

UNIVERSITE PARIS-SUD

ÉCOLE DOCTORALE : *Sciences et Technologies de l'Information des Télécommunications et des Systèmes*

Laboratoire de l'Institut d'Electronique Fondamentale

DISCIPLINE *Physique*

THÈSE DE DOCTORAT

Soutenue le 13/06/2014

par

Alexandre SELLIER

Absorbants à métamatériaux : étude théorique et expérimentale

Directeur de thèse :

André de Lustrac

Professeur, IEF

Composition du jury :

Rapporteurs :

Bruno Sauviac

Professeur, LT2C

Xavier Begaud

Professeur, Telecom ParisTech

Examineurs :

Eric Lheurette

Professeur, IEMN

Gérard-Pascal Piau

Airbus Group Innovation Works

Shah Nawaz Burokur

Maitre de Conférences / HDR, IEF

Membres invités :

Jesús Aspás Puertolas

Airbus Defence & Space

Sylvain Gransart

DGA

Remerciements

Les quatre années que j'ai passées à l'IEF ont été riches en enseignements. Les recherches conduites sur les absorbants à métamatériaux m'ont amené à travailler avec beaucoup de personnes. Chacune d'entre elles a participé directement ou indirectement à la bonne réalisation de cette thèse. Je souhaite remercier toutes les personnes que je connais et avec lesquels j'ai pu interagir durant cette période.

Je tiens tout d'abord à remercier André de Lustrac pour m'avoir proposé cette thèse et de m'avoir accueilli au sein de l'équipe CRIME de l'IEF. Les conseils et les encouragements reçus durant notre collaboration ont joué un rôle important pour mener à bien mes recherches.

Je souhaite également exprimer toute ma reconnaissance à ma collègue Tatiana Teperik pour l'aide qu'elle a apportée dans le développement du modèle théorique présenté dans cette thèse et pour les échanges très instructifs que nous avons pu avoir.

Je voudrais remercier les membres de mon jury Eric Lheurette, Xavier Begaud et Bruno Sauviac pour avoir accepté d'examiner et de juger ce travail.

Je remercie tout particulièrement Shah Nawaz Burokur avec qui j'ai passé de nombreuses heures en chambre anéchoïque et qui a toujours été de bon conseil.

Merci à Frédérique Gadot pour m'avoir permis de connaître l'équipe CRIME lors de mon MASTER 2 en alternance à l'IEF.

Un grand merci à toute l'équipe CRIME, les membres actuels comme les anciens membres, pour m'avoir épaulé au cours de la thèse et pour les moments inoubliables que j'ai passés dans ce groupe. Une mention spéciale à mon collègue de bureau Anatole Lupu pour la cohésion d'équipe qu'il arrive à créer, et à mon collègue de café Dylan Germain pour l'effervescence d'idées qui sont ressorties de nos discussions.

Je voudrais également exprimer ma gratitude à l'ensemble du personnel de l'IEF avec qui j'ai pu travailler, pour avoir toujours été réceptifs à mes demandes et pour avoir rythmé mon quotidien de doctorant.

Je désire aussi remercier les partenaires du projet REI Meta Absorbant, que ce soit le LEME avec Habiba Ouslimani et Axel Delhey, Airbus Group Innovation Works avec Gérard-Pascal Piau et Guy Sabanowski ainsi que la DGA avec Sylvain Gransart et Isabelle Dautremont.

Enfin je remercie ma compagne, Célia, qui a enduré les quatre années de ma thèse, ainsi que ma famille et mes amis pour leur soutien constant durant cette période.

Etat des publications

1. Articles dans des revues avec comité de lecture (acceptés)

Article avec comité de lecture :

Sellier, A.; Teperik, T. V. & de Lustrac, A.

"Resonant circuit model for efficient metamaterial absorber"

Optics Express, OSA, **2013**, 21, A997-A1006

Article avec comité de lecture :

Wu, X.; Tichit, P.-H.; Burokur, S. N.; Kirouane, S.; Sellier, A. & de Lustrac, A.

"Numerical and experimental demonstration of a coordinate transformation-based azimuthal directive emission"

Microwave and Optical Technology Letters, Wiley Subscription Services, Inc., A Wiley Company, **2012**, 54, 2536-2540

Article avec comité de lecture :

Burokur, S. N.; Sellier, A.; Kanté, B. & de Lustrac, A.

"Symmetry breaking in metallic cut wire pairs metamaterials for negative refractive index"

Applied Physics Letters, **2009**, 94, 201111

Article avec comité de lecture :

Kanté, B.; Burokur, S. N.; Sellier, A.; de Lustrac, A. & Lourtioz, J.-M.

"Controlling plasmon hybridization for negative refraction metamaterials"

Phys. Rev. B, American Physical Society, **2009**, 79, 075121

Article avec comité de lecture :

Sellier, A.; Burokur, S. N.; Kanté, B. & de Lustrac, A.

"Negative refractive index metamaterials using only metallic cut wires"

Optics Express, OSA, **2009**, 17, 6301-6310

2. Communications avec actes (acceptées)

Conférence internationale avec actes :

Sellier, A.; Teperik, T. V.; Burokur, S. N.; Sabanowski, G.; Piau, G.-P. & de Lustrac, A.

" Design and model of wideband absorber made of ultrathin metamaterial structures"

META'14, Singapore, du 20 au 23 mai **2014**

Conférence internationale avec actes :

Sellier, A.; Teperik, T. V. & de Lustrac, A.

"Modeling of metamaterial absorber by equivalent resonant circuit"

EuCAP 2014, Den Haag, du 6 au 11 avril **2014**

Poster avec actes :

Sellier, A.; Burokur, S. N.; Kanté, B. & de Lustrac, A.

"Novel cut wires metamaterial exhibiting negative refractive index"

IWAT 2009, Santa Monica, du 02 mars au 04 mars **2009**; dans CFP09ATS-CDR, vol. 1, PS216

3. Communications sans actes

Poster sans actes :

Sellier, A.; Teperik, T. V.; Burokur, S. N.; Sabanowski, G.; Piau, G.-P. & de Lustrac, A.

"Ultrathin metamaterial wideband absorber"

CNM 2013, Orsay, les 7 et 8 octobre **2013**

Poster sans actes :

Burokur, S. N.; Sellier, A.; Kanté, B. & de Lustrac, A.

"Indice de réfraction négatif et brisure de symétrie dans un métamatériau composé des fils métalliques coupés"

Journées nationales micro-ondes, Grenoble, du 27 mai 2009 au 29 mai **2009**

4. Autres

Salon :

Sellier, A.; Germain, D.; Tichit, P.-H.; Burokur, S. N. & de Lustrac, A.

"Antennes à métamatériaux pour les transports"

Salon Microwave & RF, CNIT - Paris La Défense, du 19 au 20 mars **2014**

Brevet :

Sellier A. & de Lustrac A.

"Absorbant électromagnétique"

Dépôt n° FR1258849 du 20 septembre **2012**

Contribution à un ouvrage :

de Lustrac, A.; Burokur, S. N.; Kanté, B.; Sellier, A. & Germain, D.

"Design and Characterization of Metamaterials for Optical and Radio Communications"

p. 269, 34 pages; in Metamaterial, Xun-Ya Jiang, Intech, **2012**

Séminaire :

de Lustrac, A.; Kanté, B.; Haché, S.; Burokur, S. N.; Tichit, P.-H.; Sellier, A. & Germain, D.

"Transformation d'espace, invisibilité et antennes."

Séminaire, Onera, 17 mars **2009**

Sommaire

Introduction	20
Chapitre I : Etat de l'art	21
I. Introduction.....	21
1. Points clés.....	21
2. Notions clés	21
a. Surface Equivalente Radar.....	21
b. Mesure et simulation de SER.....	22
c. Réduction de la SER.....	22
II. Techniques de réduction de la SER	23
1. Introduction.....	23
2. Les différentes techniques de réduction de SER.....	23
a. Optimisation de géométrie	23
b. Matériaux absorbants radar.....	25
c. Suppression de SER active	25
3. Problèmes liés aux techniques de réduction de la SER.....	26
4. Conclusion	26
III. Matériaux absorbants	26
1. Mécanismes de pertes électromagnétiques et calcul d'impédance	27
a. Coefficient de réflexion et impédance	27
b. Atténuation, déphasage et indice de réfraction	29
2. Absorbants diélectriques.....	30
3. Absorbants structuraux, à adaptation d'impédance.....	30
a. Absorbants pyramidaux	30
b. Absorbants chargés progressivement.....	31
c. Absorbants à couches d'adaptation d'impédance	32
4. Absorbants résonants.....	33
a. Couche Dällenbach.....	33
b. Ecran de Salisbury.....	34
c. Couches de Jaumann.....	35
5. Absorbants comportant des circuits analogiques	36
6. Absorbants adaptatifs	39

7.	Absorbants magnétiques.....	39
8.	Absorbants à métamatériaux.....	40
a.	Métamatériaux.....	40
b.	Intérêt.....	41
c.	Premières recherches.....	41
IV.	Conclusion.....	43
Chapitre II : Simulations et modèles théoriques.....		44
I.	Principes.....	44
1.	Principe de fonctionnement des métamatériaux absorbants.....	44
2.	Principe de l'étude.....	45
II.	Modèles.....	45
1.	Modèles de l'absorbant à métamatériaux de type patchs carrés.....	45
a.	Simulations.....	46
b.	Conclusion provisoire sur les simulations.....	50
c.	Modèle par lignes de transmission.....	51
d.	Modèle de cavité résonnante.....	52
e.	Modèle théorique.....	54
f.	Incidence et polarisation.....	61
g.	Conclusion.....	66
2.	Modèles de l'absorbant à métamatériaux de type patchs circulaires.....	66
a.	Simulations.....	66
b.	Conclusion provisoire sur les simulations.....	70
c.	Modèle par lignes de transmission.....	70
d.	Modèle de cavité résonnante.....	71
e.	Modèle théorique.....	72
f.	Incidence et polarisation.....	76
g.	Conclusion.....	78
3.	Application du principe de Babinet : absorbant à métamatériaux de type creux carrés.....	79
a.	Simulations.....	79
b.	Conclusion sur les simulations.....	82
4.	Application du principe de Babinet : absorbant à métamatériaux de type creux circulaires.....	82
a.	Simulations.....	82
b.	Conclusion sur les simulations.....	85

5.	Conclusion intermédiaire sur les premières structures	86
III.	Optimisation de la bande de fonctionnement	86
1.	Optimisation par empilement	87
a.	Simulations	87
b.	Conclusion sur l'optimisation par empilement	89
2.	Optimisation par juxtaposition.....	90
a.	Première simulation	90
b.	Seconde simulation	93
c.	Conclusion sur l'optimisation par juxtaposition.....	96
IV.	Conception et simulations des premiers prototypes	96
1.	Introduction.....	96
2.	Fallahi	97
3.	BigG	99
4.	CrossRoll Fallahi.....	101
5.	MultiCross.....	103
6.	Conclusion sur les premières simulations de prototypes	105
V.	Simulations particulièrement intéressantes	106
1.	Introduction.....	106
2.	MultiPatches.....	106
3.	Multicouche de MultiCross	108
4.	Evolution de l'espacement entre le substrat et le plan de masse	110
5.	Absorbant sur cylindre	112
6.	Conclusion sur les simulations particulièrement intéressantes.....	115
VI.	Etude du couplage d'absorbants à métamatériaux avec des absorbants magnétiques.....	115
1.	But de l'étude	115
2.	Matériaux employés pour la réalisation de prototypes.....	116
a.	Absorbant magnétique 1.....	116
b.	Absorbant magnétique 2.....	118
3.	Etude de l'impact d'un superstrat	119
4.	Simulations	121
a.	Fallahi	121
b.	BigG	123
c.	CrossRoll Fallahi.....	125
d.	MultiCross.....	127

e.	MultiPatches.....	128
5.	Conclusion sur le couplage d'absorbants	130
VII.	Conclusion sur les simulations et les modèles théoriques.....	131
Chapitre III : Réalisations et mesures		132
I.	Introduction aux réalisations et aux mesures	132
1.	But des mesures	132
2.	Procédure de réalisation et de mesure	132
II.	Premières réalisations	134
1.	Introduction.....	134
2.	Fallahi	134
3.	BigG	136
4.	CrossRoll Fallahi.....	137
5.	MultiCross.....	139
6.	Conclusion sur les premières réalisations	143
III.	Mesures abouties particulièrement intéressantes	143
1.	Introduction.....	143
2.	MultiPatches.....	144
3.	Multicouche de MultiCross	147
4.	Evolution de l'espacement entre le substrat et le plan de masse	152
5.	Absorbant sur cylindre	153
6.	Conclusion sur les mesures abouties particulièrement intéressantes.....	158
IV.	Mesures sur le couplage d'absorbants.....	159
1.	But	159
2.	Conditions de mesures	159
3.	Mesures	160
a.	Fallahi	160
b.	BigG	161
c.	CrossRoll Fallahi.....	163
d.	MultiCross.....	164
e.	MultiPatches.....	165
4.	Conclusion des mesures sur le couplage d'absorbants.....	166
V.	Conclusion sur les réalisations et les mesures	167

Conclusion générale	168
Annexe : Autres travaux.....	170
I. Introduction.....	170
II. Obtention d'un indice négatif avec des pistes coupées.....	170
III. Démonstrateur pour la transformation d'espace	176
IV. Conclusion sur les autres travaux.....	179
Références	180

Liste des figures

Figure 1.1 - (a) F-117 Nighthawk, et (b) Northrop B-2	24
Figure 1.2 - Schéma équivalent de l'impédance par le modèle de lignes de transmission appliqué aux équations des télégraphistes.....	28
Figure 1.3 - (a) illustration de la disposition d'un absorbant pyramidal, et (b) exemple d'absorbant pyramidal	31
Figure 1.4 - (a) courbe d'impédance idéale et courbe d'impédance typique, et (b) exemple de matériau absorbant chargé progressivement.....	32
Figure 1.5 - Illustration de la disposition des couches constitutives de l'absorbant à couches d'adaptation d'impédance	32
Figure 1.6 - Illustration des différents types de matériaux structuraux	33
Figure 1.7 - Illustration de la disposition d'une couche Dällenbach	34
Figure 1.8 - Illustration de la disposition d'un écran de Salisbury	34
Figure 1.9 - Illustration de la disposition de couches de Jaumann	36
Figure 1.10 - Illustration de la disposition d'un absorbant comportant des circuits analogiques comparé à son circuit équivalent.....	37
Figure 1.11 - Liste non exhaustive de formes de FSS.....	38
Figure 1.12 - Illustration de courbes typiques de progression de la permittivité et de la perméabilité d'un matériau magnétique en fréquence.....	40
Figure 1.13 - Illustration des travaux de N. I. Landy avec en (a) face avant, en (b) face arrière, et en (c) perspective.....	42
Figure 2.1 - Représentation de la réflexion et la transmission d'une onde à l'interface de deux milieux	45
Figure 2.2 - Modélisation 3D d'une cellule unité d'un absorbant à métamatériaux de type patchs carrés	46
Figure 2.3 - Modélisation 3D de plusieurs cellules unités d'un absorbant à métamatériaux de type patchs carrés	46
Figure 2.4 - Vue en coupe d'une cellule unité d'un absorbant à métamatériaux de type patchs carrés	47
Figure 2.5 - Comparaison de la simulation de l'absorption de l'absorbant à métamatériaux de type patchs carrés avec Ansys HFSS et CST Microwave Studio.....	48
Figure 2.6 - (a) amplitude du champ E à 4,54 GHz, (b) amplitude du champ H à 4,54 GHz, (c) amplitude du champ E à 13,65 GHz, et (d) amplitude du champ H à 13,65 GHz	48
Figure 2.7 - Impédance caractéristique de l'absorbant à métamatériaux de type patchs carrés	49
Figure 2.8 - Coefficient de réflexion de l'absorbant à métamatériaux de type patchs carrés.....	50

Figure 2.9 - Illustration de la longueur d'un patch (sans alimentation) et de la répartition du champ E sous ce dernier	52
Figure 2.10 - Illustration de l'aspect d'une cavité résonnante carrée.....	53
Figure 2.11 - Représentation et circuit équivalent de la cavité	54
Figure 2.12 - Détermination de l'amortissement nécessaire pour une absorption totale	56
Figure 2.13 - Comparaison de l'absorption à la première résonance pour les différentes valeurs de ϵ'' étudiées sous Ansys HFSS.....	57
Figure 2.14 - Comparaison de l'absorption à la première résonance pour les différentes valeurs de ϵ'' étudiées sous COMSOL Multiphysics	57
Figure 2.15 - Détermination de l'amortissement nécessaire pour une absorption totale et comparaison de l'absorption à la seconde résonance pour les différentes valeurs de ϵ'' étudiées sous COMSOL Multiphysics.....	58
Figure 2.16 - Variation de la distance entre patch Δl	59
Figure 2.17 - Plages où l'absorption est supérieure à 95 % pour différentes valeurs de L et h.....	59
Figure 2.18 - Calcul de l'impédance et de l'absorption à partir des paramètres déterminés par le modèle théorique pour la première résonance en (a) et pour la seconde résonance en (b).....	61
Figure 2.19 - Représentation des axes et des angles de variation pour l'incidence et la polarisation	61
Figure 2.20 - Variation de l'angle d'incidence autour de l'axe x	62
Figure 2.21 - Variation de l'angle d'incidence autour de l'axe y	63
Figure 2.22 - Variation de l'angle de polarisation autour de l'axe z	63
Figure 2.23 - Modélisation 3D d'une cellule unité d'un absorbant à métamatériaux de type patches rectangulaires.....	64
Figure 2.24 - Vue en coupe d'une cellule unité d'un absorbant à métamatériaux de type patches rectangulaires.....	64
Figure 2.25 - Variation de l'angle de polarisation autour de l'axe z pour l'absorbant à métamatériaux de type patches rectangulaires	65
Figure 2.26 - Modélisation 3D d'une cellule unité d'un absorbant à métamatériaux de type patches circulaires	67
Figure 2.27 - Modélisation 3D de plusieurs cellules unités d'un absorbant à métamatériaux de type patches circulaires.....	67
Figure 2.28 - Vue en coupe d'une cellule unité d'un absorbant à métamatériaux de type patches circulaires	67
Figure 2.29 - Comparaison de la simulation de l'absorption de l'absorbant à métamatériaux de type patches circulaires avec Ansys HFSS et CST Microwave Studio	68
Figure 2.30 - (a) amplitude du champ E à 5,525 GHz, (b) amplitude du champ H à 5,525 GHz, (c) amplitude du champ E à 15,95 GHz, et (d) amplitude du champ H à 15,95 GHz	69
Figure 2.31 - Impédance caractéristique de l'absorbant à métamatériaux de type patches circulaires..	69

Figure 2.32 - Illustration de l'aspect d'une cavité résonnante circulaire	71
Figure 2.33 - Détermination de l'amortissement nécessaire pour une absorption totale et comparaison de l'absorption à la première résonance pour les différentes valeurs de ϵ'' étudiées sous Ansys HFSS	73
Figure 2.34 - Détermination de l'amortissement nécessaire pour une absorption totale et comparaison de l'absorption à la seconde résonance pour les différentes valeurs de ϵ'' étudiées sous Ansys HFSS	74
Figure 2.35 - Calcul de l'impédance et de l'absorption à partir des paramètres déterminés par le modèle théorique pour la première résonance.....	75
Figure 2.36 - Calcul de l'impédance et de l'absorption à partir des paramètres déterminés par le modèle théorique pour la seconde résonance	75
Figure 2.37 - Représentation des axes et des angles de variation pour l'incidence et la polarisation	76
Figure 2.38 - Variation de l'angle d'incidence autour de l'axe x	77
Figure 2.39 - Variation de l'angle d'incidence autour de l'axe y	77
Figure 2.40 - Variation de l'angle de polarisation autour de l'axe z	78
Figure 2.41 - Modélisation 3D d'une cellule unité d'un absorbant à métamatériaux de type creux carrés	79
Figure 2.42 - Vue en coupe d'une cellule unité d'un absorbant à métamatériaux de type creux carrés	79
Figure 2.43 - Simulation de l'absorption de l'absorbant à métamatériaux de type creux carrés avec Ansys HFSS	81
Figure 2.44 - (a) amplitude du champ E à 6,75 GHz, (b) amplitude du champ H à 6,75 GHz, (c) amplitude du champ E à 9,4 GHz, et (d) amplitude du champ H à 9,4 GHz.....	81
Figure 2.45 - Impédance caractéristique de l'absorbant à métamatériaux de type creux carrés	82
Figure 2.46 - Modélisation 3D d'une cellule unité d'un absorbant à métamatériaux de type creux circulaires	83
Figure 2.47 - Vue en coupe d'une cellule unité d'un absorbant à métamatériaux de type creux circulaires	83
Figure 2.48 - Simulation de l'absorption de l'absorbant à métamatériaux de type creux circulaires avec Ansys HFSS	84
Figure 2.49 - (a) amplitude du champ E à 7,9 GHz, (b) amplitude du champ H à 7,9 GHz, (c) amplitude du champ E à 12,3 GHz, et (d) amplitude du champ H à 12,3 GHz.....	84
Figure 2.50 - Impédance caractéristique de l'absorbant à métamatériaux de type creux circulaires	85
Figure 2.51 - Rappel de l'absorption des différents types d'absorbants présentés.....	86
Figure 2.52 - Modélisation 3D d'une cellule unité d'un absorbant à métamatériaux de type patches circulaires constituée de plusieurs épaisseurs.....	87
Figure 2.53 - Vue en coupe d'une cellule unité d'un absorbant à métamatériaux de type patches circulaires constituée de plusieurs épaisseurs.....	88

Figure 2.54 - Simulation de l'absorption de l'absorbant à métamatériaux de type patchs circulaires constitué de plusieurs épaisseurs avec Ansys HFSS.....	89
Figure 2.55 - Impédance caractéristique de l'absorbant à métamatériaux de type patchs circulaires constitué de plusieurs épaisseurs	89
Figure 2.56 - Modélisation 3D d'une cellule unité d'un absorbant à métamatériaux constitué de plusieurs patchs rectangulaires juxtaposés	90
Figure 2.57 - Simulation de l'absorption de l'absorbant à métamatériaux constitué de plusieurs patchs rectangulaires juxtaposés avec Ansys HFSS.....	92
Figure 2.58 - (a) amplitude du champ E à 2,95 GHz, et (b) amplitude du champ E à 5,15 GHz.....	92
Figure 2.59 - Impédance caractéristique de l'absorbant à métamatériaux constitué de plusieurs patchs rectangulaires juxtaposés.....	93
Figure 2.60 - Modélisation 3D d'une cellule unité d'un absorbant à métamatériaux constitué de plusieurs patchs carrés juxtaposés.....	94
Figure 2.61 - Simulation de l'absorption de l'absorbant à métamatériaux constitué de plusieurs patchs carrés juxtaposés avec Ansys HFSS.....	95
Figure 2.62 - (a) amplitude du champ E à 9,4 GHz, (b) amplitude du champ E à 9,55 GHz, (c) amplitude du champ E à 9,9 GHz, et (d) amplitude du champ E à 10,3 GHz	95
Figure 2.63 - Impédance caractéristique de l'absorbant à métamatériaux constitué de plusieurs patchs carrés juxtaposés	96
Figure 2.64 - Modélisation 3D d'une cellule unité d'un absorbant de type Fallahi	97
Figure 2.65 - Vue en coupe d'une cellule unité d'un absorbant de type Fallahi	98
Figure 2.66 - Absorption de l'absorbant à métamatériaux de type Fallahi.....	99
Figure 2.67 - Modélisation 3D d'une cellule unité d'un absorbant de type BigG	99
Figure 2.68 - Vue en coupe d'une cellule unité d'un absorbant de type BigG.....	100
Figure 2.69 - Absorption de l'absorbant de type BigG	100
Figure 2.70 - Modélisation 3D d'une cellule unité d'un absorbant de type CrossRoll Fallahi.....	101
Figure 2.71 - Vue en coupe d'une cellule unité d'un absorbant de type CrossRoll Fallahi	101
Figure 2.72 - Absorption de l'absorbant de type CrossRoll Fallahi	102
Figure 2.73 - Modélisation 3D d'une cellule unité d'un absorbant de type MultiCross	104
Figure 2.74 - Vue en coupe d'une cellule unité d'un absorbant de type MultiCross.....	104
Figure 2.75 - Absorption de l'absorbant de type MultiCross	104
Figure 2.76 - Modélisation 3D d'une cellule unité d'un absorbant de type MultiPatches.....	106
Figure 2.77 - Vue en coupe d'une cellule unité d'un absorbant de type MultiPatches	107
Figure 2.78 - Absorption de l'absorbant de type MultiPatches	108
Figure 2.79 - Vue en coupe d'un empilement de six couches d'absorbant de type MultiCross	109
Figure 2.80 - Absorption pour 1, 2 et 3 couches d'absorbant de type MultiCross	109

Figure 2.81 - Absorption pour 4, 5 et 6 couches d'absorbant de type MultiCross	110
Figure 2.82 - Simulation de l'absorption pour un espacement entre substrat et plan de masse de 0,2 mm, 0,4 mm et 0,6 mm pour l'absorbant de type MultiCross.....	111
Figure 2.83 - Modélisation 3D d'une section de cylindre recouvert d'absorbant de type MultiCross ...	112
Figure 2.84 - Modélisation 3D d'une section de cylindre recouvert d'absorbant de type MultiCross vue de face	113
Figure 2.85 - Schéma du montage du cylindre recouvert d'absorbant de type MultiCross en simulation	113
Figure 2.86 - Comparatif des paramètres S11 du cylindre métallique de diamètre 100 mm seul et du cylindre recouvert d'une couche d'absorbant de type MultiCross en simulation	114
Figure 2.87 - Comparatif des paramètres S11 du cylindre métallique de diamètre 220 mm seul et du cylindre recouvert d'une couche d'absorbant de type MultiCross en simulation	114
Figure 2.88 - Vue en coupe de l'absorbant magnétique 1	116
Figure 2.89 - Absorption de l'absorbant magnétique 1	117
Figure 2.90 - Vue en coupe de l'absorbant magnétique 1 couplé avec un absorbant à métamatériaux	117
Figure 2.91 - Vue en coupe de l'absorbant magnétique 2	118
Figure 2.92 - Absorption de l'absorbant magnétique 2	118
Figure 2.93 - Vue en coupe de l'absorbant magnétique 2 couplé avec un absorbant à métamatériaux	119
Figure 2.94 - Représentation des différents paramètres permettant de calculer un substrat équivalent	120
Figure 2.95 - Rappel de la modélisation 3D d'une cellule unité d'un absorbant de type Fallahi.....	121
Figure 2.96 - Comparaison de l'absorption de l'empilement Fallahi/absorbant magnétique 1 et de l'absorbant magnétique 1 seul.....	122
Figure 2.97 - Comparaison de l'absorption de l'empilement Fallahi/absorbant magnétique 2 et de l'absorbant magnétique 2 seul.....	122
Figure 2.98 - Rappel de la modélisation 3D d'une cellule unité d'un absorbant de type BigG.....	123
Figure 2.99 - Comparaison de l'absorption de l'empilement BigG/absorbant magnétique 1 et de l'absorbant magnétique 1 seul.....	124
Figure 2.100 - Comparaison de l'absorption de l'empilement BigG/absorbant magnétique 2 et de l'absorbant magnétique 2 seul.....	124
Figure 2.101 - Rappel de la modélisation 3D d'une cellule unité d'un absorbant de type CrossRoll Fallahi	125
Figure 2.102 - Comparaison de l'absorption de l'empilement CrossRoll Fallahi/absorbant magnétique 1 et de l'absorbant magnétique 1 seul.....	126

