN, (Member, IEEE), « A Low-Loss Defected-Ground-Structure Based Phase Shifter and Antenna on a 4- μ m Thin Liquid Crystal Layer », IEEE Access, 2023.
- [10] Qipeng Wang, and al, « Electrically Tunable Phase Shifter With Improved Phase-Shifting Capability Based on Liquid Crystal », IEEE MICROWAVE AND WIRELESS TECHNOLOGY LETTERS, 2023.
- [12] MOHAMMAD ALI PANAHI , LAP YEUNG (Member, IEEE), MAZIAR HEDAYATI , AND YUANXUN ETHAN WANG (Fellow, IEEE) "Sub-6 GHz High FOM Liquid Crystal Phase Shifter for Phased Array Antenna" Digital Object Identifier 10.1109/JMW.2022.3152208 VOL 2, NO. 2, APRIL 2022
- [13] ROLAND REESE et al, "Liquid Crystal Based Dielectric Waveguide Phase Shifters for Phased Arrays at W-Band" Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2019.2939648 VOL 7, 2019
- [14] Christopher D. Woehrle et al , "Space Radiation Environment Testing of Liquid Crystal Phase Shifter Devices" 1536-1225 (c) 2015 IEEE. Personal use is permitted, but republication/redistribution requires IEEE permission.
- [15] Lawrence Unterberger, Matt Commens, ANSOFT CORPORATION.
- [16] Anastasis C. Polycarpou et al, « Tunable Patch Antenna Printed on a Biased Nematic Liquid Crystal Cell », IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 62, NO. 10, OCTOBER 2014.
- [17] Aissa Attoui, Ahcene Boualleg , salahredadaa et Bahloul Afaf « STUDY OF PHASED SHIFTER ANTENNA BASED A DIELECTRIC ANISOTROPY », University May 8, 1945 Guelma, 2020.
- [18] A. Attoui, A. Boualleg, and S. Redadaa, « New Microstrip Resonator of Nanostructured Materials in a Liquid-Crystal-Based Phase Shifter », University of 8 May 1945, 2017.