Figure 2.103 - Comparaison de l'absorption de l'empilement CrossRoll Fallahi/absorbant magnétique 2 et de l'absorbant magnétique 2 seul.....	126
Figure 2.104 - Rappel de la modélisation 3D d'une cellule unité d'un absorbant de type MultiCross	127
Figure 2.105 - Comparaison de l'absorption de l'empilement MultiCross/absorbant magnétique 1 et de l'absorbant magnétique 1 seul.....	127
Figure 2.106 - Comparaison de l'absorption de l'empilement MultiCross/absorbant magnétique 2 et de l'absorbant magnétique 2 seul.....	128
Figure 2.107 - Rappel de la modélisation 3D d'une cellule unité d'un absorbant de type MultiPatches...	129
Figure 2.108 - Comparaison de l'absorption de l'empilement MultiPatches/absorbant magnétique 1 et de l'absorbant magnétique 1 seul.....	129
Figure 2.109 - Comparaison de l'absorption de l'empilement MultiPatches/absorbant magnétique 2 et de l'absorbant magnétique 2 seul.....	130
Figure 3.1 - Schéma du montage pour la mesure d'absorbant à métamatériaux	133
Figure 3.2 - Photo de la chambre anéchoïque utilisée.....	133
Figure 3.3 - Photo du prototype d'absorbant à métamatériaux de type Fallahi	134
Figure 3.4 - Photo d'une cellule unité du prototype d'absorbant à métamatériaux de type Fallahi....	135
Figure 3.5 - Comparatif de l'absorption simulée, de la mesure à Airbus Group et de la mesure à l'IEF pour l'absorbant à métamatériaux de type Fallahi.....	135
Figure 3.6 - Photo du prototype d'absorbant à métamatériaux de type BigG	136
Figure 3.7 - Photo d'une cellule unité du prototype d'absorbant à métamatériaux de type BigG.	137
Figure 3.8 - Comparatif de l'absorption simulée, de la mesure à Airbus Group et de la mesure à l'IEF pour l'absorbant à métamatériaux de type BigG.....	137
Figure 3.9 - Photo du prototype d'absorbant à métamatériaux de type CrossRoll Fallahi.....	138
Figure 3.10 - Photo d'une cellule unité du prototype d'absorbant à métamatériaux de type CrossRoll Fallahi	138
Figure 3.11 - Comparatif de l'absorption simulée, de la mesure à Airbus Group et de la mesure à l'IEF pour l'absorbant à métamatériaux de type CrossRoll Fallahi	139
Figure 3.12 - Photo du prototype d'absorbant à métamatériaux de type MultiCross	140
Figure 3.13 - Photo d'une cellule unité du prototype d'absorbant à métamatériaux de type MultiCross	140
Figure 3.14 - Comparatif de l'absorption simulée, de la mesure à Airbus Group et de la mesure à l'IEF pour l'absorbant à métamatériaux de type MultiCross.....	141
Figure 3.15 - Mesure de l'absorption de MultiCross suivant plusieurs angles d'incidence selon θ_x	141

Figure 3.16 - Mesure de l'absorption de MultiCross suivant plusieurs angles d'incidence selon θ_y ...	142
Figure 3.17 - Mesure de l'absorption de MultiCross suivant plusieurs angles de polarisation selon φ_z	142
Figure 3.18 - Photo du prototype d'absorbant à métamatériaux de type MultiPatches.....	144
Figure 3.19 - Photo d'une cellule unité du prototype d'absorbant à métamatériaux de type MultiPatches	144
Figure 3.20 - Comparatif de l'absorption simulée, de la mesure à Airbus Group et de la mesure à l'IEF pour l'absorbant à métamatériaux de type MultiPatches	145
Figure 3.21 - Mesure de l'absorption de MultiPatches suivant plusieurs angles d'incidence selon θ_x ..	146
Figure 3.22 - Mesure de l'absorption de MultiPatches suivant plusieurs angles d'incidence selon θ_y ..	146
Figure 3.23 - Mesure de l'absorption de MultiPatches suivant plusieurs angles de polarisation selon φ_z	147
Figure 3.24 - Vue en coupe d'un empilement de six couches d'absorbant de type MultiCross	148
Figure 3.25 - Comparatif de l'absorption simulée, de la mesure à Airbus Group et de la mesure à l'IEF pour l'absorbant à métamatériaux de type MultiCross.....	148
Figure 3.26 - Comparatif de l'absorption simulée, de la mesure à Airbus Group et de la mesure à l'IEF pour 2 couches de MultiCross.....	149
Figure 3.27 - Comparatif de l'absorption simulée et de la mesure à l'IEF pour 3 couches de MultiCross	150
Figure 3.28 - Comparatif de l'absorption simulée et de la mesure à l'IEF pour 4 couches de MultiCross	150
Figure 3.29 - Comparatif de l'absorption simulée et de la mesure à l'IEF pour 5 couches de MultiCross	151
Figure 3.30 - Comparatif de l'absorption simulée et de la mesure à l'IEF pour 6 couches de MultiCross	151
Figure 3.31 - Vue en coupe d'une cellule unité d'un absorbant de type MultiCross	152
Figure 3.32 - Mesure de l'absorption pour un espacement entre substrat et plan de masse de 0,2 mm, 0,4 mm et 0,6 mm pour l'absorbant de type MultiCross.....	153
Figure 3.33 - Photo du prototype d'absorbant à métamatériaux de type MultiCross sur le cylindre de 100 mm de diamètre.....	154
Figure 3.34 - Schéma du montage pour la mesure d'absorbant à métamatériaux sur cylindre en bistatisme	154
Figure 3.35 - Comparatif des paramètres S11 en mesure du cylindre métallique de diamètre 100 mm seul et du cylindre recouvert d'une couche de l'absorbant de type MultiCross	155

Figure 3.36 - Comparatif de la simulation et de la mesure du cylindre de diamètre 100 mm recouvert d'une couche de l'absorbant de type MultiCross normalisé par rapport au cylindre métallique seul	155
Figure 3.37 - Comparatif de la réflexion en mesure bi-statique du cylindre métallique de diamètre 100 mm seul et du cylindre recouvert d'une couche de l'absorbant de type MultiCross sur 180°	156
Figure 3.38 - Comparatif des paramètres S11 en mesure du cylindre métallique de diamètre 220 mm seul et du cylindre recouvert d'une couche de l'absorbant de type MultiCross	157
Figure 3.39 - Comparatif de la simulation et de la mesure du cylindre de diamètre 220 mm recouvert d'une couche de l'absorbant de type MultiCross normalisé par rapport au cylindre métallique seul	157
Figure 3.40 - Comparatif de la réflexion en mesure bi-statique du cylindre métallique de diamètre 220 mm seul et du cylindre recouvert d'une couche de l'absorbant de type MultiCross sur 180°	158
Figure 3.41 - Vue en coupe de l'absorbant magnétique 2 couplé avec un absorbant à métamatériaux	159
Figure 3.42 - Rappel de la modélisation 3D d'une cellule unité d'un absorbant de type Fallahi.....	160
Figure 3.43 - Comparaison de la simulation et la mesure de l'absorption de l'empilement Fallahi/absorbant magnétique 2 ainsi que l'absorbant magnétique 2 seul.....	161
Figure 3.44 - Rappel de la modélisation 3D d'une cellule unité d'un absorbant de type BigG.....	162
Figure 3.45 - Comparaison de la simulation et la mesure de l'absorption de l'empilement BigG/absorbant magnétique 2 ainsi que l'absorbant magnétique 2 seul.....	162
Figure 3.46 - Rappel de la modélisation 3D d'une cellule unité d'un absorbant de type CrossRoll Fallahi	163
Figure 3.47 - Comparaison de la simulation et la mesure de l'absorption de l'empilement CrossRoll Fallahi/absorbant magnétique 2 ainsi que l'absorbant magnétique 2 seul.....	163
Figure 3.48 - Rappel de la vue 3D d'une cellule unité d'un absorbant de type MultiCross	164
Figure 3.49 - Comparaison de la simulation et la mesure de l'absorption de l'empilement MultiCross/absorbant magnétique 2 ainsi que l'absorbant magnétique 2 seul.....	165
Figure 3.50 - Rappel de la modélisation 3D d'une cellule unité d'un absorbant de type MultiPatches... ..	165
Figure 3.51 - Comparaison de la simulation et la mesure de l'absorption de l'empilement MultiPatches/absorbant magnétique 2 ainsi que l'absorbant magnétique 2 seul.....	166
Figure 4.1 - (a) cellule unité, et (b) photo du prototype issues des travaux de J. Zhou	170
Figure 4.2 - (a) réponse de la structure de l'équipe de J. Zhou, et (b) réponse de la structure de l'équipe de J. Zhou sans les pistes continues	171
Figure 4.3 - Paramètres géométriques qu'il est possible de faire varier	171
Figure 4.4 - (a) variation de l'épaisseur du substrat, (b) variation du décalage selon x, et (c) variation du décalage selon y.....	172

Figure 4.5 -	Cellule unité de notre prototype avec les différents paramètres géométriques	172
Figure 4.6 -	(a) comparaison de la partie réelle de la permittivité relative pour deux valeurs de décalage selon x, et (b) comparaison de la partie réelle de la perméabilité relative pour deux valeurs de décalage selon x.....	173
Figure 4.7 -	Comparaison de la partie réelle de l'indice pour deux valeurs de décalage selon x ...	173
Figure 4.8 -	Cellule unité de notre prototype optimisé avec les différents paramètres géométriques	174
Figure 4.9 -	Notre prototype optimisé	174
Figure 4.10 -	(a) comparaison de la partie réelle de l'indice en simulation et en mesure, et (b) partie réelle de l'indice pour 1 à 4 couches.....	174
Figure 4.11 -	Simulation à 10,2 GHz du prisme à pistes coupées.....	175
Figure 4.12 -	(a) photo du prototype de prisme et du banc de mesure, et (b) valeur de l'indice déduite des mesures	176
Figure 4.13 -	Modélisation 3D de la structure pour changer la direction d'émission par transformation d'espace	176
Figure 4.14 -	Distribution de l'énergie dans la structure à transformation d'espace	177
Figure 4.15 -	Prototype final de la structure à transformation d'espace.....	177
Figure 4.16 -	Adaptation en mesure comparée à la simulation et à l'antenne patch seule (nommée "source")	178
Figure 4.17 -	(a) schéma du fonctionnement du banc de mesure, et (b) mesure du rayonnement en fonction de l'angle.....	178

INTRODUCTION

Cette thèse a pour objectifs d'étudier théoriquement et expérimentalement les conditions nécessaires pour réaliser des structures absorbantes de faible épaisseur devant la longueur d'onde, de faible masse, à faible coût donc utilisant des matériaux de l'industrie, à bande d'absorption réglable en fréquence et qu'il est possible de coupler à des absorbants commerciaux pour obtenir une large bande d'absorption.

La thèse prend place dans le projet REI Meta Absorbant en partenariat avec Airbus Group Innovation Works, la DGA et le Laboratoire Energétique Mécanique Electromagnétisme (LEME) de l'université Paris Ouest Nanterre La Défense. Dans le cadre de ce projet, nous nous sommes intéressés à la bande de fréquence 2 à 20 GHz pour des applications compatibilité électromagnétique et radar. Les structures absorbantes que nous avons étudiées sont des structures reposant sur un plan métallique, le but étant de pouvoir réduire la surface équivalente radar d'objets existants.

Dans le premier chapitre, j'aborde l'état de l'art avec quelques points clés, puis les techniques de réduction de la surface équivalente radar, le fonctionnement des absorbants électromagnétiques et les différents types existant.

Le second chapitre traite des simulations que nous avons réalisées et des modèles théoriques que nous employons pour le développement d'absorbants à métamatériaux aux travers d'exemples. Nous avons notamment développé une méthode théorique qui permet d'obtenir une absorption totale avec nos structures. Des méthodes d'élargissement de la bande de fréquence d'absorption sont données. Puis nous parlons des prototypes réalisés du point de vue simulation et de l'impact de certains paramètres comme l'empilement de structures identiques, l'espacement entre substrat et plan de masse et la conformation de nos matériaux. Enfin le couplage d'absorbants à métamatériaux et d'absorbants commerciaux, les absorbants magnétiques, est étudié.

Le dernier chapitre est consacré aux mesures réalisées sur les prototypes que nous avons fabriqués. Ce chapitre reprend chaque structure dans l'ordre du deuxième chapitre. Les mesures sont à chaque fois comparées aux simulations et les écarts sont commentés.

En annexe, les travaux réalisés à l'IEF en dehors du cadre de ma thèse sont présentés.

CHAPITRE I : ETAT DE L'ART

I. Introduction

1. Points clés

Les matériaux absorbants électromagnétiques, ou « Radar Absorbing Materials » (RAM), ont été créés à la fois aux USA et en Allemagne lors de la seconde guerre mondiale. Un absorbant idéal ressemble à une peinture ou à un revêtement efficace pour toutes les polarisations sur une grande bande de fréquences et une large plage d'incidences. Un tel matériau n'existe pas en réalité et il semble difficile d'avoir un prototype répondant parfaitement à cette définition. Les applications des absorbants ressortent principalement du domaine de la Compatibilité ElectroMagnétique (CEM) et de la discrétion radar. Ils interviennent ainsi pour réduire les problèmes d'interférences entre bandes de fréquences des systèmes de télécommunications terrestres et/ou spatiaux. Par exemple, ils peuvent être utilisés dans les chambres de test de propriétés électromagnétiques comme les chambres anéchoïques.

En 2002, le groupe de N. Engheta¹ a montré dans un article théorique que si une surface à métamatériaux est placée à proximité d'une plaque plane parfaitement conductrice, dans une certaine bande de fréquences, cette structure peut réagir comme une plaque plane de forte impédance sur sa partie supérieure. Ainsi, si une feuille résistive est placée sur cette plaque de forte impédance, on peut obtenir une structure fine équivalente à un absorbant d'ondes électromagnétiques qui a des dimensions réduites.

Dans la suite de ce chapitre, nous abordons la notion de Surface Equivalente Radar (SER), les techniques pour la réduire, puis nous parlons plus particulièrement des absorbants électromagnétiques dans leur globalité.

2. Notions clés

a. Surface Equivalente Radar

La Surface Equivalente Radar (SER ou RCS pour Radar Cross Section en anglais), ou surface efficace radar, est une propriété physique indiquant la capacité de rétrodiffusion d'un signal radar par une cible. La surface équivalente radar est fonction de la forme de l'objet, de la nature de ses matériaux constitutifs ainsi que de la longueur et de la polarisation de l'onde, des angles d'incidence et de réflexion du rayonnement.

La SER est un paramètre spécifique à un quelconque objet influant grandement sur sa susceptibilité d'être détecté par un radar. Représentée dans une équation, la SER est désignée par σ (sigma) exprimée en mètre carré :

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{P_s}{P_i} \quad (1)$$

où P_i est la densité de la puissance au niveau de la cible illuminée par le radar et P_s la densité de la puissance dissipée à une distance de R de cette cible.

L'utilisation de technologies furtives, pour minimiser la SER, diminue la détection des appareils militaires mais dépend de la longueur d'onde des radars ennemis. Chaque technique de furtivité ayant sa bande de fonctionnement.

b. Mesure et simulation de SER

Avec l'adoption généralisée des radars, la mesure de SER est devenue extrêmement importante dans toutes les applications militaires. La SER d'un objet se mesure de manière typique à l'aide d'antennes. Cela peut s'effectuer en plein air ou dans une chambre anéchoïque. Il est aujourd'hui beaucoup plus courant de calculer la SER d'un objet par des programmes de simulation afin de pouvoir optimiser à moindre coûts la SER d'un objet en cours de conception.

c. Réduction de la SER

L'intérêt essentiel de réduire la SER est de rendre moins détectable, classifiable ou identifiable un objet vis-à-vis d'un radar. On peut la réduire en modifiant la forme d'un objet, en utilisant des matériaux absorbants ou perméables aux rayonnements et/ou en réduisant de manière active la puissance réfléchi.

Certains avions possèdent une forme spécialement étudiée empêchant la réflexion de la majeure partie du faisceau radar en direction de l'émetteur. On obtient cela en utilisant presque exclusivement des surfaces planes et en évitant les angles droits afin d'éviter la réflexion d'un rayonnement incident en direction de son émetteur.

Les matériaux absorbants provoquent soit la transformation du rayonnement en un échauffement de la cible soit, si la longueur d'onde est connue, en l'éliminant par rotation de phase.

La réduction active de la SER s'opère par l'émission d'ondes d'interférences et n'est pas encore utilisée massivement.

Nous allons expliciter les grandes techniques de réduction de la SER dans la partie suivante.

II. Techniques de réduction de la SER

1. Introduction

Dans cette partie, nous allons traiter des méthodes de réduction de la SER, de leurs avantages et inconvénients. Les trois techniques principales sont : l'optimisation de la géométrie, les matériaux absorbants et la suppression par SER active.

La réduction de la SER nécessite une approche par ingénierie des systèmes afin de réaliser les meilleurs compromis dans la conception d'objets. Les méthodes de réduction de la SER comportent des avantages mais également un certain nombre d'inconvénients. Par exemple, la modification de la forme d'un avion est limitée à certains principes aérodynamiques. Si des matériaux absorbant (RAM) sont utilisés, la réduction de la SER est obtenue par l'absorption d'énergie à l'intérieur de l'absorbant, en laissant une zone d'ombre selon d'autres directions. D'autre part, l'utilisation de RAM présente des inconvénients tels que le poids, le coût et l'exigence de maintenance élevés.

2. Les différentes techniques de réduction de SER

Les différentes techniques qui suivent sont souvent complémentaires. La plus utilisée est l'optimisation de géométrie qui permet de réduire la SER pour la plupart des surfaces. Elle est souvent couplée aux absorbants qui sont utilisés pour des applications plus localisées. Les absorbants réduisent également les effets d'ondes rampantes contrairement à l'optimisation de géométrie.

a. Optimisation de géométrie

Traditionnellement, l'optimisation de géométrie est considérée comme la première étape de réduction de la SER. L'objectif de mise en forme est de concevoir les surfaces et les bords de l'objet afin de réfléchir ou diffracter l'onde incidente dans une direction autre que le radar. Cela ne peut être accompli pour toutes les surfaces ou tous les angles, car il y aura toujours certains angles sous lesquels les surfaces sont vues à incidence normale, et à ces angles les échos seront élevés. Le succès de l'optimisation de la géométrie dépend de l'existence d'angles selon lesquelles la SER est moins important que d'autres. C'est une technique qui fonctionne sur la base de l'optique géométrique, il est implicite dans cette méthode que la cible est très grande électriquement².

Il est généralement préférable de garder de grandes surfaces aussi plate et lisse que possible afin que d'éventuelle réflexion non souhaitée soit confinée sur des régions très localisées³. Pour un aéronef, c'est au niveau de cône avant, la tête, que l'intérêt de la réduction de la SER est important. Ainsi, il est souhaitable de déplacer les secteurs à forte SER loin du cône avant, vers les flancs de l'appareil par exemple. Si une cible n'est pratiquement jamais vu de dessus, les sources d'échos, tels que les entrées d'air moteur, peuvent être placées sur le côté supérieur de la cible, où elles seront masquées par l'appareil, vu de dessous.

Le Lockheed F-117 est un exemple d'optimisation de géométrie par facettage de surface. Les bords de l'appareil sont orientés de telle sorte que la majorité des ondes réfléchies soit orientées selon un angle différent par rapport au point d'incidence. Le Northrop B-2 utilise également un certain facettage, en particulier sur les bords de fuite des ailes. En forme de plan, les bords droits sont dominants.



Figure 1.1 - (a) F-117 Nighthawk⁴, et (b) Northrop B-2⁵

Pour des navires et des véhicules au sol, les angles dièdres et trièdres, et les cylindres circulaires sont les principaux contributeurs à la SER. Ces formes peuvent être évitées en contraignant les intersections des différentes surfaces à seulement des angles aigus ou obtus. Dans le cas des navires en raison de la présence de la surface de la mer, de cloisons verticales et de mâts, des angles droits sont omniprésents. Fortement créateurs de SER, leurs effets peuvent être réduits par l'inclinaison des cloisons à la verticale. Toutefois, cela est pratiquement impossible à réaliser sur des navires existants et donc doit être pris en compte lors de nouvelles conceptions. Réduire l'inclinaison de parois verticales est souvent synonyme de perte de performance⁶.

b. Matériaux absorbants radar

Souvent couplés avec l'optimisation de géométrie, les matériaux absorbants radars réduisent l'énergie réfléchi vers le radar de façon passive. L'énergie envoyée par le radar est supprimée par un ou plusieurs mécanismes, qui peuvent impliquer les propriétés diélectriques ou magnétiques des matériaux.

Si la fréquence de fonctionnement du dispositif radar est connue, il est possible de réaliser un matériau qui réfléchira une partie de l'onde incidente en opposition de phase afin de réduire la SER d'un objet caché derrière. Ce type de dispositif ne fonctionne malheureusement que pour des bandes de fréquences étroites.

Il est également possible d'utiliser des matériaux à pertes. Les pertes sont essentiellement dues à la conversion de l'énergie en chaleur. Ces matériaux sont calibrés à la fabrication et peuvent fonctionner sur de larges bandes de fréquences. La plupart des absorbants ne dissipent pas assez d'énergie pour devenir détectable thermiquement lorsqu'ils sont éclairés par un radar. La capacité d'un matériau à convertir l'énergie en chaleur est déterminée par la partie imaginaire de sa permittivité diélectrique ϵ et de sa perméabilité magnétique μ .

Nous reviendrons plus en détail sur ce type de matériaux dans le deuxième chapitre.

c. Suppression de SER active

La suppression active implique de modifier et de retransmettre le signal radar reçu. La cible doit ainsi émettre un rayonnement en même temps que l'impulsion reçue, dont l'amplitude et la phase doivent annuler l'énergie réfléchi. Les données requises sont l'angle d'arrivée, l'intensité, la forme de l'onde et la fréquence de l'onde reçue. Un système de suppression active doit capter ces données avec précision et renvoyer une onde avec une amplitude et une phase correcte. Évidemment, cela exige un véritable défi pour le système, car plus la fréquence augmente, plus le travail devient difficile.

Il existe deux niveaux de suppression :

1. Pleinement actif : Le dispositif de suppression reçoit, amplifie et retransmet le signal incident de telle sorte qu'il ne soit plus en phase avec celui de la cible. L'amplitude du signal transmis, la phase, la fréquence et la polarisation peuvent être ajustées pour compenser la modification des paramètres de l'onde incidente.

2. Semi-actif : Aucune amplification du signal n'est fournie par le dispositif de suppression, mais un ajustement passif est possible afin de permettre au signal réémis de compenser les variations sous certaines limites des paramètres de l'onde incidente.

Les exigences relatives à un système entièrement actif sont tellement importantes que cela les rend quasiment inutilisables en pratique. Il nécessite un émetteur et des antennes qui doivent couvrir l'intégralité des angles, des fréquences, des densités de puissance incidente, et les polarisations selon lesquels on souhaite réduire la SER. Un système semi-actif n'est pas aussi

complicqué en termes de matériel, mais l'utilisation de dispositifs réglables nécessite tout de même un minimum d'équipement.

3. Problèmes liés aux techniques de réduction de la SER

Chacune des techniques décrites pour la réduction de la SER apporte ses propres inconvénients et ses avantages et nécessite donc des compromis. L'approche d'ingénierie des systèmes est nécessaire pour optimiser la conception du système final.

Le plus important problème de la réduction de la SER est le coût induit. Les autres problèmes sont nombreux, à savoir : un poids supplémentaire, une charge utile réduite, la nécessité d'entretien élevé, une gamme réduite de fonctionnement et bien d'autres limitations opérationnelles. L'utilisation finale de l'objet développé détermine le taux de réduction de SER requise et les méthodes qui sont employées.

4. Conclusion

Dans cette partie, trois techniques de base de la réduction de SER ont été présentées. Sur les trois, l'utilisation de l'optimisation de la géométrie et les matériaux absorbants sont les plus utilisés à ce jour.

Nous allons désormais nous intéresser aux matériaux absorbants qui sont une composante essentielle de la réduction de l'énergie réfléchie vers le radar, par absorption ou par utilisation d'interférences destructives.

III. Matériaux absorbants

Les absorbants actuels sont issues des recherches débutées durant la seconde guerre mondiale afin de se cacher des premiers radars. Les premières applications des absorbants étaient limitées, se cantonnant à réduire tant que possible la signature des avions et des périscopes de sous-marins tout en essayant de ne pas augmenter leur masse. Leur utilisation s'est aujourd'hui diversifiée à d'autres applications notamment en Compatibilité ElectroMagnétique (CEM). Nous allons présenter les différents absorbants classiques et commerciaux répartis en plusieurs catégories : diélectriques, structuraux, résonants, comportant des circuits analogiques, adaptatifs et magnétiques. Nous abordons également les récentes avancées sur de nouveaux matériaux et de nouvelles techniques.

1. Mécanismes de pertes électromagnétiques et calcul d'impédance

La réduction de la SER peut être réalisée par deux principaux mécanismes : l'absorption de l'onde incidente et la suppression de l'onde réfléchie.

La suppression de l'onde réfléchie se fait grâce à des absorbants dits résonants. Le mécanisme de suppression consiste à faire entrer en opposition de phase les ondes réfléchies par l'objet à dissimuler et par le premier plan de l'absorbant. Si l'absorbant est traversant, c'est à dire qu'il n'est pas en contact avec l'objet à cacher ou une quelconque surface métallique, l'opposition de phase se fera entre les ondes réfléchies par les différents plans de la structure de l'absorbant. Le principe est de créer des interférences destructives.

a. Coefficient de réflexion et impédance

L'absorption de l'onde incidente est conditionnée par l'impédance d'entrée du matériau étudié. Cela définit le niveau de réflexion à l'interface avec l'espace libre.

Si le coefficient de réflexion Γ tend vers 0, il n'y a pas de réflexion à l'interface avec notre absorbant. Toute l'énergie entre dans le matériau absorbant :

$$\Gamma = \frac{Z_c - Z_0}{Z_c + Z_0} \quad (2)$$

Dans notre cas, Z_0 est l'impédance caractéristique du vide, égale à 120π soit approximativement 377Ω et Z_c impédance caractéristique de notre matériau absorbant.

Aussi, les matériaux électromagnétiques sont définis par leur permittivité ε (en $F.m^{-1}$) et leur perméabilité μ , (en $H.m^{-1}$) de la façon suivante :

$$\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon'' = \varepsilon_0 (\varepsilon_r' + j\varepsilon_r'') \quad (3)$$

$$\mu = \mu' + j\mu'' = \mu_0 (\mu_r' + j\mu_r'') \quad (4)$$

Avec ε_0 permittivité de vide ($8,85.10^{-12}.m^{-3}.kg^{-1}.s^4.A^2$) et μ_0 perméabilité du vide ($4.\pi.10^{-7}.kg.m.A^{-2}.s^{-2}$). La partie réelle représente l'aptitude à stocker l'énergie d'un matériau et la partie imaginaire représente l'aptitude à dissiper l'énergie.

A des fréquences micro-ondes, l'énergie absorbée peut être transférée dans les molécules, de la même façon que pour les pertes ohmiques pour un conducteur. Les molécules agissent comme des dipôles qui oscillent quand elles sont soumises à une onde. Les pertes sont définies par la tangente de perte diélectrique et la tangente de perte magnétique :

$$\tan \delta_\varepsilon = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (5)$$

$$\tan \delta_\mu = \frac{\mu''}{\mu'} \quad (6)$$

On peut donc écrire la permittivité et la perméabilité de la façon suivante :

$$\varepsilon = \varepsilon' (1 + j \tan \delta_\varepsilon) \quad (7)$$

$$\mu = \mu' (1 + j \tan \delta_\mu) \quad (8)$$

On exprime également la conductivité du matériau à l'aide de cette expression :

$$\varepsilon_r'' = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \quad (9)$$

Où σ est la conductivité du matériau (en S/m) et ω est la vitesse angulaire de l'onde (en rad/s).

En notation polaire, les valeurs relatives sont tel que :

$$\varepsilon_r = |\varepsilon_r| e^{j\delta_\varepsilon} \quad (10)$$

$$\mu_r = |\mu_r| e^{j\delta_\mu} \quad (11)$$

On sait que :

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad R = \rho \frac{l}{A} \quad G = \frac{1}{R} \quad (12)$$

Avec ρ résistivité électrique du matériau (en $\Omega.m$), R résistance du matériau (en Ω), G conductance du matériau (en S), l épaisseur du matériau étudié (en m) et A section du matériau étudié (en m^2).

Aussi, il est possible de définir l'inductance équivalente L (en H) et la capacité équivalente C (en F) du matériau grâce aux équations suivantes :

$$L = \mu \frac{A}{l} \quad C = \varepsilon \frac{A}{l} \quad (13)$$

Grâce au modèle de lignes de transmission appliqué aux équations des télégraphistes, on peut déduire l'impédance caractéristique du matériau étudié :

$$Z_c = \sqrt{\frac{R+jL\omega}{G+jC\omega}} \quad (14)$$

Selon ce modèle :

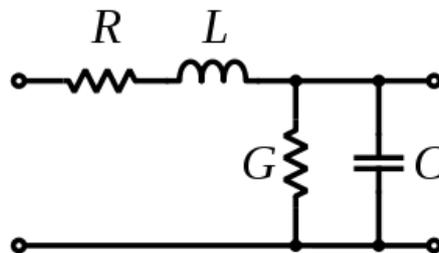


Figure 1.2 - Schéma équivalent de l'impédance par le modèle de lignes de transmission appliqué aux équations des télégraphistes

On simplifie souvent cette équation en considérant le modèle de lignes de transmission sans perte (R et G égales à zéro), d'où :

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} Z_0 \quad (15)$$

b. Atténuation, déphasage et indice de réfraction

On peut également calculer le coefficient de propagation qui nous donnera des indications sur l'atténuation du matériau et le déphasage qu'il implique :

$$\gamma = \sqrt{(R + jL\omega)(G + jC\omega)} = \alpha + j\beta \quad (16)$$

Avec α constante d'atténuation (en Np/m) et β constante de phase (en rad/m). On sait que 1 Np (Neper) est égal à $\frac{20}{\ln 10}$ dB soit approximativement 8,69 dB.

Il est possible de calculer la constante d'atténuation pour un diélectrique de cette façon :

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon'}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2} - 1 \right)} \quad (17)$$

De la même façon pour la constante de phase β :

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon'}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2} + 1 \right)} \quad (18)$$

La vitesse de phase (en m/s) dans un matériau est défini par :

$$v_\phi = \frac{\omega}{\beta} = \frac{c_0}{n} \quad (19)$$

Avec n indice de réfraction.

Il est également possible d'exprimer la longueur d'onde λ (en m) dans un matériau par la relation suivante :

$$\lambda = \frac{c_0}{nf} = \frac{2\pi}{\beta} \quad (20)$$

La constante de phase dans un matériau peut également s'écrire ainsi :

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_0} n = \frac{\omega}{c_0} n = \frac{\omega}{v_\phi} \quad (21)$$

L'indice de réfraction s'exprime de la façon suivante :

$$n = \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \quad (22)$$

Avec :

$$Re(n) = \frac{c_0}{\omega} \beta \quad \text{et} \quad Im(n) = \frac{c_0}{2\omega} \alpha \quad (23)$$

2. Absorbants diélectriques

Ce type d'absorbant est la base pour la création d'autres absorbants. Il s'agit de mousses, de polymères ou de structures nids d'abeilles chargées à l'aide de particules de carbone ou de métal (fer, aluminium, cuivre, ...). Ces matériaux sont réalisés pour avoir la plus forte constante de perte diélectrique possible et ainsi transformer en chaleur le maximum de l'onde qui les traverse. L'impédance de ce type de matériau n'est pas forcément adaptée à l'impédance de l'espace libre et ainsi ils peuvent présenter une forte réflexion à leur interface. On peut trouver ces matériaux dans le commerce.

Les récentes recherches sur les absorbants diélectriques s'orientent plus sur les matériaux polymères conducteurs. Ces matériaux ont la particularité d'avoir une permittivité relative peu élevée et une tangente de perte diélectrique très forte. La fabrication de ce type de matériau est assez complexe. Plusieurs polymères conducteurs qui ont été étudiés sont prometteur notamment les PolyPyrroles (PPy) qui nécessite d'être polymérisé à la surface par des matériaux tel que du PVA ou du PVC⁷. Les PolyAnilines (PAni) sont mélangées à des thermoplastiques à l'aide de solvants pour pouvoir être utilisés. Ce type de matériaux est en général déposé sur du textile afin d'avoir une certaine solidité.

3. Absorbants structuraux, à adaptation d'impédance

On sait qu'une onde se réfléchit à l'interface d'un matériau proportionnellement à l'impédance de ce dernier. A partir de cette constatation, trois catégories d'absorbants (pyramidaux, chargés progressivement et à couches d'adaptation d'impédance) ont été développés pour améliorer la diffusion de l'onde dans une couche absorbante diélectrique. Pour une bonne atténuation sur une large bande, ce type de matériau nécessite des épaisseurs importantes avec un poids conséquent.

a. Absorbants pyramidaux

Les absorbants pyramidaux⁸ (pyramidal absorbers en anglais) sont typiquement des matériaux épais avec des structures régulièrement espacées de forme pyramidale ou conique disposées perpendiculairement à la surface de l'objet à cacher. Les absorbants pyramidaux ont été mis au point de telle sorte que l'interface présente une transition progressive de l'impédance de l'air à celle de l'absorbant. La hauteur et la périodicité des pyramides ont tendance à être de l'ordre d'une longueur d'onde. Pour des structures plus courtes, ou des longueurs d'onde plus grandes, les ondes rencontrent un changement plus brutal de l'impédance conduisant à de moins bonnes performances.

Les absorbants pyramidaux ont donc une fréquence de fonctionnement minimum à partir de laquelle ils peuvent fournir une atténuation élevée sur une large bande de fréquences et une grande gamme d'angles. Ces absorbants fournissent de très bonnes performances. L'inconvénient des absorbants pyramidaux est leur épaisseur et leur tendance à être fragile. Ils sont généralement utilisés pour des chambres anéchoïques (application CEM).

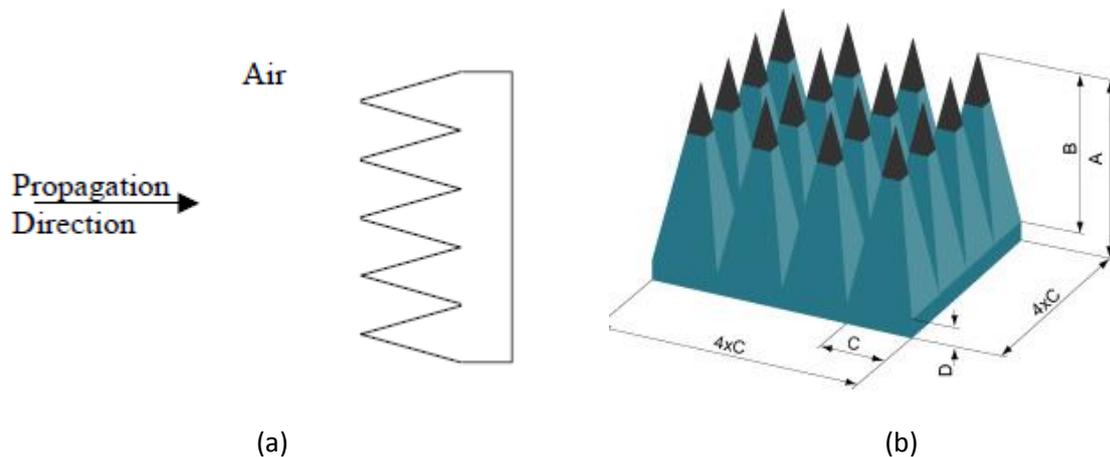


Figure 1.3 - (a) illustration de la disposition d'un absorbant pyramidal, et (b) exemple d'absorbant pyramidal

b. Absorbants chargés progressivement

Ce type de matériau (taped loading absorber en anglais) est généralement constitué d'une plaque d'un matériau à faibles pertes associée à une plaque d'un matériau à fortes pertes.

On peut définir deux types de structures distinctes. Pour le premier qui est idéal, le composant à perte est dispersé de façon homogène parallèlement à la surface de l'objet à protéger, avec un gradient perpendiculaire à la surface et progressif dans le matériau. Il est difficile et coûteux de fabriquer de manière reproductible un gradient de cette manière. Le second type de structure, plus courant, est constitué de couches homogènes dont le chargement augmente dans la direction de propagation (c'est à dire le gradient est créé comme une fonction en escalier). L'avantage de ces matériaux est qu'ils sont plus minces que les absorbeurs pyramidaux. L'inconvénient, c'est qu'ils sont moins performants.

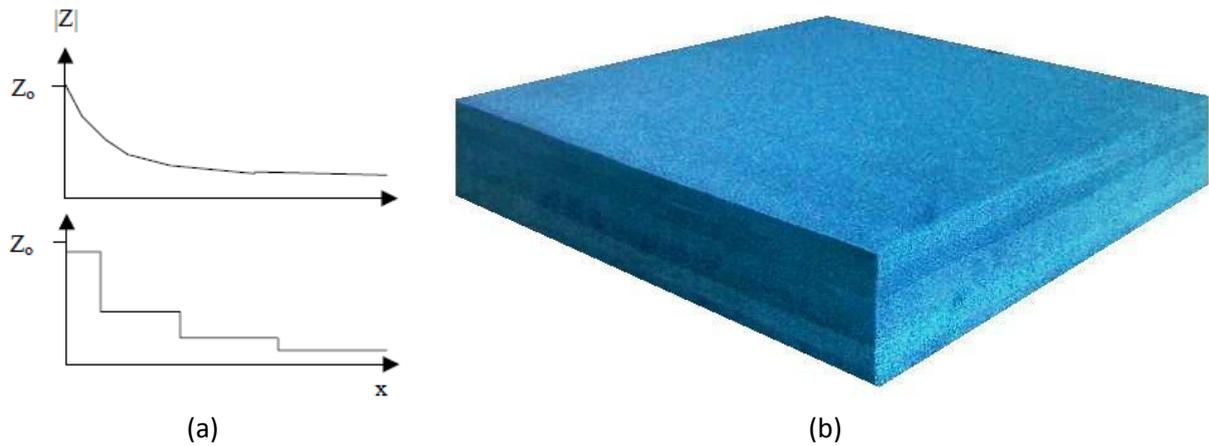


Figure 1.4 - (a) courbe d'impédance idéale et courbe d'impédance typique, et (b) exemple de matériau absorbant chargé progressivement

c. Absorbants à couches d'adaptation d'impédance

Les absorbants à couches d'adaptation d'impédance (matched layer absorber en anglais) tentent de réduire l'épaisseur nécessaire pour les matériaux chargés progressivement. Ce type d'absorbant met une couche de transition absorbante entre l'onde incidente et les matériaux absorbants. La couche de transition a une valeur d'impédance située entre les impédances des deux milieux. L'idée est d'avoir une transition d'impédance entre les différents milieux. Cette mise en correspondance se produit lorsque l'épaisseur de la couche d'adaptation est un quart de la longueur d'onde de l'onde incidente (voir figure 1.5) et avec :

$$Z_2 = \sqrt{Z_1 Z_3} \quad (24)$$

L'adaptation d'impédance se produit alors seulement à la fréquence voulue. Ce type d'absorbant est donc à bande étroite.

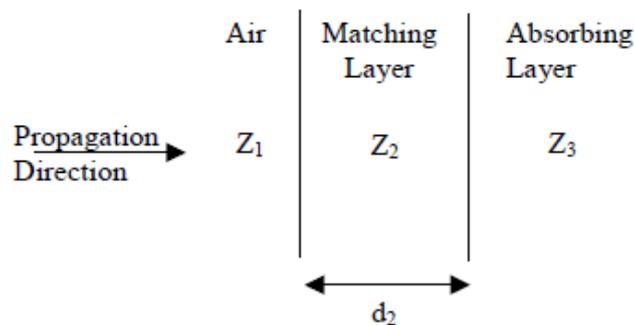


Figure 1.5 - Illustration de la disposition des couches constitutives de l'absorbant à couches d'adaptation d'impédance

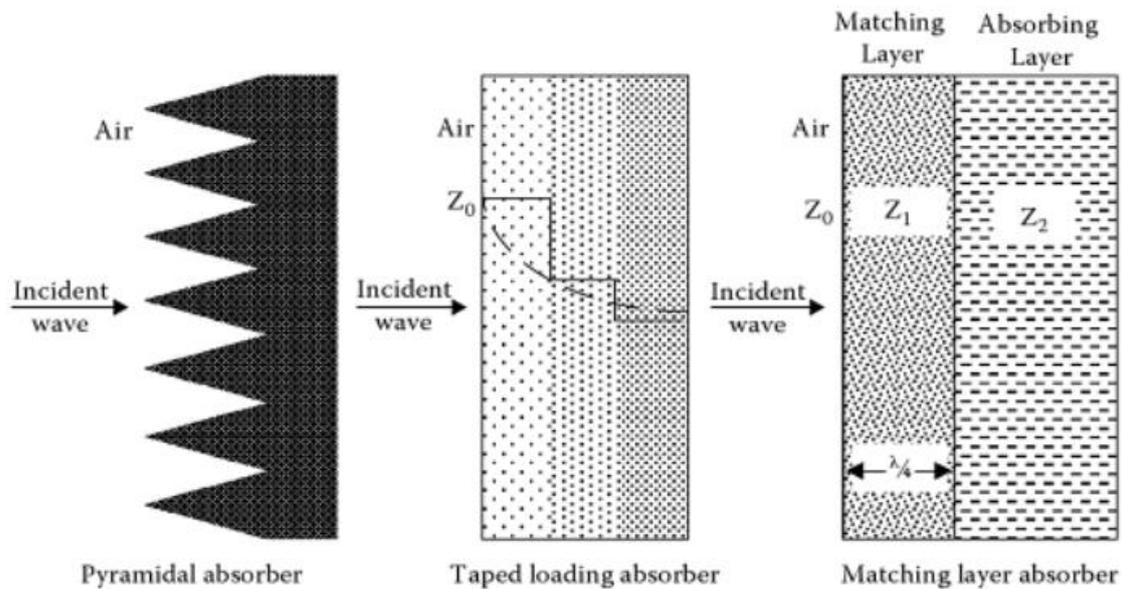


Figure 1.6 - Illustration des différents types de matériaux structuraux

4. Absorbants résonants

Les matériaux absorbants résonants sont aussi appelés absorbants accordés (tuned en anglais) ou quart d'onde. Ils comprennent notamment les couches de Dällenbach, les écrans de Salisbury et les couches de Jaumann. Dans cette classe de matériaux, l'impédance n'est pas forcément adaptée entre le milieu de l'onde incidente et le milieu absorbant. Ces matériaux sont minces et n'absorbent pas l'intégralité de l'énergie à laquelle ils sont soumis. Le mécanisme employé utilise la réflexion et la transmission à la première interface. L'onde réfléchie subit une inversion de phase de l'ordre de π . L'onde transmise se déplace à travers le milieu absorbant et est réfléchie sur un plan métallique. Cette seconde réflexion subit également une inversion de phase de π avant que l'onde se propage vers le milieu de l'onde incidente. Si la distance optique parcourue par l'onde émise est un multiple de la moitié de longueurs d'onde alors les deux ondes réfléchies seront en opposition de phase, ce qui provoquera une interférence destructive. Si l'amplitude de deux ondes réfléchies est égale alors l'intensité totale réfléchie est nulle.

a. Couche Dällenbach

Une couche Dällenbach⁹, est une couche d'absorption homogène placée sur un plan conducteur. L'épaisseur de la couche, la permittivité et la perméabilité sont ajustées de telle sorte que la réflectivité soit minimisée pour une longueur d'onde souhaitée. La couche Dällenbach repose sur un mécanisme d'interférence destructive des ondes réfléchies à partir des première et seconde interfaces. Pour une réflectivité minimum, l'impédance effective de la couche, Z_L , doit être égale à l'impédance Z_0 du milieu incident. Dans la conception d'une couche, il y a cinq propriétés sur lesquels il est possible de jouer : ε' , ε'' , μ' , μ'' et l'épaisseur de la couche (le plus souvent fixé à $\lambda/4$).

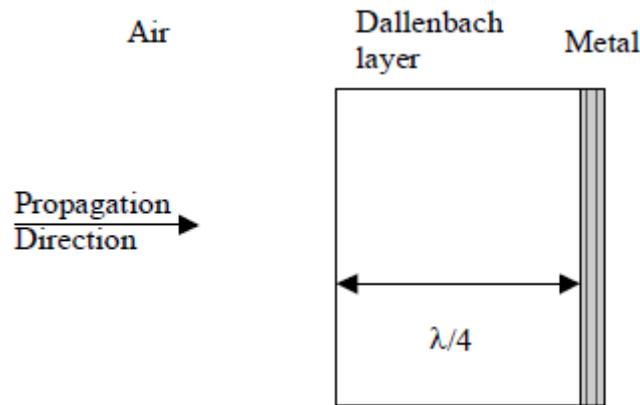


Figure 1.7 - Illustration de la disposition d'une couche Dällenbach

L'utilisation de deux ou plusieurs couches avec des bandes d'absorption différentes augmente la largeur de bande d'absorption.

b. Ecran de Salisbury

L'écran de Salisbury¹⁰ est également un absorbant résonant, qui, à la différence des absorbants adaptés, ne repose pas sur la permittivité et la perméabilité de sa couche principale. L'écran de Salisbury est constitué d'une feuille résistive placée à un multiple impair du quart de la longueur d'onde du plan de masse (métallique) séparées par un intervalle d'air. Un matériau à permittivité élevée peut remplacer la lame d'air, cela permet de diminuer l'épaisseur nécessaire au détriment de la bande passante. En termes de lignes de transmission, théoriquement, la ligne de transmission quart d'onde transforme le court-circuit au niveau du métal en un circuit ouvert au niveau de la feuille résistive. Si la résistance de l'écran est proche de l'impédance de l'air ($Z_0 = 377 \Omega$), une bonne adaptation d'impédance se produit.

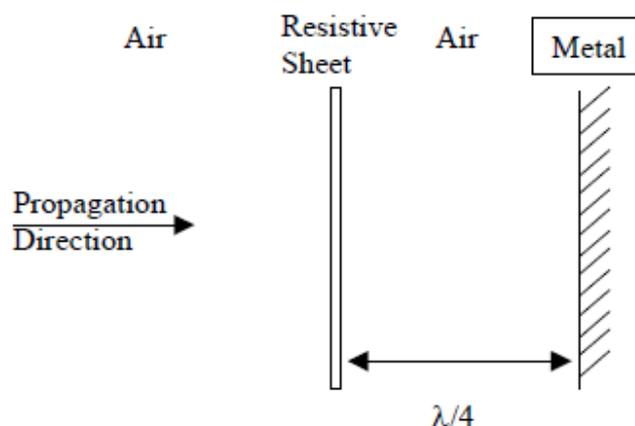


Figure 1.8 - Illustration de la disposition d'un écran de Salisbury

Les structures initiales étaient faites de toile disposées sur un châssis en contre-plaqué avec un revêtement de graphite colloïdal sur la toile¹¹. Puis ce sont les polymères conducteurs qui ont été utilisés dans la conception d'écrans de Salisbury¹². L'épaisseur de l'écran de Salisbury optimal peut

être calculée lorsque la résistance de l'écran est égale à l'impédance de l'espace libre (Z_0). L'épaisseur de l'absorbant est donnée par :

$$d = \frac{1}{Z_0 \sigma} \quad (25)$$

Où d épaisseur de la couche résistive et σ conductivité de la feuille. Deux approximations sont faites concernant la couche résistive:

- la couche est mince électriquement ($k_0 d \sqrt{|\epsilon''|} \ll 1$ où k_0 est $2\pi/\lambda_0$) ;
- les pertes de la couche proviennent de la conductivité σ et $\epsilon'' \gg \epsilon'$.

Ces approximations donnent des valeurs approchées de ce que l'on peut obtenir en mesure. On observe dans la plupart des cas un décalage vers les basses fréquences avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche résistive ou de ϵ' .

Afin de limiter les réflexions à l'entrée du matériau, la résistance de la couche résistive doit être proche de l'impédance de l'air, soit $Z_0 = 377 \Omega$. Il est possible d'obtenir la résistance optimale, R_{sopt} , pour une réflectivité donnée grâce à :

$$R_{sopt} = Z_0 \frac{1 - \Gamma_{cutoff}}{1 + \Gamma_{cutoff}} \quad (26)$$

Où Γ_{cutoff} est la réflectivité maximale acceptable.

Il a été également montré que la bande passante diminue avec l'augmentation de la permittivité de la couche d'espacement.

La largeur de bande de l'écran de Salisbury peut être améliorée en construisant un absorbant multi-écrans, on appelle alors ces écrans des couches de Jaumann.

c. Couches de Jaumann

Développés en Allemagne durant la seconde guerre mondiale, les absorbants de type Jaumann reprennent l'idée des écrans de Salisbury mais en employant plusieurs écrans résistifs afin de couvrir plusieurs fréquences et réaliser des bandes d'absorption. La résistivité des écrans augmente selon la direction du plan de masse et sont séparées par des couches à faibles pertes diélectriques. Le premier dispositif était équipé de deux couches résistives séparées par de l'air qui produisait deux minima proches en fréquence afin d'augmenter la largeur de bande. Les couches résistives sont généralement réalisées à partir de poudre de carbone incorporée dans un élastomère.

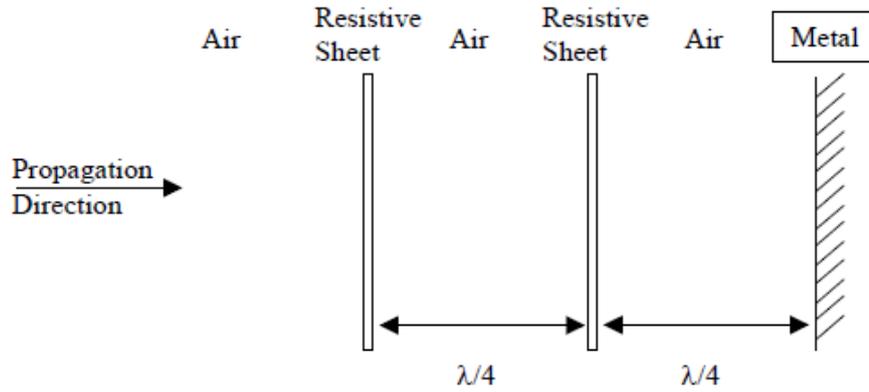


Figure 1.9 - Illustration de la disposition de couches de Jaumann

C'est à partir de 1991 que les premiers calculs démontrant la possibilité d'utiliser des polymères conducteurs comme couches de Jaumann furent réalisés¹³. Les premières mesures suivirent en 1992 notamment avec des films de PolyPyrrole¹⁴.

Des modèles électriques *RC* ont été utilisés afin d'optimiser ce type d'absorbant¹⁵ mais l'optimisation est complexe car un grand nombre de paramètres entre en compte lors de la conception. En général, la construction de couches de Jaumann se fait de façon empirique.

Deux techniques principales sont utilisées pour optimiser les couches de Jaumann, à savoir, la technique du Maximally Flat¹⁶ et la méthode d'approximation de Tchebychev appliquée pour obtenir une réflexion nulle¹⁷.

Les couches de Jaumann peuvent compter jusqu'à six écrans ; malheureusement, l'épaisseur totale du matériau augmente fortement, pouvant atteindre $1,5 \lambda$, ce qui est impensable pour certaines applications.

5. Absorbants comportant des circuits analogiques

Il est possible d'améliorer la bande passante des absorbants résonants en utilisant des matériaux tirant partie d'autres mécanismes de dispersion. Les écrans de Salisbury et les couches de Jaumann utilisent des couches purement résistives dans leur fonctionnement. Hors, il est également possible d'employer des couches comportant des éléments capacitifs et/ou inductifs afin d'augmenter les possibilités d'optimisations.

Les matériaux résistifs/capacitifs se présentent sous la forme de polymère conducteur entourés de fibres¹⁸ et les matériaux résistifs/inductifs sont généralement des bobines métalliques hélicoïdales noyées dans une couche diélectrique¹⁹. Le domaine des absorbants comportant des circuits analogiques se réfère le plus souvent à des matériaux où la feuille résistive des écrans de Salisbury et des couches de Jaumann a été remplacée par une couche mince sans pertes sur laquelle des motifs géométriques en matériaux à perte ont été déposés. L'épaisseur du matériau à perte détermine la résistance effective de l'ensemble de la couche. La géométrie et la périodicité du circuit

créé déterminent l'inductance et la capacité effective. Ce type de matériau est généralement mince avec de bonnes performances d'absorption sur une bande passante assez large.

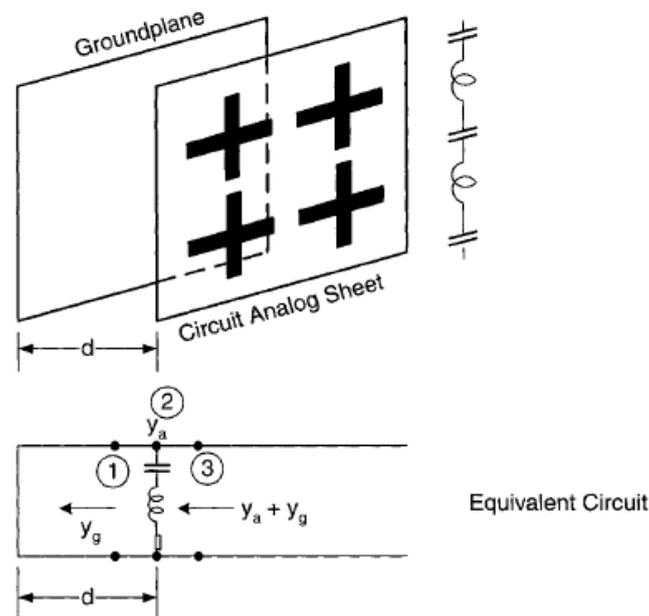


Figure 1.10- Illustration de la disposition d'un absorbant comportant des circuits analogiques comparé à son circuit équivalent

Assez simplement, les absorbants comportant des circuits analogiques sont illustrés dans la figure 1.10. La résistivité provient du matériau employé pour réaliser les motifs, l'espacement entre les différents éléments crée une capacité et la longueur des pistes crée une inductance²⁰.

La partie circuit analogique est équivalente à un écran de Salisbury, à la différence qu'il est possible de modifier simplement par la géométrie les propriétés de l'écran. Ce qui ouvre la voie à plus de flexibilité dans la conception d'absorbants. Ainsi il est possible de définir les propriétés de cet écran par la méthode des lignes de transmissions. Le circuit analogique est modélisé comme un circuit avec une résistance R_s , une capacité C_s et une inductance en série L_s . L'impédance d'entrée Z_s de l'ensemble de l'absorbant peut alors être optimisée afin de se rapprocher de l'impédance de l'air pour limiter au maximum la réflexion à la surface du dispositif.

$$Z_s = R_s + j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} \quad (27)$$

La bande passante d'un simple écran réalisé avec ce type de matériau s'élève à près de 44 % à -10 dB en réflexion²¹. L'ajout d'un diélectrique dans la cavité entre le plan de masse et l'écran permet d'améliorer les performances de ce type de matériau.

Les premiers matériaux absorbants comportant des circuits analogiques historiques sont constitués de bobines disposées sur un absorbant magnétique, qui est plus fins comparativement qu'un absorbant diélectrique. La disposition des bobines couplée à l'absorption permet d'obtenir après optimisation une impédance proche de celle de l'air à la fréquence de fonctionnement des antennes²². Le problème de ces premiers matériaux est une forte dépendance à la polarisation du champ magnétique en fonction du positionnement des bobines et donc un fonctionnement trop restreint pour certaines applications. Les matériaux développés par la suite se présentent sous la

forme d'absorbants pyramidaux comportant des circuits analogiques perpendiculairement au plan de masse. Les récentes recherches s'orientent plus autour des surfaces sélectives en fréquence.

Les surfaces sélectives en fréquences (FSS) sont un type de circuits analogiques et peuvent permettre de réaliser des absorbants²³²⁴²⁵²⁶. Les FSS sont typiquement utilisées comme filtres passe-bande pour les radômes. Les FSS sont purement métalliques à la différence des circuits analogiques précédents. Les FSS permettent ainsi de régler les deux composantes inductives et capacitatives et sont disposés sur un diélectrique fortement absorbant qui permet d'ajuster la composante résistive. Le circuit purement LC réalisé par les FSS détermine la fréquence de fonctionnement du dispositif. Le niveau d'absorption du diélectrique est intrinsèquement lié au niveau d'absorption de l'ensemble de la structure. Selon le type de FSS choisie pour réaliser un absorbant comportant un circuit analogique, différents paramètres interviendront.

Comme pour les couches de Jaumann, il est tout à fait possible d'empiler les structures à base de FSS afin d'obtenir de plus larges bandes de fonctionnement. Il est commun de voir des empilements de deux ou trois épaisseurs de FSS et de diélectrique. Afin de faciliter l'accord de l'impédance de l'empilement et de l'impédance de l'air, il est également possible d'ajouter une couche de diélectrique au dessus de l'empilement. Dans ce cas, on se rapproche des absorbants comportant des circuits analogiques classiques.

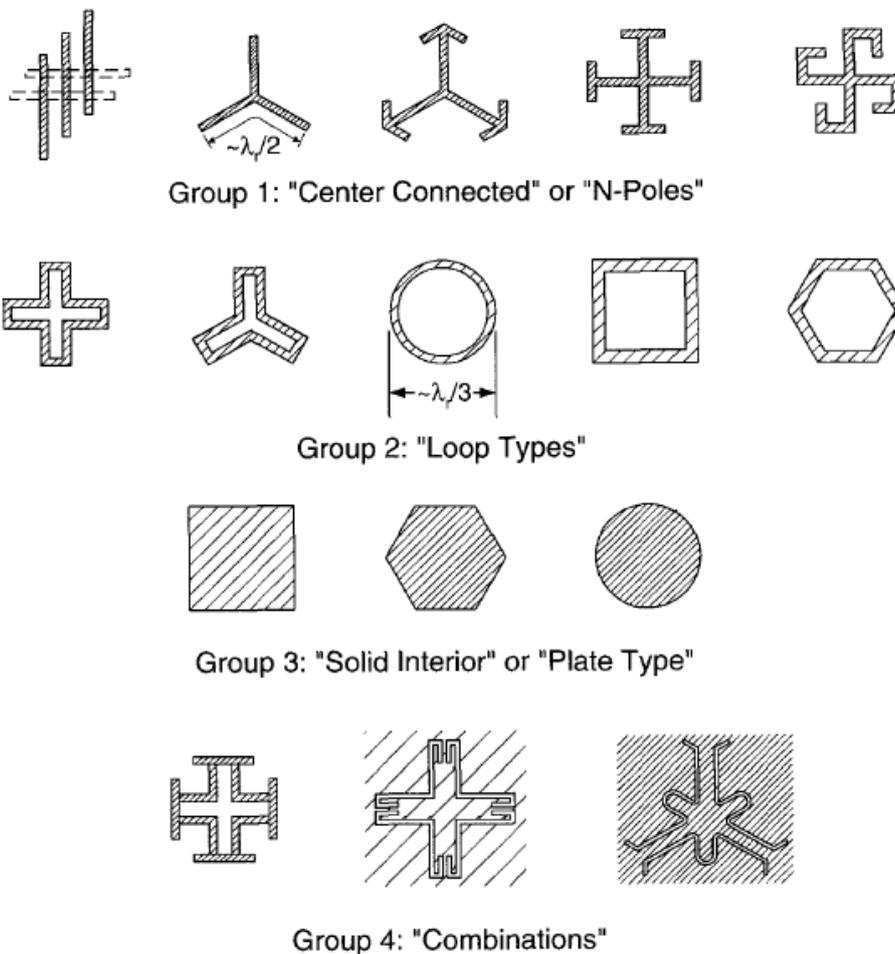


Figure 1.11 - Liste non exhaustive de formes de FSS

Il est assez complexe d'optimiser les absorbants comportant des circuits analogiques car les modèles développés sont fait pour des structures très simples. Ce qui est le plus souvent utilisé est le modèle de lignes de transmission²⁷. L'un des premiers brevets sur les absorbant utilisant des FSS en micro-ondes décrit un empilement de grilles résistives²⁸. Un autre brevet des débuts de l'utilisation de FSS exploite un multicouche de patchs carrés et circulaires²⁹. La diversité de formes employées pour réaliser les FSS montre bien la difficulté que l'on peut avoir à prédire exactement leur fonctionnement. Il n'en reste pas moins que ce type d'absorbant est très intéressant de part ses nombreuses possibilités, les bandes de fréquences importantes qui peuvent être couvertes (jusqu'à 60 %) et la finesse qu'il est possible d'obtenir, égale à $\lambda/(4.n)$ de la plus basse des fréquences de la bande désirée³⁰ (avec n indice de réfraction du substrat).

Parmi les recherches réalisées sur l'optimisation de ce type de structure, les recherches autour de l'optimisation par algorithmes génétiques³¹ sont très intéressantes.

6. Absorbants adaptatifs

Dérivés de l'idée de l'utilisation d'absorbants résonants et d'absorbants comportant des circuits analogiques, les absorbants adaptatifs exploitent des Surfaces Electromagnétiques Reconfigurables (RES).

Différentes recherches ont été réalisées sur ce type d'absorbant sans pour autant aboutir à une exploitation commerciale. Un exemple bien connu est l'utilisation de liquide à haute permittivité dans une couche constituée d'une matrice poreuse à permittivité faible, ainsi en contrôlant le niveau de liquide, il est possible d'ajuster les paramètres de l'absorbant³². Le temps de réponse d'un tel absorbant est malheureusement très long. Il est également possible de modifier la permittivité dans des couches de Dällenbach en appliquant un champ magnétique contrôlable³³, cette technique est assez difficile à appliquer sur de grandes surfaces. D'autres articles décrivent l'utilisation d'effets photo-diélectrique avec de l'AgCl³⁴, du silicium^{35 36}, ainsi qu'à l'aide de semi-conducteurs n-i-p-i³⁷. L'intégration de dispositifs actifs a également été étudiée notamment les diodes Varicap³⁸.

7. Absorbants magnétiques

Les absorbants magnétiques sont basés sur l'utilisation de particules de fer ou de ferrite dans un diélectrique de type polymère, mousse ou structure en nid d'abeille. L'homogénéité de la répartition des particules dans l'absorbant est un facteur à prendre en compte lors de la conception de ce type de matériau. D'autres types de particules peuvent être utilisés mais sont moins courants. Malgré le poids induit par les particules qui composent l'absorbant magnétique, l'avantage principal de ce type d'absorbant est leur faible épaisseur, pouvant atteindre un centième de la longueur d'onde à leur première résonance.

Ces matériaux fonctionnent dans une large bande de fréquence allant des MHz aux GHz. La fréquence de fonctionnement dépend exclusivement de la taille des particules qui les constituent.

Les propriétés des particules de fer et de ferrite ont été mesurées et calculées^{39 40}. Les matériaux précédents présentaient une perméabilité proche de celle de l'espace libre ($\mu_r = 1 + j0$). Pour ce type de matériau, c'est ce paramètre que l'on va changer afin d'obtenir plus de libertés pour la conception d'absorbant. Si l'on considère l'expression de l'impédance caractéristique Z_c et de l'indice de réfraction n d'un matériau, la perméabilité relative μ_r est aussi importante que la permittivité relative ϵ_r dans la conception d'un absorbant :

$$Z = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} Z_0 \quad (28)$$

$$n = \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \quad (29)$$

Les matériaux magnétiques naturels purs (avec $\epsilon_r = 1 + j0$) n'existent pas. Par conséquent les matériaux employés pour réaliser des absorbants magnétiques ont également une composante diélectrique à prendre en compte. Les recherches réalisées permettent d'obtenir un large panel de possibilités quant à la perméabilité et la permittivité. Il est ainsi possible d'utiliser le fait que la perméabilité est importante à basse fréquence puis diminue rapidement avec l'augmentation de la fréquence et que la perméabilité a un fonctionnement linéaire légèrement décroissant en fréquence afin de réaliser des absorbants à large bande ou qui couvrent uniquement certaines gammes.

Des couches de Dällenbach ont été brevetées à base de matériaux magnétiques comportant du ferrite⁴¹. Ce procédé permet en empilant deux couches ou plus d'augmenter la bande d'absorption.

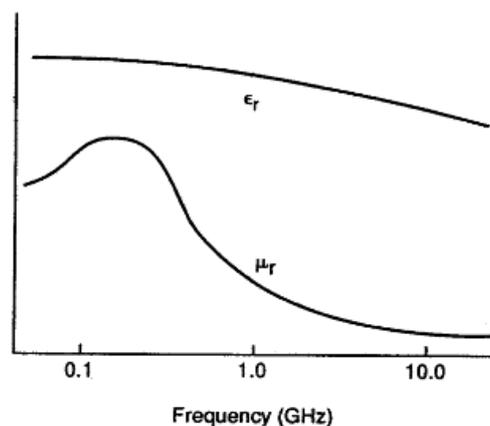


Figure 1.12 - Illustration de courbes typiques de progression de la permittivité et de la perméabilité d'un matériau magnétique en fréquence

8. Absorbants à métamatériaux

a. Métamatériaux

La recherche autour des métamatériaux est très active aujourd'hui car ce sont des matériaux qui présentent des propriétés électromagnétiques que l'on ne retrouve pas dans les matériaux naturels. Ils procurent beaucoup d'espoirs pour le développement de nouvelles technologies. Ce sont

des matériaux composites artificiels qui ouvrent la voie à de nouveaux développements que ce soit en optique, en térahertz ou en micro-onde.

Les métamatériaux sont en général des structures périodiques constituées de matériaux diélectriques et métalliques, qui, d'un point de vue électromagnétique se comportent comme un matériau parfaitement homogène. La constitution du métamatériau permet de créer un matériau avec la permittivité et/ou la perméabilité que l'on souhaite.

Les métamatériaux étant constitués de diélectriques et de métaux, ils présentent des pertes dissipatives et radiatives. Les pertes dans les métamatériaux sont un frein pour les applications en télécoms. Beaucoup de recherches ont été réalisées pour définir des protocoles afin de supprimer les pertes dans les métamatériaux, notamment en optique. Dans notre cas, les pertes ne sont pas un handicap, bien au contraire.

b. Intérêt

Les recherches sur les absorbants à métamatériaux sont assez récentes et se rapprochent de ce qui se fait avec des matériaux absorbants comportant des circuits analogique, notamment les FSS. L'amélioration apportée par ce type de matériaux par rapport aux absorbants comportant des circuits analogiques réside dans la diminution de l'épaisseur de la structure, à savoir passer sous la barre du quart de la longueur d'onde de la plus basse des longueurs d'onde de la bande désirée.

Les absorbants magnétiques montrent également une épaisseur réduite mais leur inconvénient majeur est leur masse, car il s'agit de matériaux fortement chargés en particules de fer ou de ferrite. Les métamatériaux absorbants sont réalisés sur des substrats diélectriques standards de faible masse.

Ainsi, les métamatériaux absorbants cumulent plusieurs avantages : une faible épaisseur ainsi qu'une masse réduite. Si l'on ajoute qu'ils peuvent être réalisés sur des matériaux standards de l'industrie des circuits imprimés pour les bandes de fréquences en micro-ondes, ce type d'absorbant peut permettre de répondre à des exigences de réalisation qu'il n'était pas possible de satisfaire jusqu'à maintenant.

c. Premières recherches

Les recherches sur les métamatériaux se sont longtemps orientées sur la suppression des pertes comme dit précédemment. Les recherches pour réaliser des absorbants à base de métamatériaux ont débuté après beaucoup d'autres applications des métamatériaux.

Ce nouveaux type d'absorbant a été étudié à partir de 2002, avec une publication de N. Engheta¹ puis plus intensément à partir de 2008 sur de nombreuses plages de fréquences comme en térahertz^{42 43 44 45}, en infrarouge proche^{46 47 48 49}, en infrarouge moyen^{50 51 52 53} et dans le domaine du visible^{54 55 56 57}.

Pour les micro-ondes, c'est un article de N. I. Landy⁵⁸ de 2008 qui sera le point de départ de nombreux développements sur ce nouveau type d'absorbant. Dans cet article, est décrit un matériau absorbant traversant optimisé pour avoir une impédance proche de l'impédance caractéristique du vide à une certaine fréquence. N. I. Landy y décrit également une étude sur la localisation des pertes avec une concentration de l'énergie entre les parties métalliques du métamatériau. Le diélectrique employé étant peu absorbant (époxy FR4), l'onde est comme piégée à l'intérieur du métamatériau. Ce matériau est d'épaisseur de l'ordre de $\lambda/35$. Pour rappel, l'épaisseur des matériaux comportant des circuits analogiques est de l'ordre de $\lambda/(4.n)$. Les matériaux absorbants magnétiques peuvent atteindre cette faible épaisseur mais ont une masse supérieure et leur conception est plus complexe.

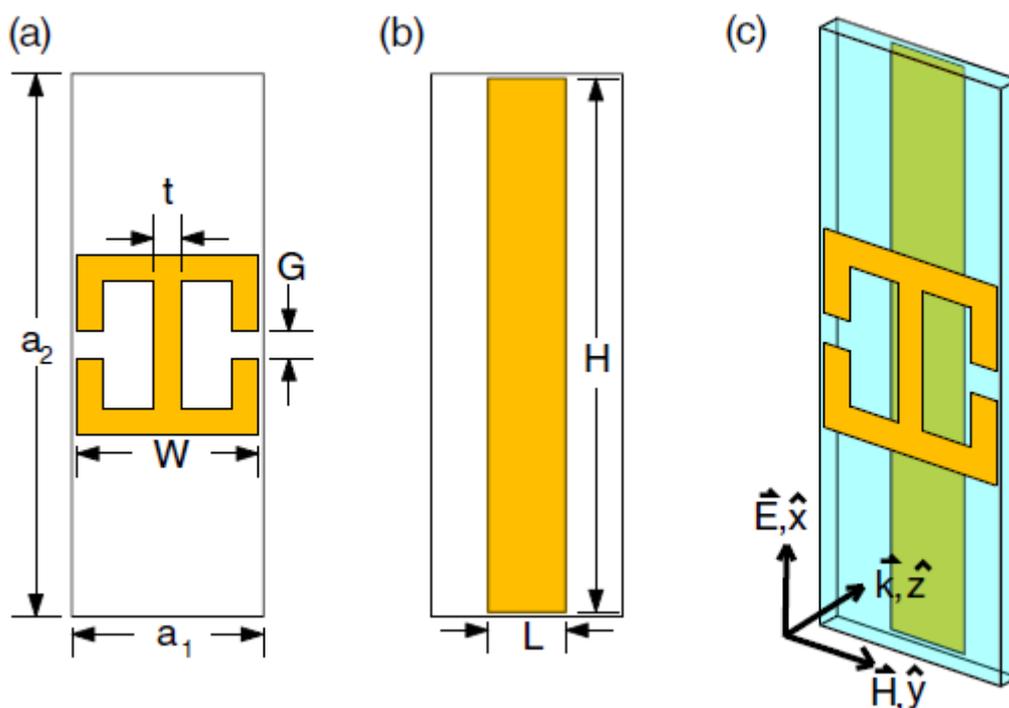


Figure 1.13 - Illustration des travaux de N. I. Landy avec en (a) face avant, en (b) face arrière, et en (c) perspective

Suite à cette publication de nombreux motifs d'absorbants à métamatériaux, inspirés des FSS^{59 6061}, ont été conçus et font l'objet de publications. Ces publications montrent en général un exemple de design qui fonctionne, et présente la courbe d'absorption de ce design, sans pour autant donner plus d'indication que N. I. Landy sur la nature des pertes ou la fréquence de fonctionnement de ce type d'absorbant.

Des publications traitant d'optimisations comme l'élargissement de la bande couverte par l'absorbant^{62 63} et traitant de la nature des pertes⁶⁴ ont été diffusées après le début de ma thèse. L'intérêt pour les absorbants à métamatériaux est grandissant, les avancées sont régulières et dans la littérature ce type d'absorbant peut atteindre une finesse proche de 1/90ème de la longueur d'onde⁵⁷ à la fréquence de fonctionnement.

IV. Conclusion

Ce chapitre traite de façon exhaustive des différents types d'absorbants électromagnétiques qui existent. Les absorbants de type diélectriques, structuraux et magnétiques sont courants dans le commerce et sont accessibles au grand public. A l'inverse, les absorbants comportant des circuits analogiques et les absorbants adaptatifs sont réalisés pour des applications très précises car leur réalisation est complexe et leur coût de fabrication est important. Ces différents types de matériaux font encore l'objet d'études.

Le domaine des absorbants à métamatériaux est assez récent notamment pour ce qui est des micro-ondes (2008). Les études sont nombreuses mais ne donnent pas beaucoup de réponses vis-à-vis de l'ingénierie de conception de tels matériaux. Néanmoins, on peut facilement mettre en avant les avantages de solutions à base d'absorbants à métamatériaux ; à savoir qu'ils sont fins (bien en dessous de $\lambda/4$), légers (car non chargés en particules métalliques) et utilisent des matériaux standards pour leur réalisation (souvent en époxy avec métallisation en cuivre).

Dans le chapitre qui suit, nous présentons les principes et les modèles qui permettent de donner des orientations à la conception d'absorbants à métamatériaux innovants.

CHAPITRE II : SIMULATIONS ET MODELES THEORIQUES

Dans ce chapitre, nous exposons le principe de fonctionnement des absorbants à métamatériaux, puis nous expliquons les modèles utilisés pour définir le fonctionnement de différentes structures simples. Nous donnons les résultats de simulations correspondants aux prototypes que nous avons réalisés. Enfin, nous étudions des cas particulièrement intéressants.

I. Principes

1. Principe de fonctionnement des métamatériaux absorbants

Le principe de fonctionnement de base de ce type de matériaux est de réussir à piéger l'onde incidente dans le métamatériau. Pour cela, il faut réaliser une adaptation de l'impédance du métamatériau avec l'impédance caractéristique du vide afin de limiter la réflexion à l'interface air/métamatériaux. L'onde incidente une fois entrée dans la structure du métamatériau est atténuée pour ne pas en ressortir.

Pour réaliser l'adaptation d'impédance, il faut modifier la permittivité et/ou la perméabilité de l'absorbant à métamatériaux afin de réaliser une fonction donnant $\sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} = 1$, sachant que l'impédance caractéristique d'un matériau est tel que :

$$Z_c = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} Z_0 \quad (30)$$

Les coefficients de transmission et de réflexion étant reliés à l'impédance par la relation :

$$T = \frac{2\sqrt{Z_1 Z_2}}{Z_1 + Z_2} \quad (31)$$

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (32)$$

Où T coefficient de transmission, R coefficient de réflexion, Z_1 impédance du milieu de provenance de l'onde incidente et Z_2 impédance du milieu où l'onde se propage (voir figure 2.1).

Une fois transmise à l'intérieur de la structure de l'absorbant à métamatériaux, l'énergie de l'onde incidente est retenue par un effet de cavité, formée par l'espace entre le motif et le plan de masse. Les réflexions à l'intérieur de la cavité et les pertes du diélectrique, même si elles sont peu élevées, amortissent fortement l'énergie.

Comme tous les métamatériaux, les absorbants à métamatériaux sont de type résonant, c'est à dire qu'ils ne fonctionnent qu'à certaines fréquences correspondant à leurs modes électromagnétiques.

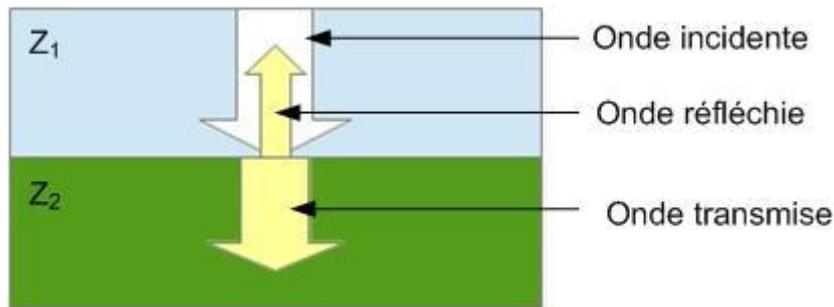


Figure 2.1 - Représentation de la réflexion et la transmission d'une onde à l'interface de deux milieux

2. Principe de l'étude

Dans cette étude, nous allons nous intéresser aux absorbants à métamatériaux posés sur un plan métallique ou plan de masse. Il ne s'agit pas de matériaux traversant. Nous nous concentrons donc sur la réponse en réflexion de ces matériaux.

Ainsi, nous débutons par l'étude de la simulation de métamatériaux absorbants au design simple, un patch carré, en définissant des modèles prédictifs pour leur réalisation. Puis nous présentons les différentes possibilités pour l'optimisation de ces nouveaux matériaux. Tout d'abord, nous montrons les différentes optimisations géométriques pour des structures simples puis pour des structures plus complexes.

Les différentes simulations ont été réalisées à l'aide des logiciels commerciaux Ansys HFSS⁶⁵ et CST Microwave Studio⁶⁶ avec son Transient solver, avec lesquels je suis le plus à l'aise. Certaines simulations ont pu être vérifiées à l'aide de CST Microstripes⁶⁷ et COMSOL Multiphysics⁶⁸.

Ansys HFSS et COMSOL Multiphysics sont des logiciels de simulation numérique basés sur la méthode des éléments finis (FEM). CST Microwave Studio avec le Transient solver utilise une méthode de résolution appelée Finite Integration Technique (FIT) qui consiste une résolution de type différences finies dans le domaine temporel (FDTD) simplifiée. CST Microstripes utilise une résolution par matrice de lignes de transmission (TLM).

II. Modèles

1. Modèles de l'absorbant à métamatériaux de type patchs carrés

A travers les travaux réalisés durant ma thèse, l'absorbant à métamatériaux comportant des patchs carrés a été la première étape qui a permis de comprendre les mécanismes de fonctionnement de ce nouveau type d'absorbant.

a. Simulations

La figure 2.2 présente la structure unité d'un absorbant à métamatériaux comportant des patches carrés. Cette structure unité est dupliquée à l'infini de façon miroir par les conditions limites selon x et y . L'ajout d'autres cellules unités est illustré sur la figure 2.3. La vue en coupe d'une cellule unité est représentée avec la figure 2.4.

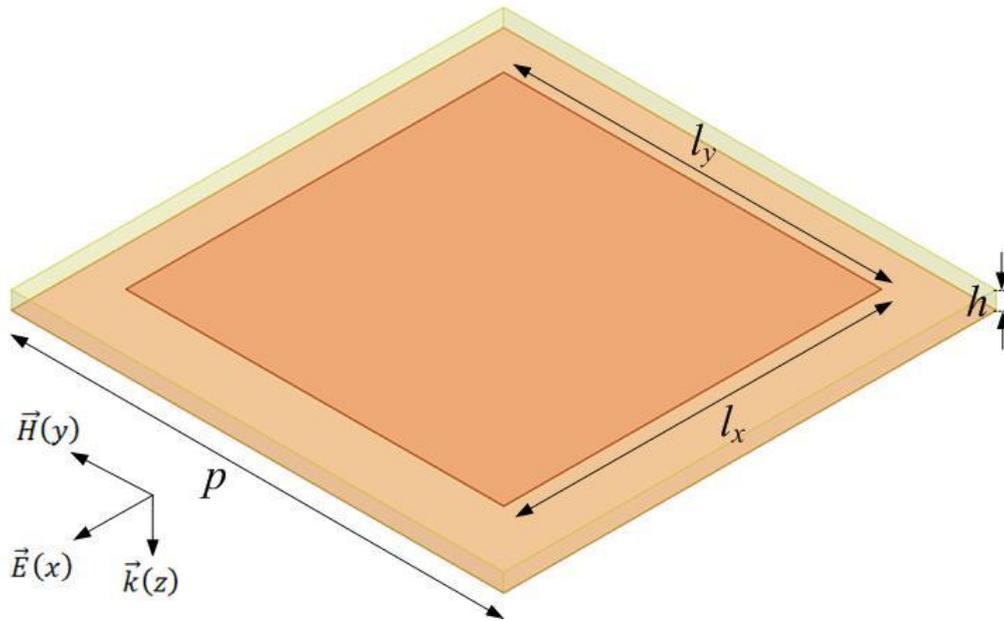


Figure 2.2 - Modélisation 3D d'une cellule unité d'un absorbant à métamatériaux de type patches carrés

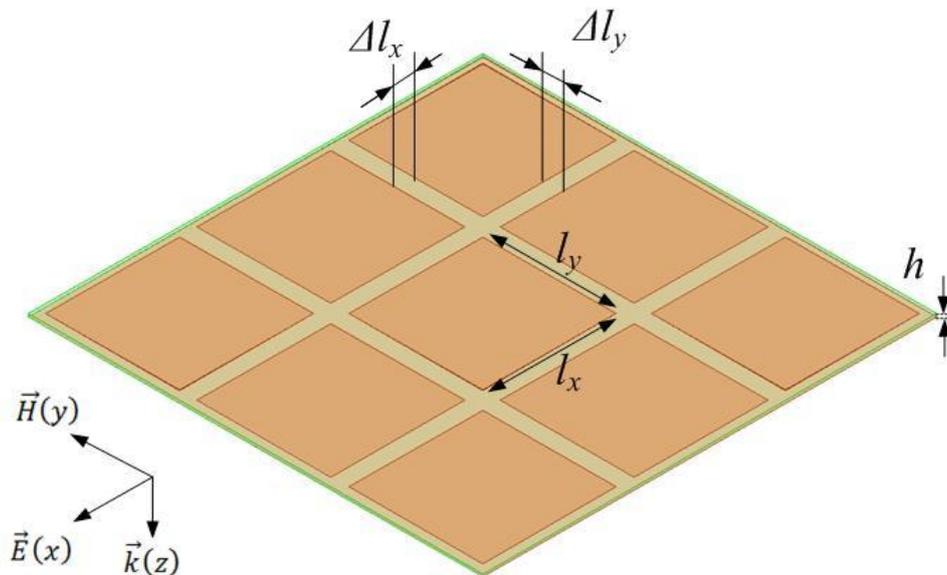


Figure 2.3 - Modélisation 3D de plusieurs cellules unités d'un absorbant à métamatériaux de type patches carrés

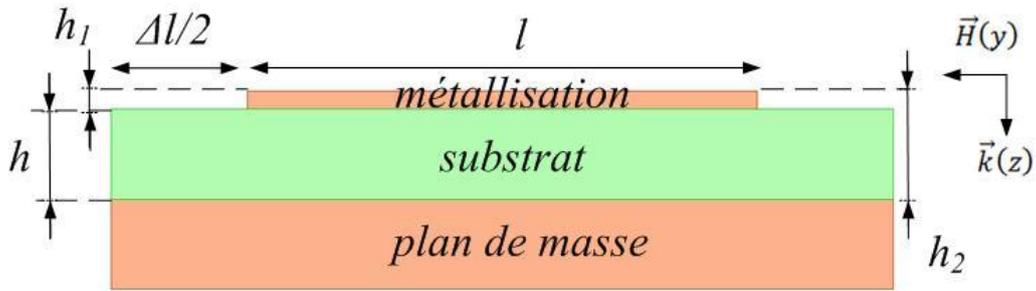


Figure 2.4 - Vue en coupe d'une cellule unité d'un absorbant à métamatériaux de type patches carrés

Ainsi, on prend les valeurs suivantes pour les différentes dimensions de notre cellule unité :

h_1	17 μm
h	0,3 mm
l (patch carré, $l_x=l_y$)	15,2 mm
Δl	2 mm
p	17,5 mm

Le substrat employé est de l'époxy FR4 ($\epsilon_r = 4,4 + i0,088$ et $\mu_r = 1$, valeurs Ansys HFSS) qui est un matériau courant pour la réalisation de circuits imprimés. La métallisation en cuivre fait 17 μm d'épaisseur qui est également une valeur courante (peut varier selon le fabricant de circuit entre 17 et 18 μm). Le plan de masse est aussi en cuivre et son épaisseur n'a pas d'importance. Ce modèle d'absorbant à métamatériaux a été développé expressément pour donner un bon exemple de ce qu'il est possible de réaliser avec des matériaux courants à faible coût.

Ainsi, si le vecteur k de l'onde incidente est selon z et que nous envoyons cette onde à l'aide d'un seul port sur la structure, nous ne pouvons collecter que le paramètre S_{11} relatif à ce système car le plan de masse fait que l'absorbant à métamatériaux n'est pas traversant. Ainsi, il est possible d'obtenir l'absorption du matériau posé sur le plan de masse par la relation (avec $S_{21} = 0$) :

$$Abs. = 1 - |S_{11}|^2 \quad (33)$$

En simulant avec Ansys HFSS et CST Microwave Studio (CST MWS), nous obtenons les courbes d'absorption de la figure 2.5. On observe deux pics d'absorption, un autour de 4,54 GHz et un autour de 13,65 GHz. A la première résonance, l'absorbant à métamatériaux a une absorption de 98 % pour une épaisseur d'approximativement $\lambda/200$. Le second pic a une absorption de 78,8 % pour une épaisseur de $\lambda/70$.

Pour chaque pic d'absorption, le comportement de notre structure est différent. Nous avons ainsi tracé les champs sur un plan situé au centre du substrat, présentés en figure 2.6. On peut observer sur ces cartes de champs, la formation de plusieurs modes électromagnétiques. Pour chaque mode, il y a une concentration de l'énergie dans le substrat sous le patch. La structure se comporte comme une cavité, formée entre le patch et le plan de masse.

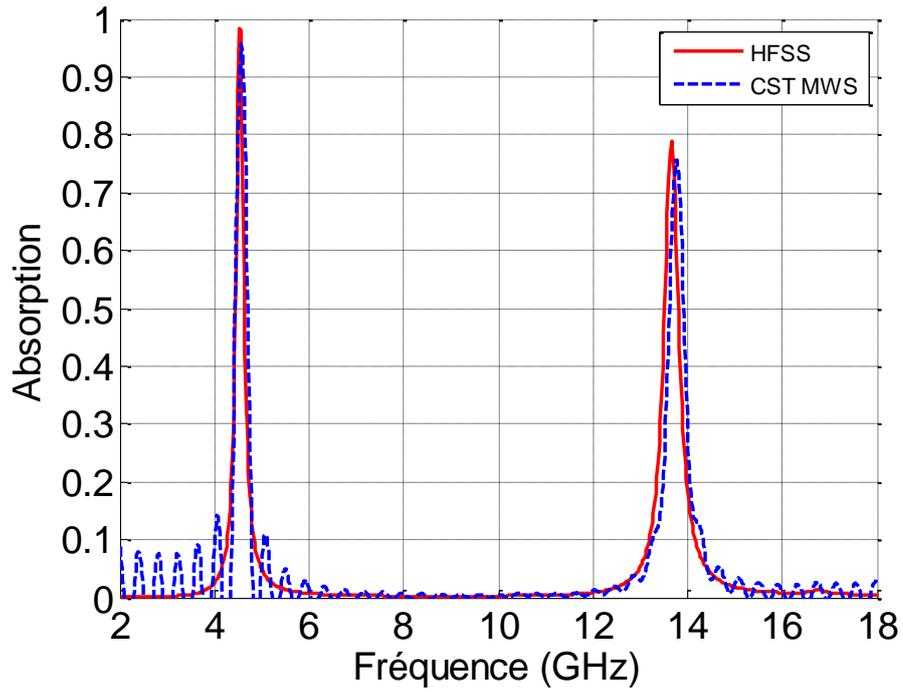


Figure 2.5 - Comparaison de la simulation de l'absorption de l'absorbant à métamatériaux de type patches carrés avec Ansys HFSS et CST Microwave Studio

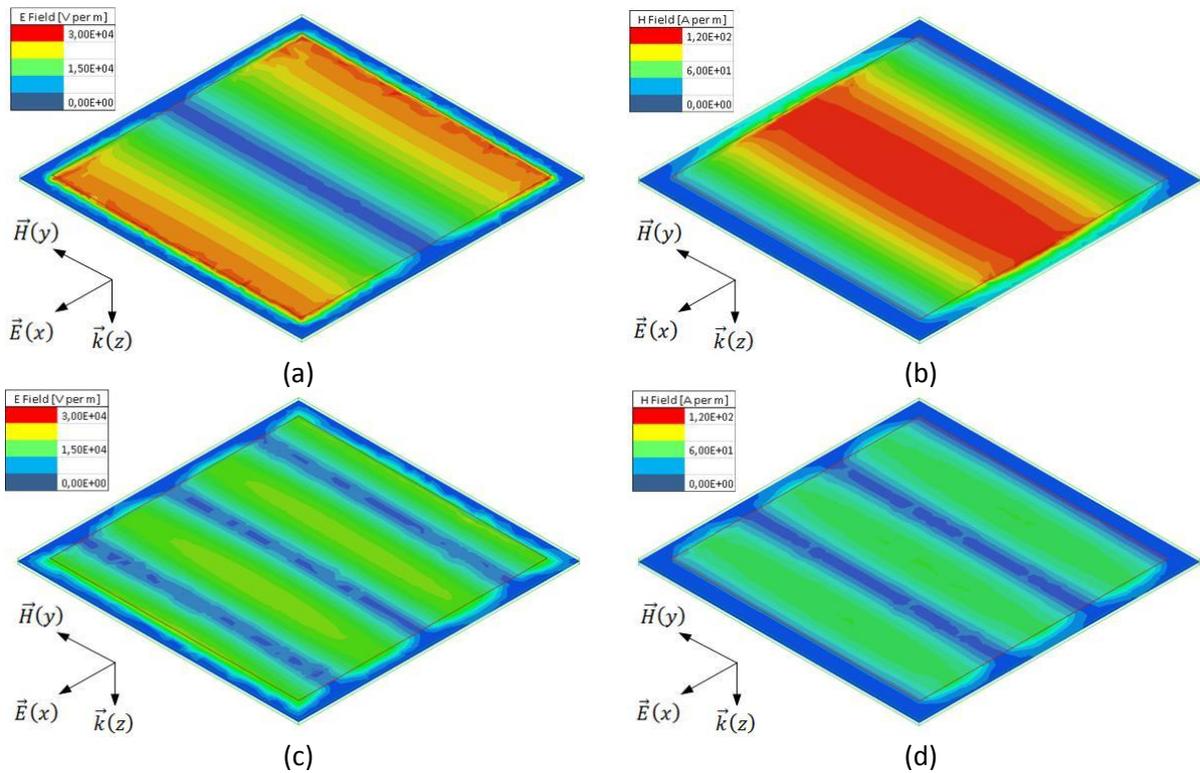


Figure 2.6 - (a) amplitude du champ E à 4,54 GHz, (b) amplitude du champ H à 4,54 GHz, (c) amplitude du champ E à 13,65 GHz, et (d) amplitude du champ H à 13,65 GHz

Il est possible d'extraire l'impédance caractéristique réduite z de la structure par la relation que donne D. R. Smith pour les matériaux inhomogènes⁶⁹ :

$$z = \frac{Z_c}{Z_0} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} = \sqrt{\frac{(1+S_{11})^2 - (S_{21})^2}{(1-S_{11})^2 - (S_{21})^2}} \quad (34)$$

Ainsi, si S_{21} est nul, nous pouvons déduire :

$$Z_c = \sqrt{\frac{(1+S_{11})^2}{(1-S_{11})^2}} \cdot Z_0 \quad (35)$$

On obtient donc l'impédance caractéristique (Z_c) du matériau (figure 2.7). On observe qu'aux résonances observées, la partie réelle de l'impédance caractéristique du matériau tend vers l'impédance du vide (soit approximativement 377 Ω) tandis que la partie imaginaire tend vers 0. Le métamatériau obtient donc un coefficient de réflexion Γ qui tend vers 0. L'énergie qui n'est pas réfléchi est piégée et absorbée dans la structure. Avec Z_c , on peut calculer et tracer le coefficient de réflexion (figure 2.8).

La partie imaginaire de l'impédance caractéristique, aussi appelé réactance, donne une information sur l'inductance et la capacité du matériau. On peut écrire l'impédance de la façon suivante :

$$Z = R + jX \quad (36)$$

Avec R résistance (en Ω) et X réactance (en Ω).

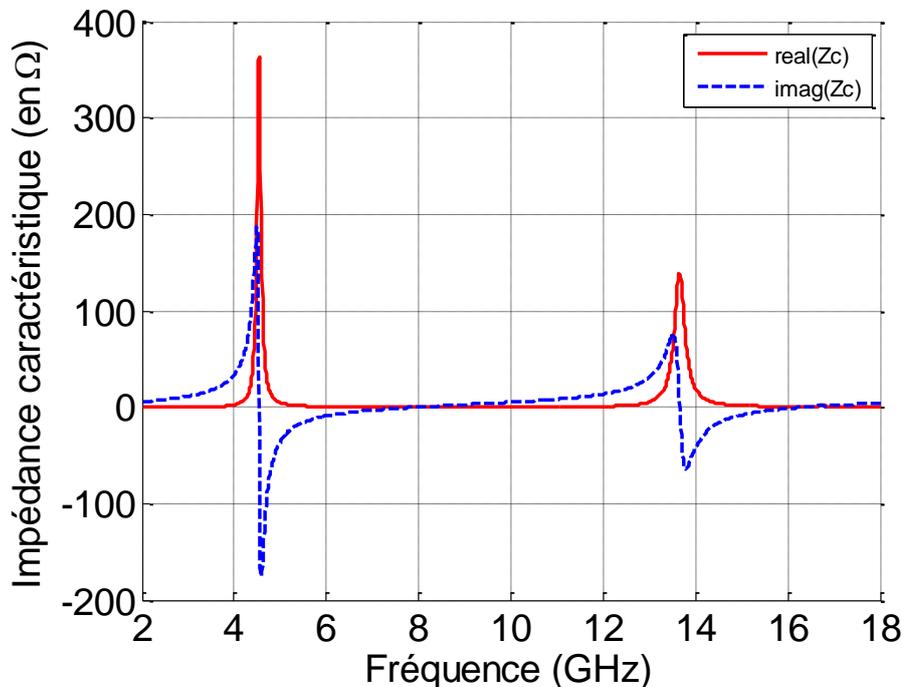


Figure 2.7 - Impédance caractéristique de l'absorbant à métamatériaux de type patchs carrés

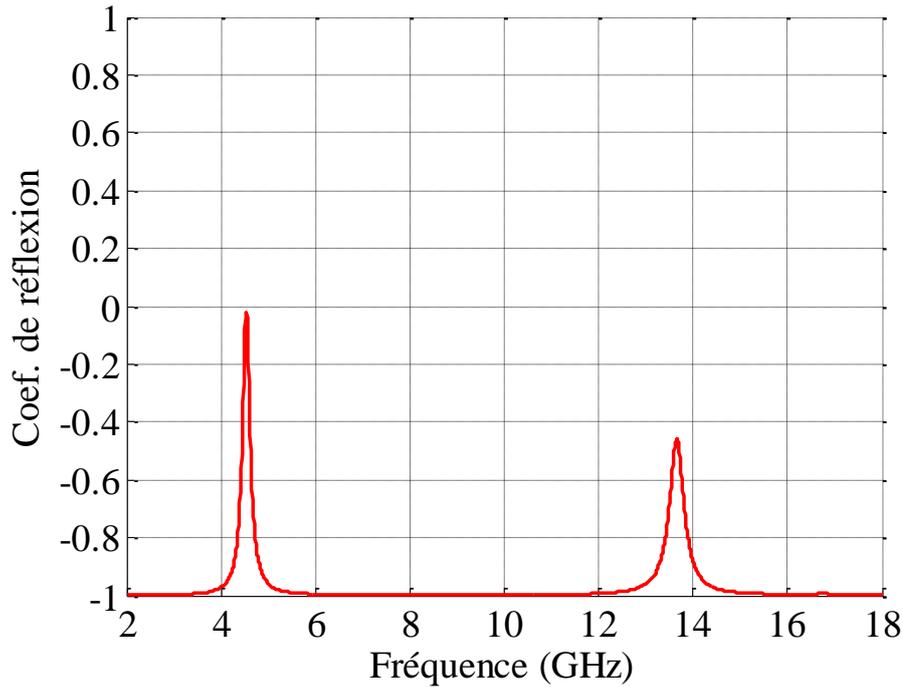


Figure 2.8 - Coefficient de réflexion de l'absorbant à métamatériaux de type patchs carrés

La réactance peut se définir de la façon suivante :

$$X = X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C} \quad (37)$$

Avec X_L réactance inductive (en Ω) et X_C réactance capacitive (en Ω). Ainsi quand X est égale à 0, nous sommes dans le cas d'une impédance purement résistive.

b. Conclusion provisoire sur les simulations

Dans ce premier exemple de simulation, on comprend très bien le potentiel que peuvent avoir ces nouveaux matériaux. L'absorption réalisée par la structure ne provient pas directement des pertes issues du substrat car son épaisseur et sa tangente de pertes sont trop faibles. On peut estimer l'absorption du diélectrique par la loi de Beer-Lambert avec :

$$Abs. = -\log(T) = -\log\left(\frac{P}{P_0}\right) \quad (38)$$

$$P = P_0 \cdot e^{-\alpha h} \quad (39)$$

Où T est la transmittance, P_0 est la puissance incidente et P la puissance récupérée après avoir traversé le matériau. Pour rappel, h est l'épaisseur du substrat. Ici, α est le coefficient d'absorption du matériau :

$$\alpha = \frac{4 \cdot \pi \cdot \kappa}{\lambda} \quad (40)$$

Avec κ coefficient d'extinction linéique, soit la partie imaginaire de l'indice de réfraction complexe du substrat.

Pour la structure étudiée, la part d'absorption issue des pertes dans le substrat est très faible, de moins de 1 %. Donc ce n'est pas ce phénomène d'absorption à proprement parler qui caractérise les pics d'absorption de notre structure.

Il s'agit d'un fonctionnement purement résonnant, d'où une bande de fonctionnement étroite. On peut comparer ce métamatériau aux absorbants résonants traditionnels de type couche de Dällenbach ou écran de Salisbury. L'allure de l'absorption est similaire avec des pics d'absorption aux fréquences de fonctionnement ; mais l'épaisseur du matériau est très différente.

Comparativement aux absorbants comportant des circuits analogiques : la conception est simplifiée, les matériaux sont courants et non chargés, l'épaisseur est réduite ainsi que la masse des matériaux. Mais la bande de fonctionnement est beaucoup plus étroite.

L'optimisation de la bande passante de l'écran de Salisbury passe par les couches de Jaumann, qui consistent à empiler plusieurs écrans de Salisbury. On peut imaginer comme optimisation pour les absorbants à métamatériaux le même type de procédé.

Ci-après, sont présentés les deux modèles qui ont servi à caractériser ce premier type de d'absorbant à métamatériaux puis nous cherchons à optimiser le fonctionnement.

c. Modèle par lignes de transmission

Dans un premier temps pour définir les fréquences où se produisent les pics d'absorptions, nous avons fait l'analogie avec les antennes planaires (ou patches). Une structure unité de notre absorbant à métamatériaux a un design proche de ce type d'antenne mais sans alimentation. La détermination de leur fréquence de fonctionnement se fait par la méthode des lignes de transmission. L'équation approximative pour définir la fréquence du premier mode est :

$$f_r = \frac{c_0}{2l_x\sqrt{\mu_r \cdot \epsilon_r}} \pm 5\% \quad (41)$$

où l_x longueur du patch selon le champ E.

Il est possible de déterminer plus précisément la fréquence de résonance par les équations⁷⁰ suivantes :

$$l_x' = l_x + 2\Delta l_x \quad (42)$$

$$l_y' = l_y + 2\Delta l_y \quad (43)$$

Où :

$$\frac{\Delta l_x}{h} = 0,412 \cdot \frac{(\epsilon_{reff}+0,3) \cdot \left(\frac{l_y}{h}+0,264\right)}{(\epsilon_{reff}-0,258) \cdot \left(\frac{l_y}{h}+0,8\right)} \quad (44)$$

$$\frac{\Delta l_y}{h} = 0,412 \cdot \frac{(\epsilon_{reff}+0,3) \cdot (\frac{l_x}{h}+0,264)}{(\epsilon_{reff}-0,258) \cdot (\frac{l_x}{h}+0,8)} \quad (45)$$

Soit :

$$f_r = \frac{c_0}{2 \cdot l_x \cdot \sqrt{\mu_r \cdot \epsilon_{reff}}} \quad (46)$$

Avec Δl correction de calcul à apporter, qui correspond à la largeur des franges que peut prendre le champ E (voir figure 2.9). h est l'épaisseur du substrat et l_y longueur du patch selon le champ H ($l_x = l_y$ dans le cas du patch carré). Et ϵ_{reff} permittivité effective :

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r+1}{2} + \frac{\epsilon_r-1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{l_y}\right)^{-1/2} \quad (47)$$

Pour que ce modèle soit valide, il faut que $\epsilon_r \leq 128$ et $0,01 \leq \frac{l_y}{h} \leq 100$.

Ainsi avec ce modèle et sans simulation, on peut calculer une valeur approché de la fréquence du premier mode. Dans notre cas, cette valeur est égale à 4,71 GHz (4,7 GHz avec l'équation approximative à +/- 5 %). Ce qui est proche du résultat de simulation : 4,54 GHz.

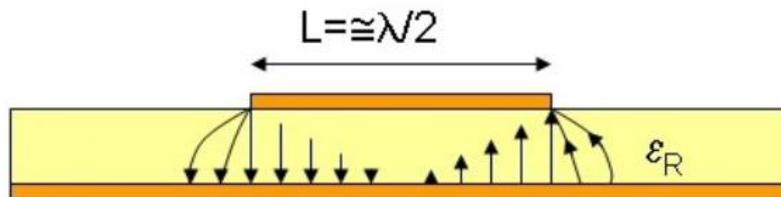


Figure 2.9 - Illustration de la longueur d'un patch (sans alimentation) et de la répartition du champ E sous ce dernier

Ce modèle ne permet pas de calculer les fréquences de résonances des modes d'ordres supérieurs. Ce modèle est issu d'un modèle plus général qui a été adapté pour une utilisation uniquement dans le cadre des antennes planaires. Nous avons donc étudié ce modèle utilisé pour tout type de cavité rectangulaire.

d. Modèle de cavité résonnante

Les différentes résonances observées correspondent à des concentrations d'énergie dans le substrat entre le plan de masse et le patch métallique. Les cartes de champs mettent en évidence la création de modes électromagnétiques dans cet espace aux fréquences de résonance. Le confinement de l'énergie, la création de modes et la correspondance en fréquence du modèle de lignes de transmission pour la première fréquence de fonctionnement, nous ont poussés à étudier le modèle de cavité résonnante⁷¹ pour caractériser les fréquences de résonances d'ordre supérieur au mode fondamental de nos patches.

Ce modèle s'applique à une structure qui serait une unique cavité, sans diélectrique sur ces bords comme présenté dans la figure 2.10.

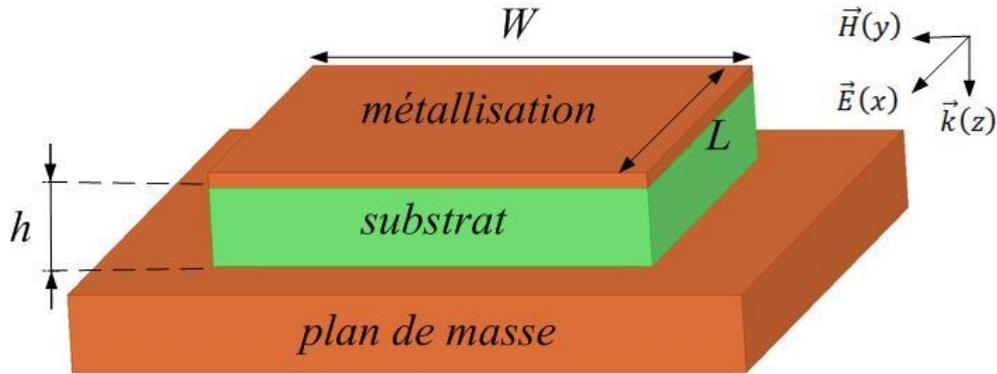


Figure 2.10 - Illustration de l'aspect d'une cavité résonante carrée

Le modèle de cavités résonnantes permet de calculer facilement les fréquences de résonance des modes d'une cavité rectangulaire. Pour cela, on peut utiliser les formules⁷² :

$$f_{lmn} = \frac{c_0}{2\pi\sqrt{\mu_r \cdot \epsilon_r}} \cdot k_{lmn} \quad (48)$$

Avec :

$$k_{lmn} = \sqrt{\left(\frac{l\pi}{h}\right)^2 + \left(\frac{m\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{W}\right)^2} \quad (49)$$

D'où :

$$f_{lmn} = \frac{c_0}{2\pi\sqrt{\mu_r \cdot \epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{l\pi}{h}\right)^2 + \left(\frac{m\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{W}\right)^2} \quad (50)$$

$$f_{lmn} = \frac{c_0}{2\sqrt{\mu_r \cdot \epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{l}{h}\right)^2 + \left(\frac{m}{L}\right)^2 + \left(\frac{n}{W}\right)^2} \quad (51)$$

où k_{lmn} nombre d'onde angulaire (en rad/m), l numéro du mode selon la hauteur h du patch, m numéro du mode selon la longueur L du patch (direction du champ E) et n numéro du mode selon la largeur W du patch (direction du champ H).

On peut déterminer par ce modèle que la première fréquence de résonance est de 4,7 GHz. Cette fréquence est proche de la simulation, à savoir 4,54 GHz. Ce mode est le mode TE₀₁₀. La résonance suivante est reliée au mode TE₀₃₀ qui résonne à 14,11 GHz, également assez proche de la simulation : 13,65 GHz.

Lors de ces modes dans une cavité, il peut y avoir interférence destructive. Il est possible d'appréhender le phénomène par l'étude du nombre d'onde angulaire k_{lmn} en fonction de la longueur et de la largeur du patch :

- En mode TE : $\Phi = k_{lmn} \cdot L$ (52)

- En mode TM : $\Phi = k_{lmn} \cdot W$ (53)

Les fréquences des modes correspondant à une opposition de phase entre l'onde incidente et l'onde réfléchi (de $\Phi = \pi + 2k\pi$ avec $k = 1,2,3, \dots$) concordent avec les fréquences auxquelles on observe un pic d'absorption sur nos simulations. Sur la bande de fréquence étudiée seul les modes TE_{010} et TE_{030} permettent la suppression de l'onde. L'ensemble des modes ne présentant pas de pics d'absorption sont appelés les modes sombres (ou "dark modes").

Ce modèle présente une limite, il ne peut s'appliquer qu'à une seule cavité et ne prend pas en compte la présence d'autres cavités à proximité (effets de couplage) et les pertes dans le substrat diélectrique. Ainsi, si on essaie d'extraire l'inductance et la capacité à l'aide de ce modèle par la technique de Montgomery⁷³ (Loop-coupled cavity - p.220) par les équations :

$$L_{lmn} = \mu \cdot k_{lmn}^2 \cdot V \quad (54)$$

$$C_{lmn} = \frac{\epsilon}{k_{lmn}^2 \cdot V} \quad (55)$$

Avec V volume de la cavité soit $V = h \cdot L \cdot W$.

Les valeurs obtenues permettent bien de vérifier l'équation suivante, mais donnent des valeurs erronées de L et C:

$$f_{lmn} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_{lmn} \cdot C_{lmn}}} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{\frac{1}{k_{lmn}^2} \cdot \mu \cdot \epsilon}} \quad (56)$$

L'inductance et la capacité obtenues, dans le cas idéal, nous donnerait une valeur de $Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}}$ complètement fautive. Nous avons donc cherché à approfondir notre compréhension du phénomène de suppression de l'onde incidente. Ainsi, nous avons développé un modèle théorique permettant de comprendre ce qui influence le niveau d'absorption.

e. Modèle théorique

A partir du modèle de cavité résonnante, nous avons voulu aller plus loin. Nous avons mis au point le circuit équivalent⁷⁴ (figure 2.11) de notre cavité en observant la distribution des charges dans notre simulation pour le premier mode.

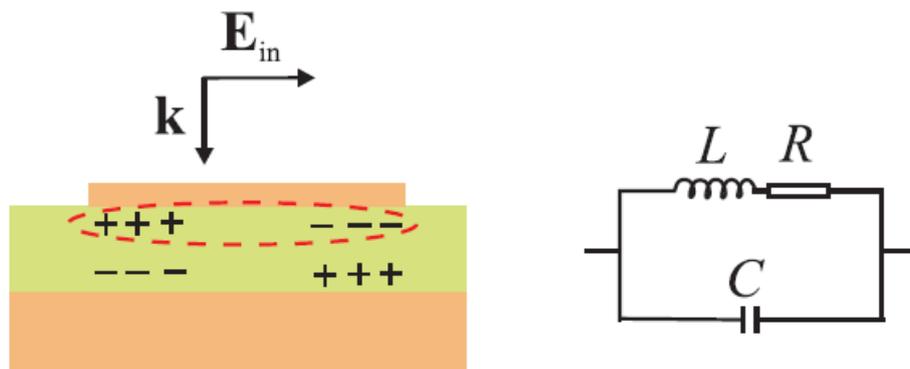


Figure 2.11 - Représentation et circuit équivalent de la cavité

Les paramètres géométriques de notre structure sont directement liés aux valeurs R , L et C . La résistance R de la structure est liée à l'épaisseur du substrat et aux pertes ohmiques. La capacité C générée par la charge accumulée dans la structure est également liée à l'épaisseur du substrat mais aussi à la taille des patches. Enfin l'inductance L est créée par le courant qui circule dans les parties métalliques (patch et plan de masse) donc liée à la taille des patches. Ainsi il n'est pas possible de relier un paramètre géométrique à une seule composante de l'équation d'où la difficulté de conception de ce type de structure.

Ne pouvant déterminer directement de façon exacte les valeurs de chaque élément de notre circuit équivalent, nous avons cherché quels sont les paramètres permettant d'obtenir une absorption totale. Nous avons donc repris les éléments d'un modèle qui a été appliqué à des nanostructures présentant une absorption totale de la lumière visible⁷⁵. Pour cela, nous devons déterminer l'impédance effective de la structure complète Z_{eff} . Pour cela nous procédons en plusieurs étapes, dans un premier temps il est possible de déterminer l'impédance de ce circuit avec l'équation :

$$Z = \frac{R+i\omega L}{1-\omega^2 LC+i\omega RC} \quad (57)$$

Nous avons introduit le terme d'amortissement dissipatif $\nu = \frac{R}{2L}$ dans un premier temps, qui permet de simplifier l'équation de cette façon :

$$Z = \frac{R+i\omega L}{1-\omega^2 LC+i\omega RC} = \frac{1}{C} \cdot \frac{(2.\nu+i.\omega)}{(\omega_0^2-\omega^2+2.i.\omega.\nu)} \quad (58)$$

En considérant que pour une absorption totale la valeur de la partie imaginaire de l'impédance caractéristique de l'absorbant à métamatériaux Z soit égale à zéro ($im(Z) = 0$), on obtient l'équation suivante :

$$Z = \frac{1}{2C} \cdot \frac{i}{(\omega_0-\omega+2.i.\nu)} \quad (59)$$

On introduit ensuite $|\beta|^2 < 1$ qui est le coefficient de couplage entre l'onde incidente et le mode résonnant. Il est défini par le numéro de mode et la distance entre patches. Ce qui va nous donner l'impédance effective de la structure d'absorbant à métamatériaux tel que :

$$Z_{eff} = \frac{|\beta|^2}{2C} \cdot \frac{i}{(\omega_0-\omega+2.i.\nu)} \quad (60)$$

Cette impédance va nous permettre de calculer le coefficient de réflexion de l'ensemble de la structure par l'équation :

$$r = \frac{Z_{eff}-Z_0}{Z_{eff}+Z_0} \quad (61)$$

En introduisant l'amortissement radiatif $\gamma = \frac{|\beta|^2}{2CZ_0}$ qui est dépendant de la capacité créée par la géométrie de la structure, nous avons déduit que l'absorption est de la forme suivante :

$$Abs. = 1 - |r|^2 = \frac{4.\nu.\gamma}{(\omega_0-\omega)^2+(\nu+\gamma)^2} \quad (62)$$

A la résonance $\omega_0 = \omega$, ainsi :

$$Abs. = \frac{4.v.\gamma}{(v+\gamma)^2} \quad (63)$$

Donc il y a absorption totale ($Abs. = 1$) quand $v = \gamma$, ou quand $\frac{R}{2L} = \frac{|\beta|^2}{2.c.Z_0}$.

L'amortissement total, noté $\Gamma = v + \gamma$, peut être déduit de la Lorentzienne formée par l'absorption en prenant sa largeur à mi hauteur, soit $FWHM = 2.\Gamma = 2(v + \gamma)$.

Il est intéressant de noter que l'amortissement dissipatif $v = \frac{R}{2L}$ et l'amortissement radiatif $\gamma = \frac{|\beta|^2}{2cZ_0}$ vont pouvoir varier de façon indépendante. L'amortissement dissipatif est lié à la géométrie de chaque patch et aux pertes du diélectrique. L'amortissement radiatif est lié à la géométrie du patch mais pas aux pertes, il est lié à la distance entre patches. Donc si l'on ne modifie pas la géométrie du patch (on garde les mêmes valeurs pour l_x , l_y et h) mais que l'on fait varier soit les pertes du diélectrique soit la distance entre patch, on pourra faire varier indépendamment l'amortissement dissipatif ou l'amortissement radiatif. On est donc en mesure d'améliorer les performances d'un type de patch donné.

Dans notre cas, nous nous sommes concentrés sur la variation des pertes diélectriques en appliquant plusieurs variations sous Ansys HFSS. De ces variations, nous avons extrapolé les valeurs de l'amortissement total trouvées pour déterminer sa valeur pour des pertes nulles. Quand les pertes sont nulles, l'amortissement dissipatif est nul, la valeur de l'amortissement total est égale à l'amortissement radiatif. L'absorption totale se produit quand l'amortissement dissipatif est égal à l'amortissement radiatif. Il faut donc fixer la valeur des pertes diélectriques de façon à obtenir une valeur de l'amortissement total égale au double de l'amortissement radiatif.

Si l'on veut améliorer la première résonance de notre structure simulée, il faut appliquer une extrapolation des différentes variations des pertes ($\epsilon'' = \{0,011; 0,088; 0,176\}$) pour obtenir l'amortissement total quand les pertes sont nulles (figure 2.12). Puis on double cette valeur pour obtenir l'amortissement nécessaire pour une absorption totale. On obtient une permittivité imaginaire de $\epsilon'' = 0,0944$, très proche de la valeur initiale du FR4, dont on trace l'absorption sur la figure 2.13.

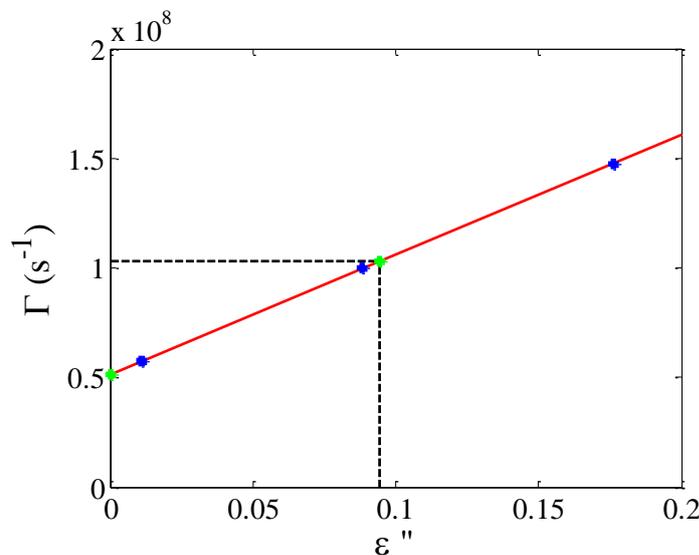


Figure 2.12 - Détermination de l'amortissement nécessaire pour une absorption totale

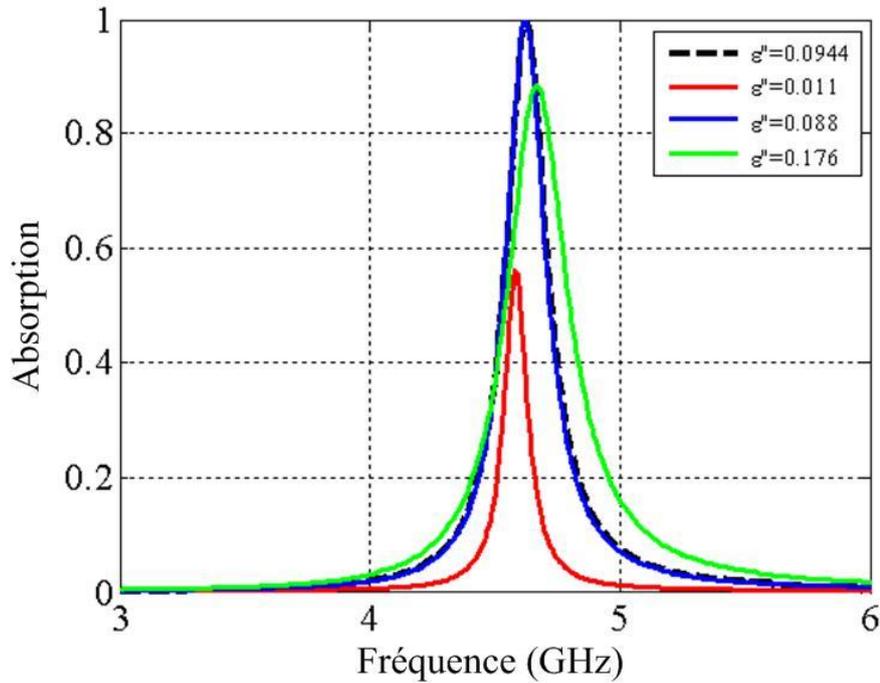


Figure 2.13 - Comparaison de l'absorption à la première résonance pour les différentes valeurs de ϵ'' étudiées sous Ansys HFSS

Sur ce tracé, la différence entre l'absorption de départ ($\epsilon'' = 0,088$) et l'absorption totale se voit peu car les performances de la structure de base étaient déjà très bonnes ($Abs. = 98\%$). Sur la figure 2.13, on observe également une variation en fréquence qui vient d'une erreur de simulation faite par Ansys HFSS, par manque de maillage entre le patch et le plan métallique. Nous avons réalisé les mêmes simulations à l'aide COMSOL Multiphysics (figure 2.14) pour supprimer cette variation.

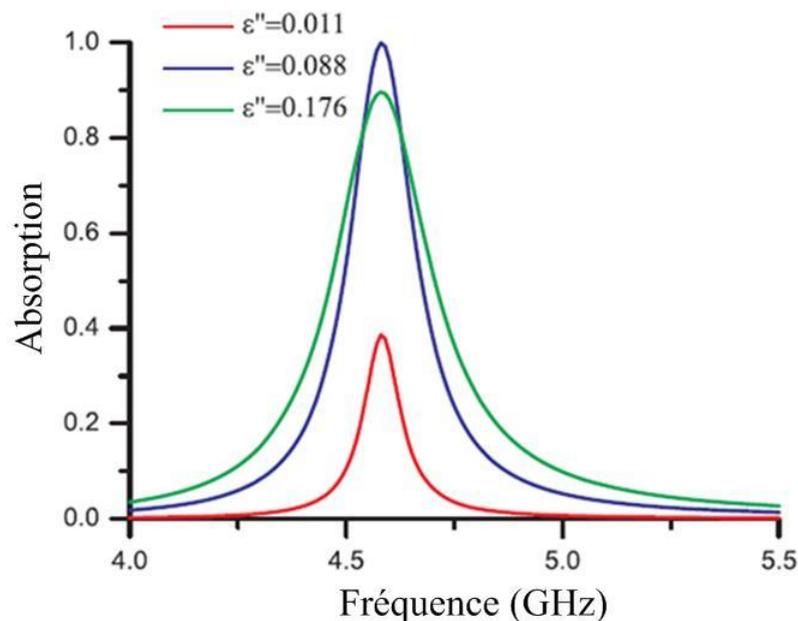


Figure 2.14 - Comparaison de l'absorption à la première résonance pour les différentes valeurs de ϵ'' étudiées sous COMSOL Multiphysics

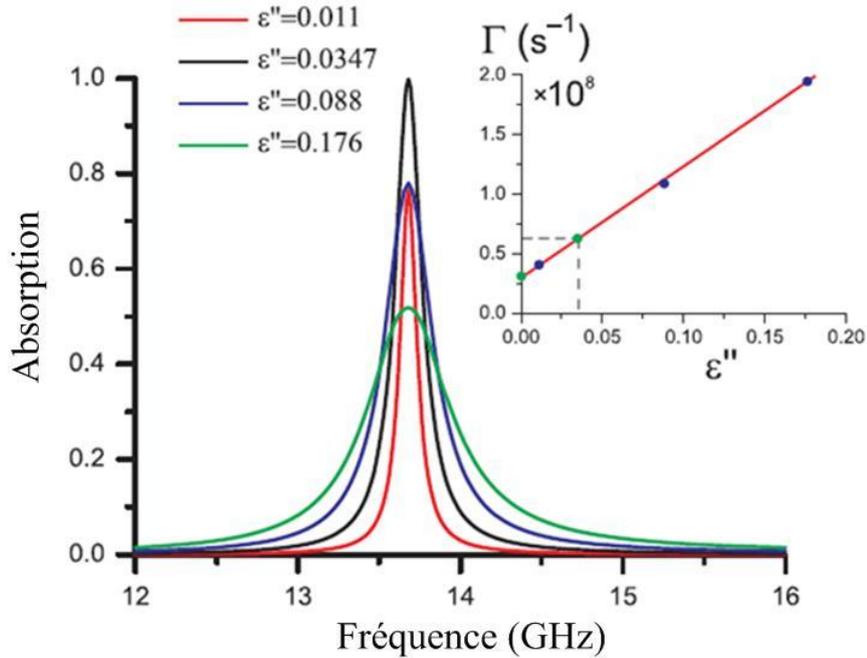


Figure 2.15 - Détermination de l'amortissement nécessaire pour une absorption totale et comparaison de l'absorption à la seconde résonance pour les différentes valeurs de ϵ'' étudiées sous COMSOL Multiphysics

Nous avons réalisé la même procédure sur le deuxième pic d'absorption et obtenu des résultats de la figure 2.15.

Pour le deuxième pic de résonance, nous avons calculé que la partie imaginaire de la permittivité devait être de $\epsilon'' = 0,0347$ pour obtenir une absorption totale. Nous avons vérifié ce résultat en simulation avec succès. L'apport de cette technique d'optimisation se voit beaucoup mieux sur cette deuxième résonance car l'absorption de départ est bien moins bonne que pour la première résonance.

Nous avons également étudié le cas de la variation de la distance entre patch. Hypothétiquement si la distance entre patch tend vers zéro, le coefficient de couplage entre l'onde incidente et le mode résonnant $|\beta|^2$ tend vers zéro et ainsi l'amortissement radiatif $\gamma = \frac{|\beta|^2}{2cZ_0}$ tendra vers zéro. Il est donc possible de supprimer la composante amortissement radiatif de l'amortissement total. Ainsi il suffit de doubler cette valeur pour obtenir une absorption totale. Malheureusement dans ce cas, il faudrait un espacement entre patch qui soit négatif que ce soit pour le premier ou le deuxième pic d'absorption. L'absorption totale n'est pas possible en ne jouant que sur la distance entre patch, néanmoins il est possible d'améliorer l'absorption en faisant tendre l'espacement entre patch vers zéro. C'est ce que présente la figure 2.16.

On observe sur cette figure que la distance entre patch la plus petite donne le résultat avec la meilleure absorption. Quelques artefacts de calcul sont présents sur cette simulation Ansys HFSS. On observe aussi l'influence négligeable sur la fréquence qu'à la modification de l'espacement entre patches.

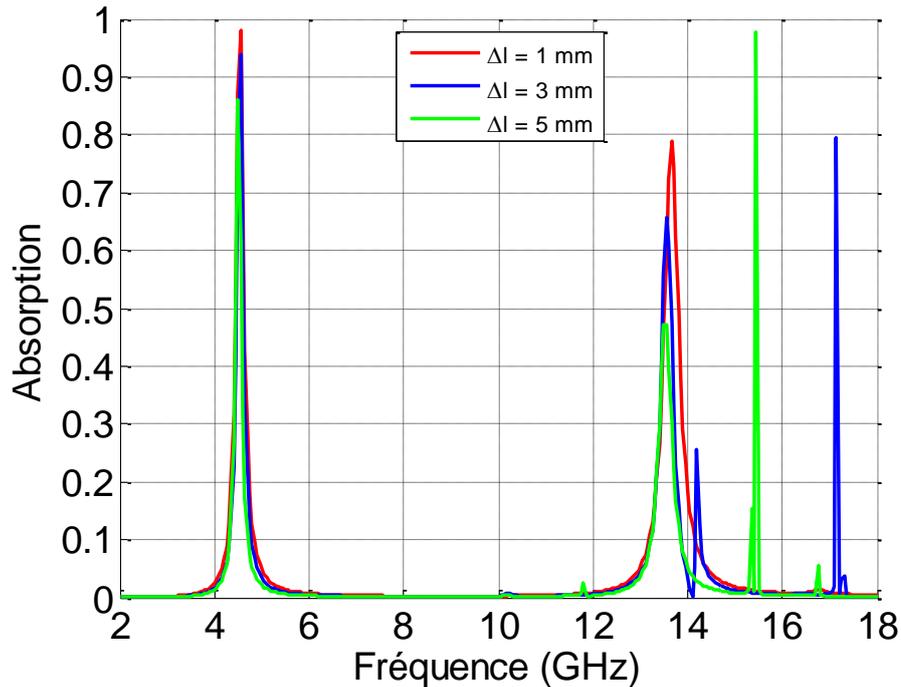


Figure 2.16 - Variation de la distance entre patch Δl

La variation des autres paramètres géométriques (l_x , l_y et h) a été réalisée. La modification de ces paramètres a une influence directe sur la résistance, l'inductance et la capacité équivalente de la structure de l'absorbant à métamatériaux.

En utilisant la structure précédemment simulée, nous avons identifié les plages où l'absorption est supérieure à 95 % pour différentes valeurs de pour l_x et l_y simultanément, noté L, et h . Nous avons synthétisé ces résultats dans la figure 2.17.

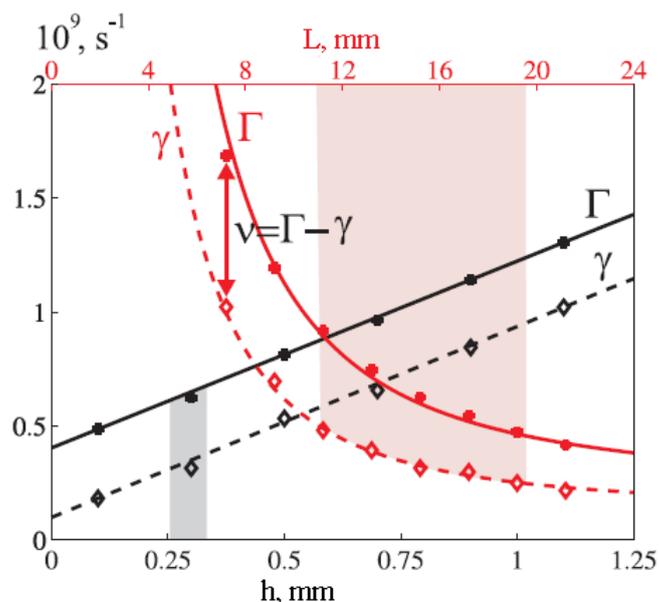


Figure 2.17 - Plages où l'absorption est supérieure à 95 % pour différentes valeurs de L et h

Sur ce graphe qui présente les variations soit de la hauteur du substrat h (en noir) soit de la longueur du patch L (en rouge) en fonction du niveau d'amortissement à la première résonance, la

plage grisée présente une absorption supérieur à 95 % en faisant varier l'épaisseur, et, la plage rouge claire une absorption supérieur à 95 % quand l'on fait varier la longueur du patch. On aperçoit très clairement que pour la variation de la longueur, une plage de différentes longueurs permet d'obtenir une absorption au dessus de 95 %. Donc dans cet intervalle, on peut observer des régimes particuliers où l'amortissement radiatif et l'amortissement dissipatif varient en restant très proche. Durant ce régime, les paramètres qui composent l'amortissement total, et par extension l'impédance effective de la structure, vont se compenser pour donner une absorption quasi totale.

Après avoir extrait l'amortissement radiatif et l'amortissement dissipatif, et après avoir étudié la variation des différents paramètres composant notre structure d'absorbant à métamatériaux constitué de patchs carrés (distance entre patchs, pertes dans le diélectrique, longueur du patch et épaisseur du substrat), nous pouvons extraire les différents paramètres de notre modèle théorique. Nous pouvons ainsi déduire la valeur du coefficient de couplage entre l'onde incidente et le mode résonnant $|\beta|^2$. Nous nous plaçons dans le cas d'une absorption totale en employant les valeurs de permittivité imaginaire qui ont été calculées (respectivement $\varepsilon'' = 0,0944$ et $\varepsilon'' = 0,0347$) pour chacune des résonances de notre structure d'absorbant à métamatériaux. Sachant que $Z_{eff} = Z_0$ à la résonance quand il y a absorption totale, et que la résistance d'un matériau se calcule par la relation :

$$R = \frac{1}{\sigma \cdot h} \quad (64)$$

Avec la conductivité $\sigma = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon'' \cdot \omega$.

L'inductance et la capacité peuvent se déduire par les relations :

$$L = \frac{R}{2 \cdot \nu} \quad \text{et} \quad C = \frac{1}{L \cdot \omega^2} \quad (65)$$

Nous avons observé sur la simulation qu'à chaque résonance $\nu = \gamma = 2,83 \cdot 10^8 \text{ s}^{-1}$. Ainsi, avec la relation $|\beta|^2 = 2 \cdot \gamma \cdot C \cdot Z_0$, on peut estimer à la première résonance $|\beta|^2 = 1,03 \cdot 10^{-7}$ et à la seconde résonance $|\beta|^2 = 1,6 \cdot 10^{-7}$. Nous avons ainsi pu retrouver l'ensemble des paramètres décrivant notre structure d'absorbant à métamatériau. Nous pouvons vérifier nos résultats en calculant l'impédance et l'absorption pour chacun des cas en utilisant la relation :

$$Z_{eff} = |\beta|^2 \cdot \frac{R + i\omega L}{1 - \omega^2 LC + i\omega RC} \quad (66)$$

Le modèle de cavité permet de définir les fréquences de fonctionnement pour un absorbant à métamatériaux mais sans pouvoir prédire le niveau d'absorption de la structure créée. Le modèle théorique permet d'atteindre une absorption totale à partir de n'importe quel absorbant à métamatériaux. En combinant ces deux modèles, il est possible de réaliser des absorbants à métamatériaux qui absorbe totalement une onde qui arrive selon une incidence normale à la surface de l'absorbant et polarisée dans le sens de la longueur des patchs à une fréquence choisie. Ce nouveau type d'absorbant va ainsi pouvoir être utilisé dans les applications précédemment citées comme la CEM ou la furtivité radar.

Dans nos simulations et nos mesures, nous n'arrivons pas à mettre en évidence la partie radiative de l'amortissement. Le rayonnement doit se faire de façon rasante par rapport au plan de notre structure, c'est pour cela qu'il est difficile de le détecter.

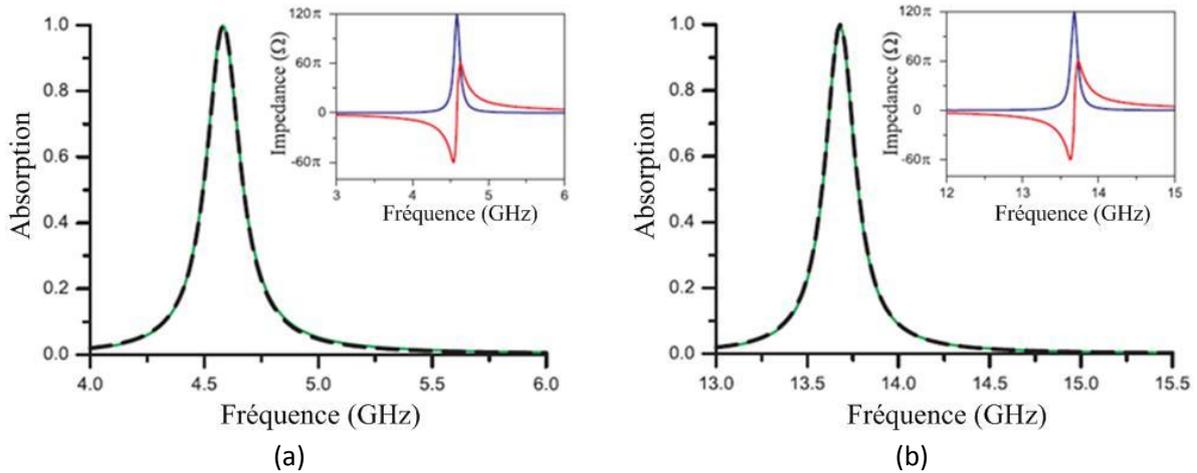


Figure 2.18 - Calcul de l'impédance et de l'absorption à partir des paramètres déterminés par le modèle théorique pour la première résonance en (a) et pour la seconde résonance en (b)

L'étude de ces absorbants à métamatériaux de type patches carrés ne s'arrête pas là, nous avons cherché à voir leur comportement face à une onde dont l'incidence ou la polarisation varie. Ce complément à l'étude initiale permet de décrire les performances de l'absorbant dans différents cas et de mieux cibler l'utilisation qui peut en être fait.

f. Incidence et polarisation

L'étude de la variation de l'incidence et de la polarisation de l'onde incidente décrit la réponse de l'absorbant à métamatériaux selon trois axes. Il faut considérer la figure 2.19.

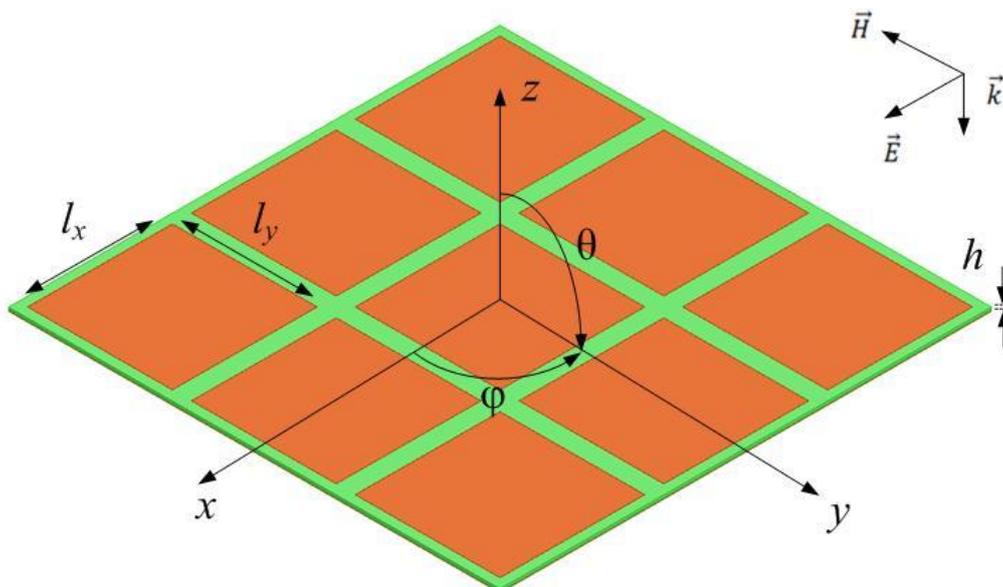


Figure 2.19 - Représentation des axes et des angles de variation pour l'incidence et la polarisation

Le changement d'incidence se fait selon deux axes avec l'onde polarisée selon la longueur des patches qui compose l'absorbant (le champ E est selon l'axe x). Ainsi, tout en gardant cette polarisation, soit nous opérons une rotation de l'angle d'incidence autour de l'axe x , nous l'appelons

variation selon θ_x , soit nous opérons une rotation de l'angle d'incidence autour de l'axe y , nous l'appelons variation selon θ_y . Pour la variation de la polarisation, l'incidence est normale à la surface de l'absorbant mais les champs E et H vont tourner autour de l'axe z , nous appelons ce changement de polarisation variation selon φ_z .

Après simulation sous Ansys HFSS, on peut voir que la modification de l'incidence autour de l'axe x a plusieurs effets (figure 2.20). On observe la résurgence de certains modes sombres et également une dégradation des performances avec l'augmentation de l'angle. Un décalage en fréquence est observé sur le pic autour de 13,65 GHz.

Pour la variation selon θ_y (figure 2.21), le changement de l'angle d'incidence de l'onde autour de l'axe y a des effets comparable à ce que l'on observe pour la variation de l'incidence selon θ_x . Des modes qui étaient sombres précédemment sont excités, plutôt fortement. Le plus important est le mode TE_{020} . Pour le pic d'absorption à 4,7 GHz, rien ne change mais par contre pour le pic à 13,65 GHz, les performances sont dégradées et un léger décalage en fréquence apparaît.

Enfin, en faisant évoluer l'angle de polarisation de l'onde incidente autour de l'axe z (figure 2.22), avec le champ E colinéaire à x quand l'angle est à 0° et champ E colinéaire à y quand l'angle est à 90° , on ne voit pas de changement de comportement. En simulation, malgré la géométrie carrée des patches qui logiquement devrait induire un décalage, la fréquence de fonctionnement ne change pas quelque soit l'angle de polarisation de l'onde. Nous vérifierons cela en mesure dans le chapitre suivant. Le niveau d'absorption reste également identique et aucun mode sombre n'est excité comme pour le changement d'incidence.

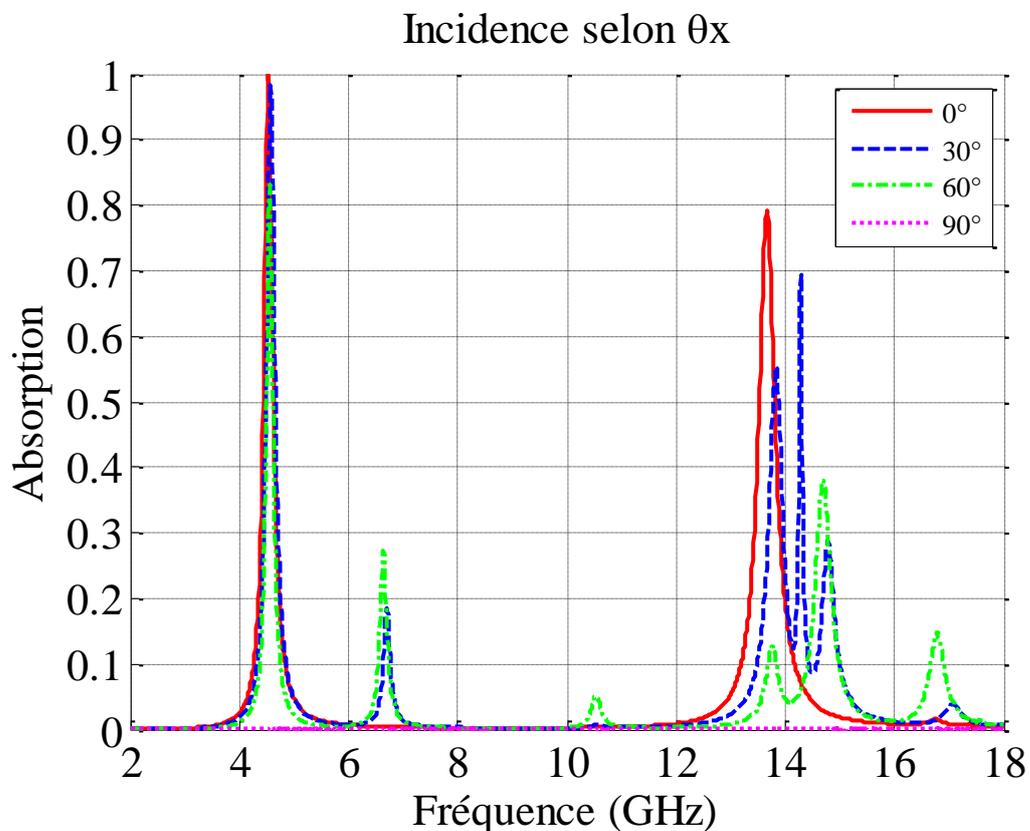


Figure 2.20 - Variation de l'angle d'incidence autour de l'axe x

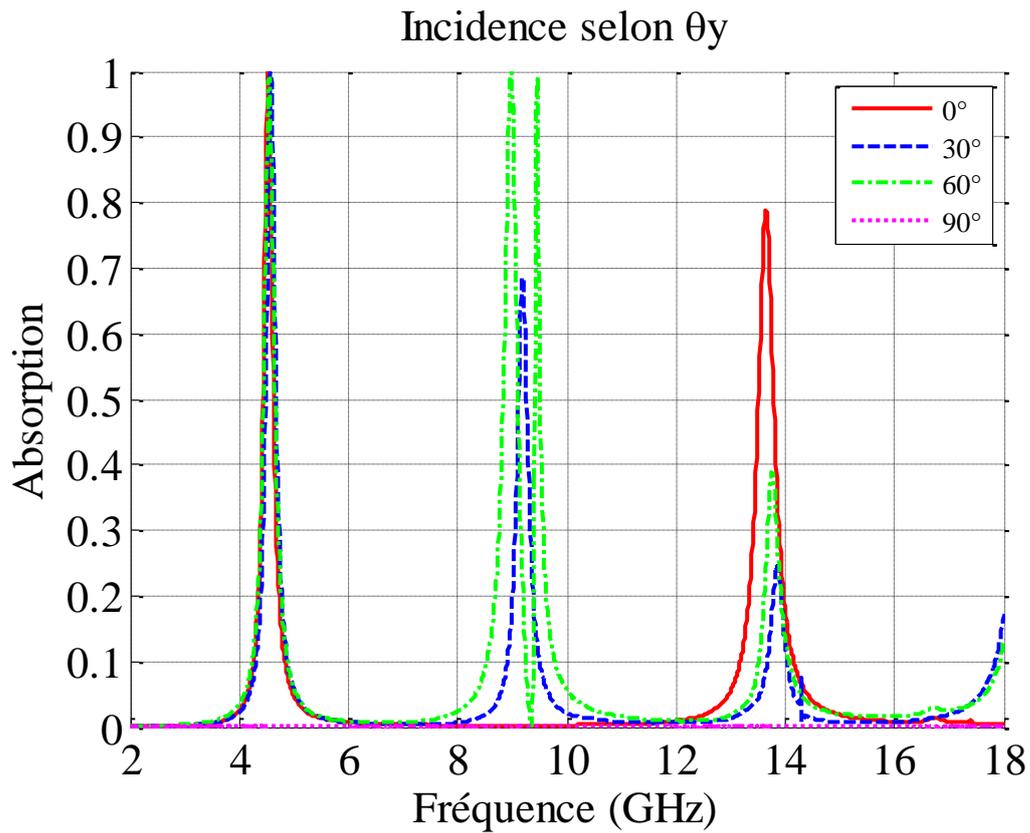


Figure 2.21 - Variation de l'angle d'incidence autour de l'axe y

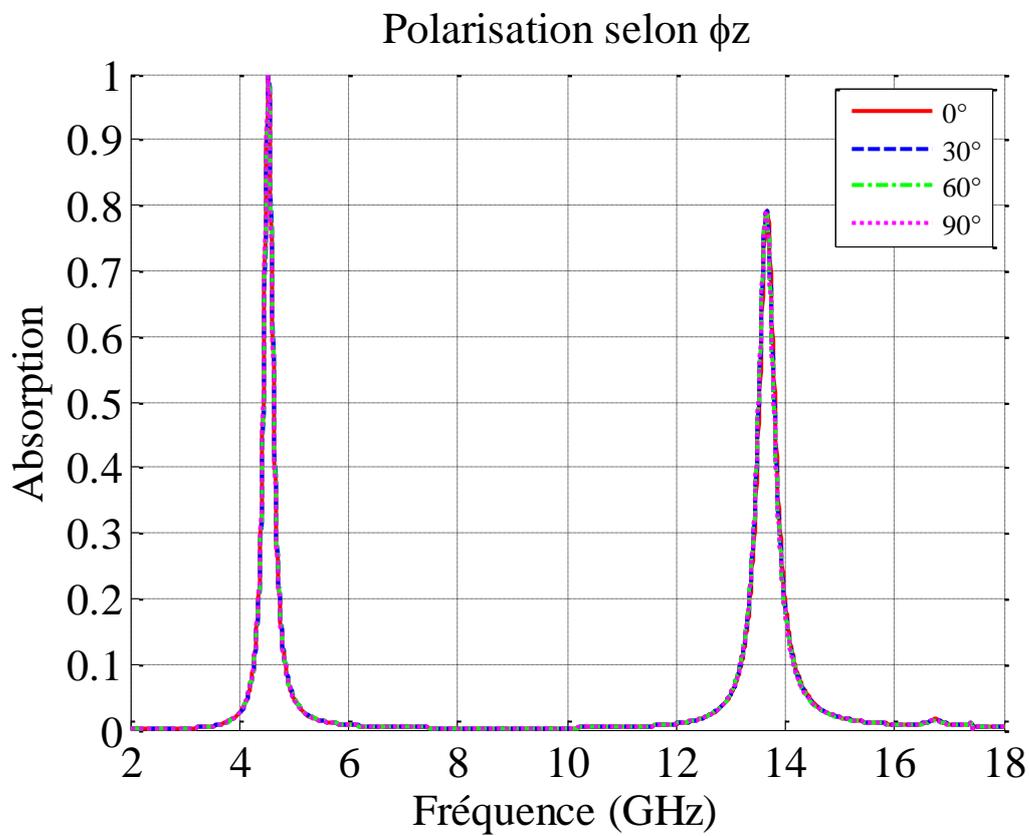


Figure 2.22 - Variation de l'angle de polarisation autour de l'axe z

A la suite de ces simulations, nous nous sommes demandés ce qu'il advient dans le cas d'un changement de polarisation si le patch n'est plus carré mais rectangulaire. Car si la fréquence de fonctionnement d'un patch carré ne change pas en faisant varier la polarisation de l'onde incidente, la différence de dimensions entre longueur (l_x) et largeur (l_y) doit apporter des états transitoires entre les deux fonctionnements types qui seront une polarisation à 0° , avec le champ E colinéaire à x , et une polarisation à 90° , champ E colinéaire à y . Nous avons donc simulé le cas de patches rectangulaires avec les dimensions $l_x=15,2$ mm et $l_y=6,6$ mm. La cellule unité est représentée sur la figure 2.23. La vue en coupe de cette cellule unité est donnée sur la figure 2.24.

L'ensemble des dimensions sont donnés dans ce tableau :

h_1	17 μ m
h_2	0,3 mm
l_x	15,2 mm
l_y	6,6 mm
Δl	2 mm
p_x	17,5 mm
p_y	8,6 mm

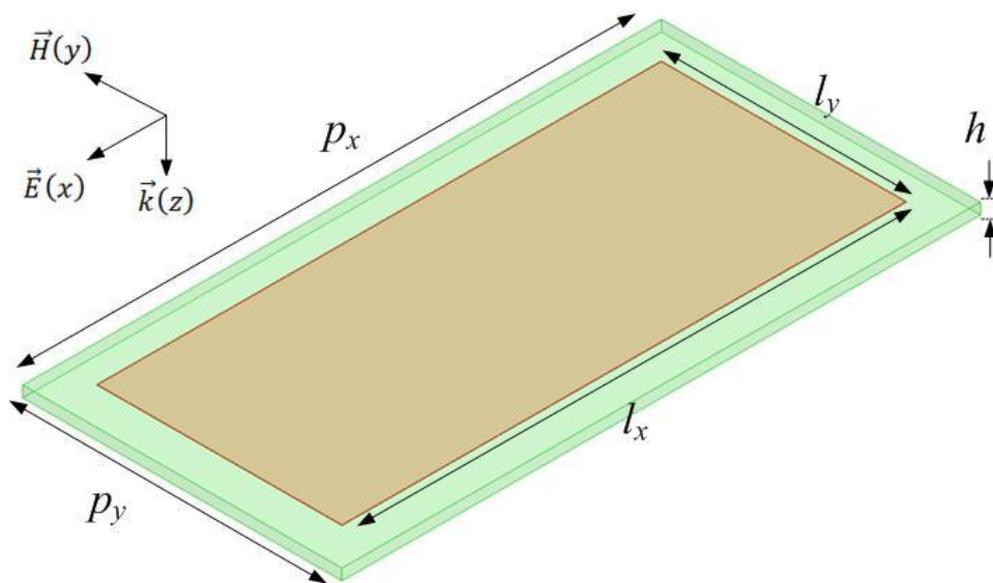


Figure 2.23 - Modélisation 3D d'une cellule unité d'un absorbant à métamatériaux de type patches rectangulaires

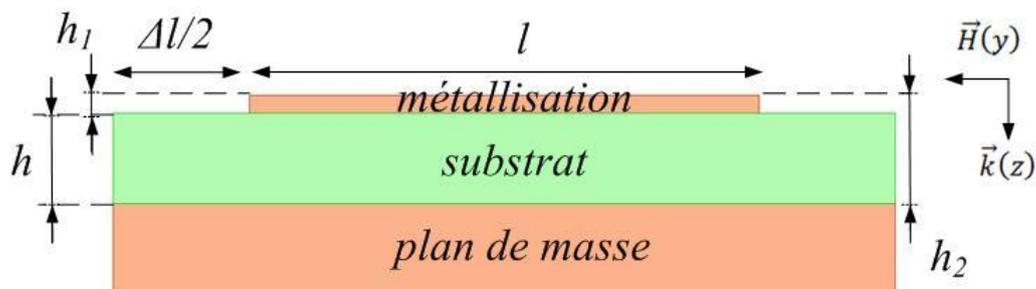


Figure 2.24 - Vue en coupe d'une cellule unité d'un absorbant à métamatériaux de type patches rectangulaires

Ce patch a la particularité d'avoir une longueur lx identique au patch précédent, ce qui implique un fonctionnement pour la polarisation selon φ_z très proche de ce que l'on observe avec le patch carré précédent. Par contre, la fréquence de fonctionnement pour la polarisation à 90° tend vers $f_r = 10,8 \text{ GHz}$ selon le modèle de cavité. La simulation de ce type de patches donne le résultat de la figure 2.25.

Cette nouvelle simulation met en évidence l'effet de transition entre les deux types de fonctionnement de cette structure. Quand le champ E selon lx (polarisation de 0°), nous avons deux pics d'absorption à 4,8 GHz et 13,9 GHz, et quand le champ E est selon ly (polarisation de 90°) nous avons un pic à 10 GHz. Les polarisations intermédiaires présentent des allures de courbe comportant l'ensemble des pics avec un niveau d'absorption qui est en fonction du type de fonctionnement le plus proche angulairement. Ce type de patches permet de créer un autre type de fonction que le patch carré car d'après l'angle de polarisation selon φ_z , le métamatériau absorbera une quantité plus ou moins importante d'une onde à une fréquence donnée.

Notre étude théorique et les simulations de l'absorbant à métamatériaux de type patches carrés (et rectangle) s'arrête ici. Nous étudions de façon pratique des structures comportant des patches carrés dans le chapitre III. L'optimisation de la bande de fonctionnement est étudiée plus loin dans ce chapitre. Mais avant, nous avons étudié d'autres types de structures d'absorbant à métamatériaux. Dans un premier temps, nous avons pensé que logiquement le changement de l'angle de polarisation (selon φ_z) de l'onde incidente sur un patch carré décale la fréquence de fonctionnement de ce patch ; et plus particulièrement quand le champ E est parallèle avec la diagonale du carré (la plus grande longueur possible). Nous avons donc cherché à un patch non sensible à la polarisation de l'onde incidente, un patch circulaire, que nous présentons ci-après.

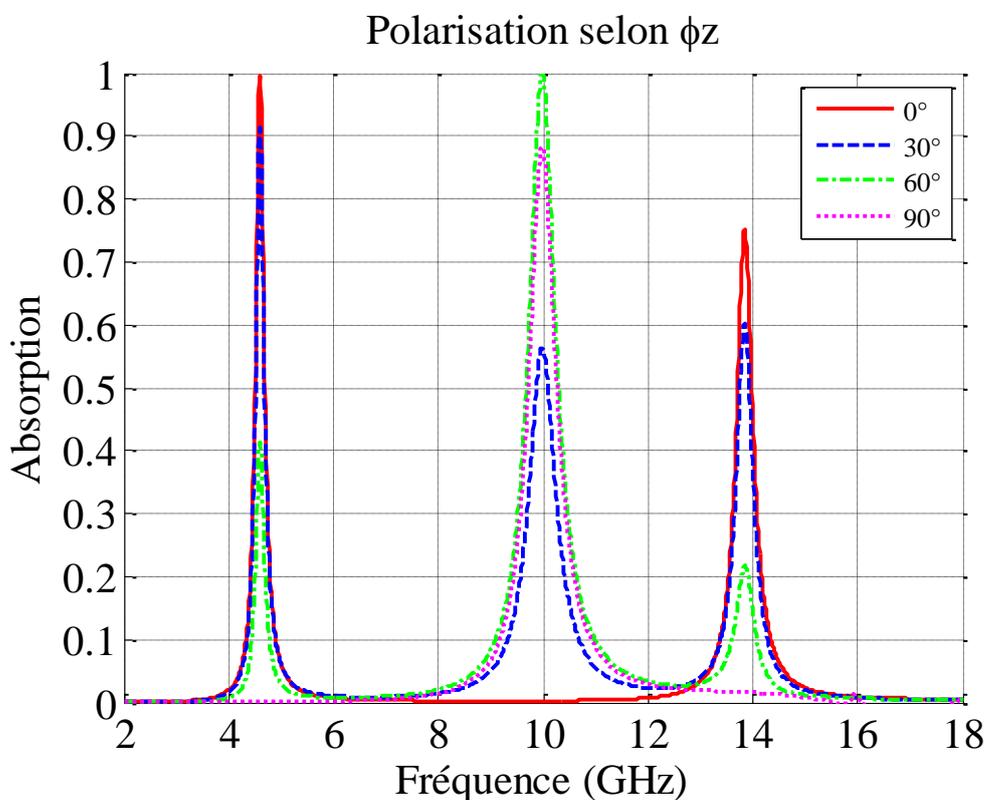


Figure 2.25- Variation de l'angle de polarisation autour de l'axe z pour l'absorbant à métamatériaux de type patches rectangulaires

g. Conclusion

Les résultats de ces premières simulations et les analyses de notre structure par le modèle de cavité et le modèle théorique nous ont permis de mettre en évidence les paramètres importants dans la conception d'absorbants à métamatériaux. Ce nouveau type d'absorbant a la capacité d'absorber de façon totale une onde à une fréquence qu'il est possible de définir. La bande de fonctionnement de ce type d'absorbant est très étroite mais l'absorbant fonctionne sur différents modes et donc peut couvrir plusieurs fréquences. Les principaux avantages de ce type d'absorbant sont sa faible épaisseur, sa facilité de fabrication et son faible coût par rapport aux matériaux absorbants traditionnels. Dans la suite de ce chapitre, nous abordons les absorbants à métamatériaux de type patches circulaires qui permettent de s'affranchir du décalage en fréquence que pourrait apporter le changement de polarisation (selon φ_z) sur un patch carré. Puis nous appliquons le principe de Babinet sur ces structures pour nous donner plus de possibilité de développement. Et nous montrons les différentes possibilités d'optimisation adaptée pour l'élargissement de la bande passante. Enfin les simulations correspondant aux prototypes fabriqués sont exposées.

2. Modèles de l'absorbant à métamatériaux de type patches circulaires

Après avoir développé l'absorbant à métamatériaux comportant des patches carrés, nous avons cherché à réduire la dépendance en fréquence du métamatériau par rapport à la polarisation de l'onde incidente en incidence normale. Nous avons donc cherché un motif qui n'entretient pas cette dépendance. Nous nous sommes alors tourné vers les patches circulaires car quel que soit l'angle de polarisation (selon φ_z) de l'onde qu'on lui applique la longueur du patch est la même. Nous avons ainsi remplacé les patches carrés par des patches circulaires dans nos simulations et extrait les paramètres qui les définissent. L'ensemble des équations et modèles sont assez proches de ce que l'on a observé pour le patch carré mais différentes nuances sont à prendre en compte. Commençons par l'étude des simulations.

a. Simulations

Ci-après, la structure unité d'un absorbant à métamatériaux de type patches circulaires. De la même façon que pour les simulations précédentes les conditions aux limites font que la structure est dupliquée en miroir à l'infini. Les différents paramètres géométriques sont décrits sur la figure 2.26. L'ajout d'autres cellules unités est illustré dans la figure 2.27. La vue en coupe d'une cellule unité est représentée avec la figure 2.28.

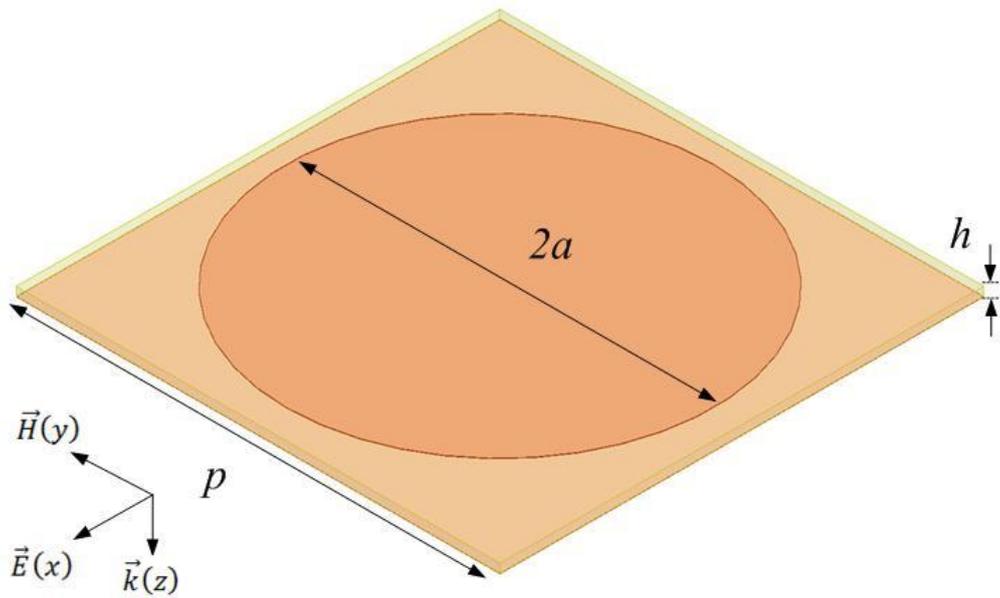


Figure 2.26 - Modélisation 3D d'une cellule unité d'un absorbant à métamatériaux de type patches circulaires

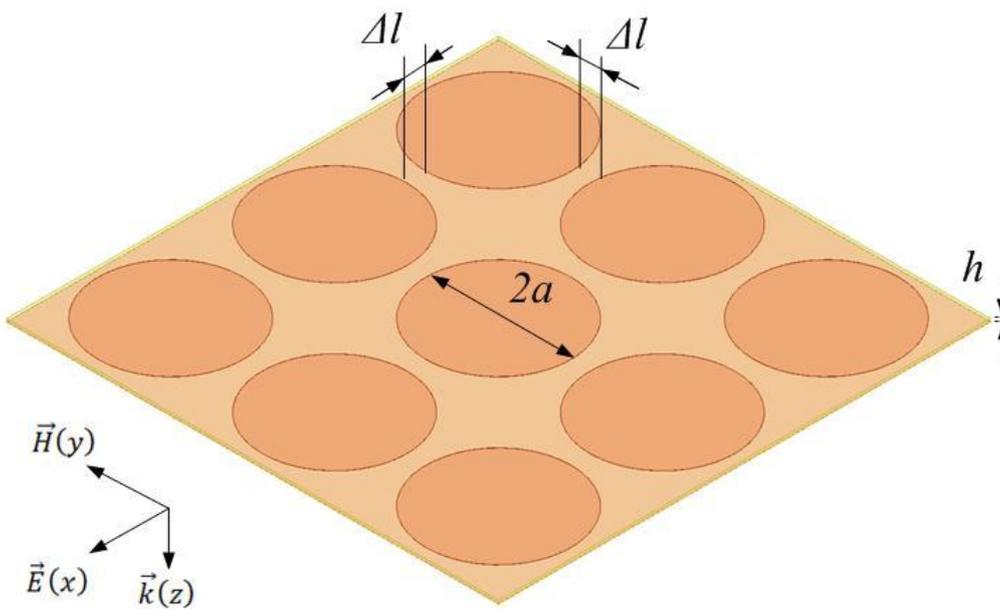


Figure 2.27 - Modélisation 3D de plusieurs cellules unités d'un absorbant à métamatériaux de type patches circulaires

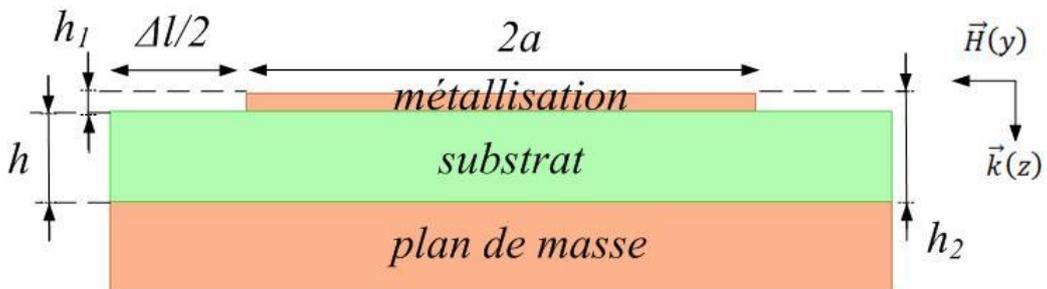


Figure 2.28 - Vue en coupe d'une cellule unité d'un absorbant à métamatériaux de type patches circulaires

Les dimensions utilisées pour cette simulation sont :

h_1	17 μm
h_2	0,317 mm
h	0,3 mm
a (rayon)	7,4 mm
Δl	2 mm

Le substrat est toujours de l'époxy FR4 ($\epsilon_r = 4,4 + i0,088$ et $\mu_r = 1$). La métallisation en cuivre fait 17 μm d'épaisseur et le plan de masse est également en cuivre.

Cet absorbant à métamatériaux est réalisé avec les mêmes matériaux que l'absorbant à métamatériaux utilisant des patches carrés. Il est prévu pour fonctionner un peu plus haut en fréquence que celui utilisant des patches carrés.

En simulant cette structure avec Ansys HFSS et CST Microwave Studio (CST MWS), nous obtenons les courbes de la figure 2.29. L'absorption de ce matériau comporte deux pics, un à 5,525 GHz avec 99,83 % d'absorption pour une épaisseur de $\lambda/170$, et un à 15,95 GHz avec 68,7 % d'absorption pour une épaisseur d'approximativement $\lambda/60$.

Nous avons aussi tracé les différents champs aux fréquences de résonance sur un plan au centre du substrat présenté sur la figure 2.30. Comme dans le cas de l'absorbant à métamatériaux de type patches carrés, différents modes électromagnétiques sont observés. Le mode à la deuxième résonance est particulièrement intéressant car il correspond à un mode transverse électromagnétique.

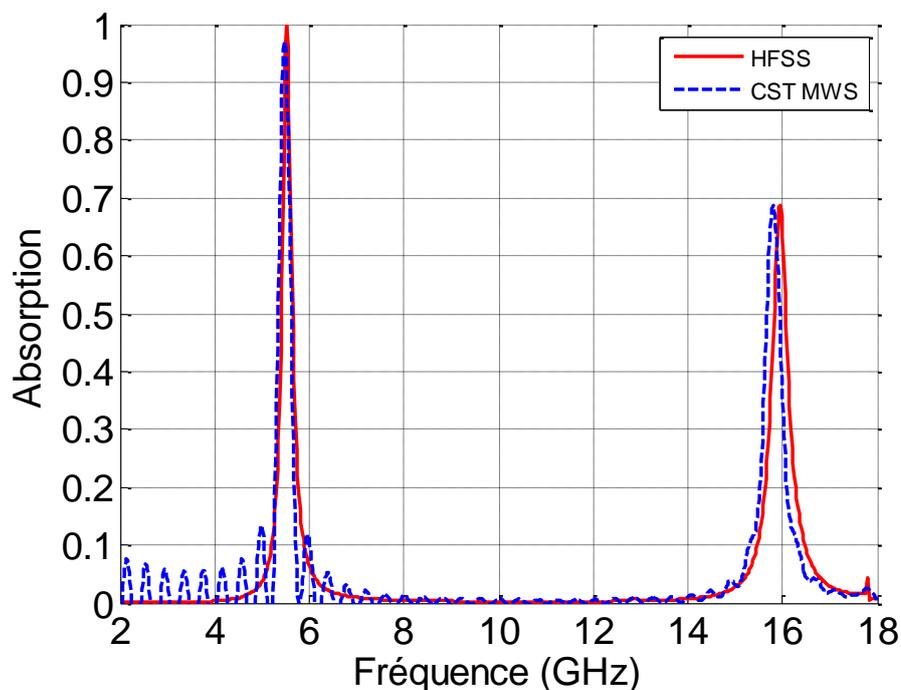


Figure 2.29- Comparaison de la simulation de l'absorption de l'absorbant à métamatériaux de type patches circulaires avec Ansys HFSS et CST Microwave Studio

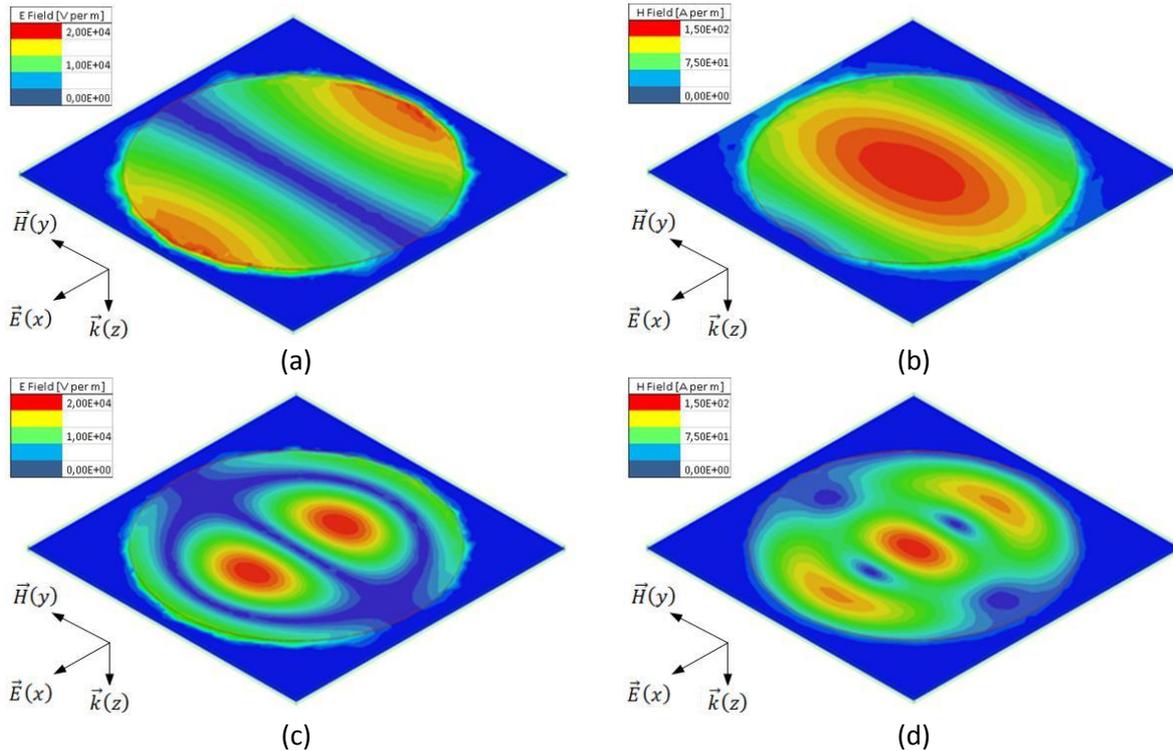


Figure 2.30 - (a) amplitude du champ E à 5,525 GHz, (b) amplitude du champ H à 5,525 GHz, (c) amplitude du champ E à 15,95 GHz, et (d) amplitude du champ H à 15,95 GHz

Pour les deux résonances, l'impédance caractéristique du métamatériau (figure 2.31) tend vers l'impédance du vide, c'est à dire une impédance purement résistive avec la partie réelle qui prend une valeur proche de 377 Ω et l'impédance imaginaire qui est proche de zéro.

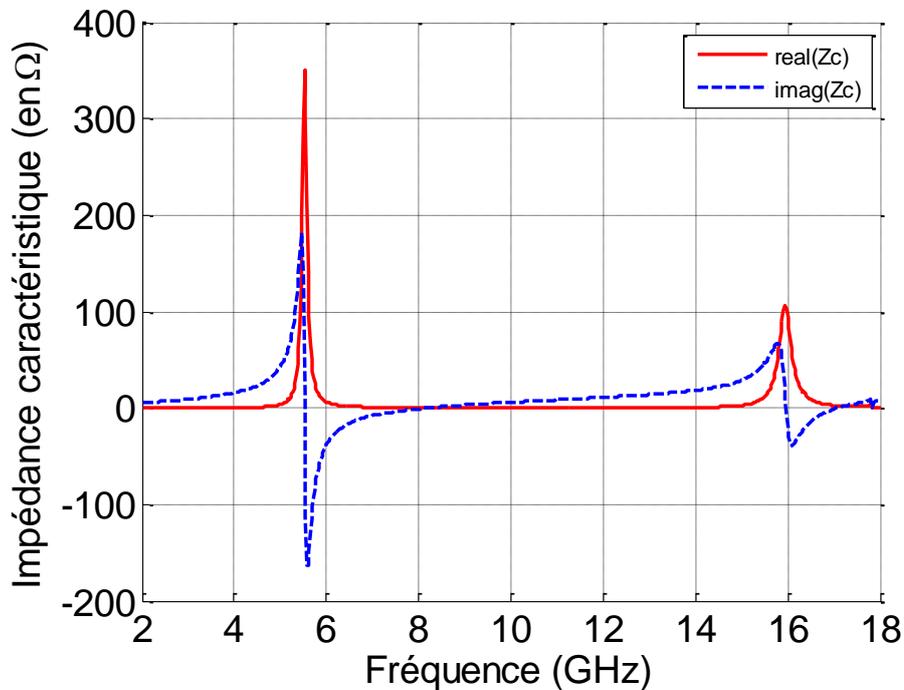


Figure 2.31 - Impédance caractéristique de l'absorbant à métamatériaux de type patches circulaires

b. Conclusion provisoire sur les simulations

Les simulations d'un absorbant à métamatériaux utilisant des patchs circulaires donnent un résultat assez similaire de ce que l'on trouve pour un métamatériau utilisant des patchs carrés. On peut considérer que le fonctionnement est donc identique mais l'étude par des modèles va être légèrement différente. Une chose importante qui diffère est le mode associé au deuxième pic d'absorption. Cette fois-ci, il s'agit d'un mode transverse électromagnétique. Nous décrivons ci-après les différents modèles caractérisant cette autre structure d'absorbant à métamatériaux.

Nous reprenons dans un premier temps le modèle par lignes de transmission qui a été la première méthode que nous avons employée pour définir une fréquence de fonctionnement pour notre absorbant à métamatériaux. Puis dans un second temps, le modèle de cavité est appliqué à cette structure. Ensuite nous parlerons du modèle théorique. Nous finirons par la variation de l'angle d'incidence et de l'angle de polarisation de l'onde incidente.

c. Modèle par lignes de transmission

L'équation⁷⁶ approximative pour déterminer la fréquence du premier pic d'absorption de l'absorbant à métamatériaux de type patchs circulaires est tel que :

$$f_r = \frac{z_0}{2\pi \cdot a \cdot \sqrt{\mu_r \cdot \epsilon_r}} = \frac{z_0 \cdot c_0}{2\pi \cdot a \cdot \sqrt{\mu_r \cdot \epsilon_r}} \pm 5\% \quad (67)$$

Avec a rayon du patch et $z_0 = 1,8412$ premier zéro de la dérivé de la fonction de Bessel $J_1(z)$ d'ordre 1.

On peut déterminer plus précisément la fréquence de la première résonance par les équations suivantes :

$$a_{eff} = a + \Delta a \quad (68)$$

Où :

$$\frac{\Delta a}{h} = 0,412 \cdot \frac{(\epsilon_{reff}+0,3) \cdot \left(\frac{a}{h}+0,264\right)}{(\epsilon_{reff}-0,258) \cdot \left(\frac{a}{h}+0,8\right)} \quad (69)$$

Soit :

$$f_r = \frac{z_0 \cdot c_0}{2\pi \cdot a_{eff} \cdot \sqrt{\mu_r \epsilon_{reff}}} \quad (70)$$

Et :

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r+1}{2} + \frac{\epsilon_r-1}{2} \cdot \left(1 + 12 \cdot \frac{h}{2 \cdot a}\right)^{-1/2} \quad (71)$$

Ce modèle permet d'obtenir facilement la première fréquence de résonance. Dans notre cas, la fréquence calculée est de 5,67 GHz (5,66 GHz avec l'équation approximative), très proche de la fréquence observée en simulation qui est de 5,525 GHz.

Après avoir utilisé ce premier modèle, nous nous sommes tournés vers le modèle de caractérisation des cavités résonantes comme nous l'avons fait précédemment pour les absorbants à métamatériaux à base de patches carrés.

d. Modèle de cavité résonante

Afin de définir les fréquences d'ordre supérieur, nous avons aussi utilisé pour cette structure le modèle issue des cavités, ainsi il faut considérer la figure 2.32.

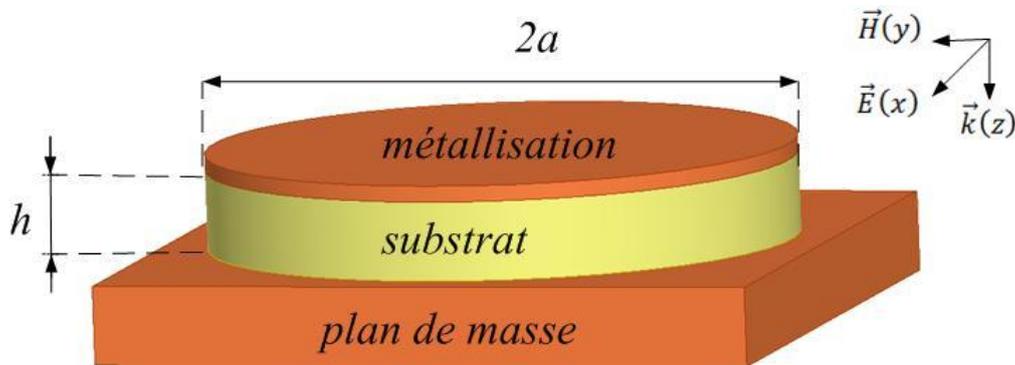


Figure 2.32 - Illustration de l'aspect d'une cavité résonante circulaire

Pour définir les fréquences des différents modes qui vont se créer dans cette cavité, on peut utiliser les formules suivantes, qui est différente selon que le mode est transverse magnétique ou transverse électrique :

_ Modes TM :

$$k_{mnp} = \sqrt{\left(\frac{X_{mn}}{a}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{h}\right)^2} \quad (72)$$

$$f_{mnp} = \frac{c_0}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{X_{mn}}{a}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{h}\right)^2} \quad (73)$$

_ Modes TE :

$$k_{mnp} = \sqrt{\left(\frac{X'_{mn}}{a}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{h}\right)^2} \quad (74)$$

$$f_{mnp} = \frac{c_0}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{X'_{mn}}{a}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{h}\right)^2} \quad (75)$$

Avec m numéro de mode selon la direction du champ E, n numéro de mode selon la direction du champ H et p numéro de mode selon la hauteur du patch. Et où X_{mn} est le $n^{\text{ième}}$ zéro de la $m^{\text{ième}}$ fonction de Bessel et X'_{mn} est le $n^{\text{ième}}$ zéro de la dérivé de la $m^{\text{ième}}$ fonction de Bessel.

A titre indicatif X_{mn} :

m/n	n=1	n=2	n=3	n=4
m=0	2,4048	5,5200	8,6337	11,7915
m=1	3,8317	7,0156	10,1734	13,3237
m=2	5,1356	8,4172	11,6198	14,7960
m=3	6,3801	9,7610	13,0152	16,2235
m=4	7,5883	11,0647	14,3725	17,6160
m=5	8,7114	12,3386	15,7002	18,9801
m=6	9,9361			
m=7	11,0864			

Et X'_{mn} :

m/n	n=1	n=2	n=3	n=4
m=0	3,8317	7,0156	10,1735	13,3237
m=1	1,8412	5,3314	8,5363	11,7060
m=2	3,0542	6,7061	9,9695	13,1704
m=3	4,2012	8,0152	11,3459	14,5858
m=4	5,3175	9,2854	12,6819	15,9641
m=5	6,4156	10,5199	13,9872	17,3128
m=6	7,5013			
m=7	8,5778			

A l'aide de ce modèle et de l'observation des champs sous le patch aux différentes fréquences de résonance, on déduit que le premier mode observé est le mode TE_{110} . Pour ce mode, la fréquence calculée est de 5,66 GHz, proche de la simulation qui est à 5,525 GHz. Le second mode observé est le mode TM_{010} qui a une fréquence de résonance calculée de 16,39 GHz, peu éloignée des 15,95 GHz que l'on observe en simulation (écart de 440 MHz).

Dans les deux modes correspondant aux deux pics d'absorption, le déphasage de l'onde incidente quand elle traverse une cavité circulaire est proche de $\Phi = \pi + 2k\pi$ (avec $k = 1,2,3, \dots$). Il y a donc création d'une interférence destructive qui va supprimer l'onde réfléchie. Pour les autres modes présents sur la plage étudiée en simulation, le déphasage de l'onde n'est pas destructif. Ce sont les modes sombres ("dark modes"). Le modèle de cavité permet de calculer la fréquence de fonctionnement de notre matériau mais pas d'avantage. Afin d'optimiser le fonctionnement de notre absorbant, nous devons utiliser un modèle équivalent de la structure.

e. Modèle théorique

Le modèle théorique pour l'absorbant à métamatériaux de type patchs circulaires est identique à celui utilisant des patchs carrés. Ainsi pour optimiser le fonctionnement de notre structure, nous allons chercher à faire tendre au maximum l'impédance effective Z_{eff} vers l'impédance du vide Z_0 . L'impédance effective est définie comme suit :

$$Z_{eff} = |\beta|^2 \cdot \frac{R+i\omega L}{1-\omega^2 LC+i\omega RC} \quad (76)$$

Pour obtenir une valeur de l'impédance effective proche de l'impédance du vide, il faut que l'amortissement dissipatif $\nu = \frac{R}{2L}$ et l'amortissement radiatif $\gamma = \frac{|\beta|^2}{2cZ_0}$ soit égaux. Pour cela il est possible de jouer sur plusieurs paramètres. Les plus simples à faire varier sont les pertes dans le diélectrique ou l'espacement entre patches car ces deux valeurs vont faire varier respectivement soit l'amortissement dissipatif soit l'amortissement radiatif indépendamment. Il est possible de faire varier les autres paramètres comme l'épaisseur du substrat ou la longueur du patch mais ces valeurs vont faire varier à la fois l'amortissement dissipatif et l'amortissement radiatif (ainsi que la fréquence pour la longueur du patch).

Afin d'illustrer l'application du modèle théorique pour ce type d'absorbant, est présenté ci-après l'optimisation par la variation des pertes diélectrique. Pour cela il nous faut extraire l'amortissement total de simulations réalisées avec Ansys HFSS pour plusieurs valeurs de permittivité imaginaires du diélectrique ($\epsilon'' = \{0,011; 0,088; 0,176\}$) avec la formule :

$$FWHM = 2. \Gamma = 2(\nu + \gamma) \quad (77)$$

Avec $FWHM$ largeur à mi-hauteur de la réflexion de notre structure.

J'utilise Ansys HFSS car je suis plus à l'aise avec l'utilisation de ce logiciel que les autres.

A l'aide de ces valeurs nous allons extrapoler la valeur qu'aurait notre amortissement total pour une permittivité imaginaire nulle ($\epsilon'' = 0$). Ce qui correspond à $\Gamma = \gamma$, l'amortissement dissipatif étant supprimé. Il suffit ensuite de définir ν à la même valeur que γ pour trouver la valeur de la permittivité imaginaire du diélectrique qui donnera une absorption totale. C'est ce qui a été réalisé pour les deux pics d'absorption de notre structure. La figure 2.33 illustre le cas du premier pic d'absorption et la figure 2.34 illustre le cas du second pic d'absorption.

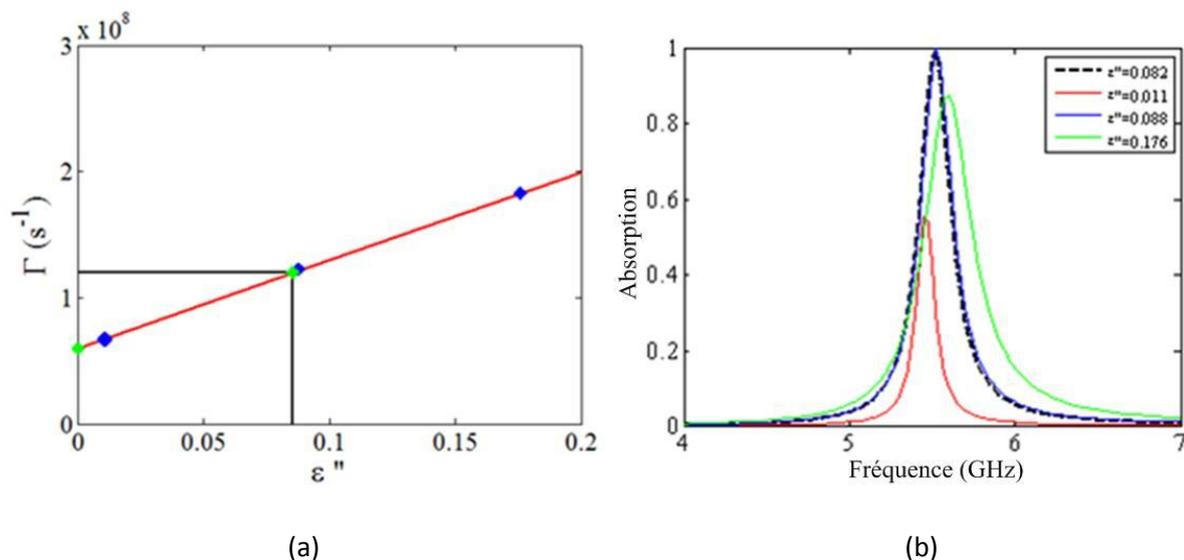


Figure 2.33 - Détermination de l'amortissement nécessaire pour une absorption totale et comparaison de l'absorption à la première résonance pour les différentes valeurs de ϵ'' étudiées sous Ansys HFSS

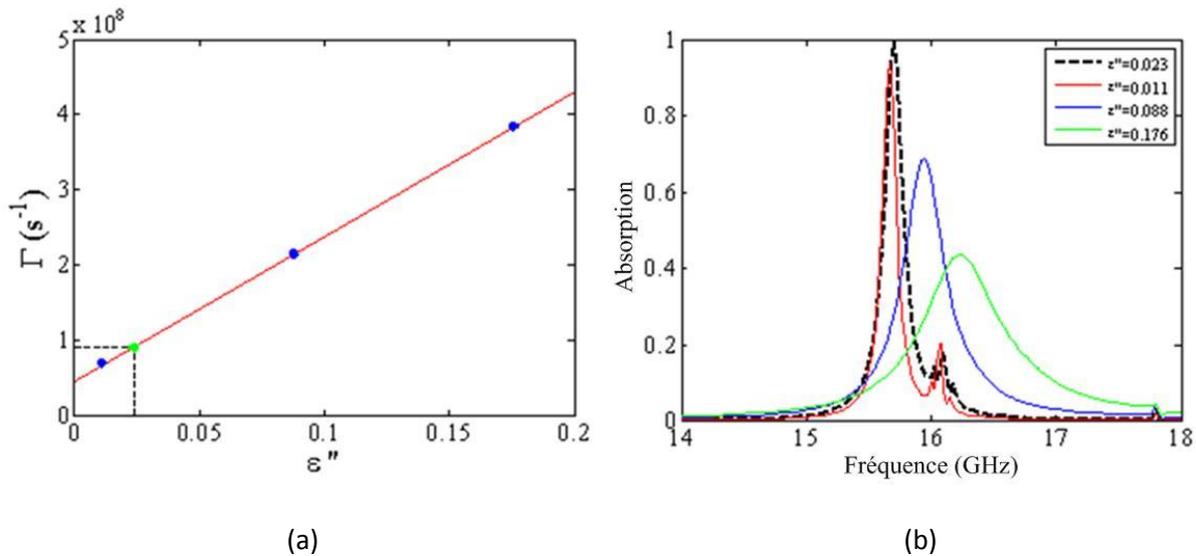


Figure 2.34 - Détermination de l'amortissement nécessaire pour une absorption totale et comparaison de l'absorption à la seconde résonance pour les différentes valeurs de ϵ'' étudiées sous Ansys HFSS

La valeur calculée pour obtenir une absorption totale à la première résonance est de $\epsilon'' = 0,082$ et pour la deuxième résonance de $\epsilon'' = 0,023$. Il est possible après cela d'extraire chacun des paramètres constituant notre équation de l'impédance effective de l'absorbant à métamatériaux avec les formules suivantes :

$$R = \frac{1}{\sigma \cdot h} \quad L = \frac{R}{2 \cdot \nu} \quad C = \frac{1}{L \cdot \omega^2} \quad |\beta|^2 = 2 \cdot \gamma \cdot C \cdot Z_0 \quad (78)$$

Nous obtenons une valeur de $|\beta|^2$ pour la première résonance de $1,2086 \cdot 10^{-7}$ et pour la seconde résonance de $2,9798 \cdot 10^{-8}$. Pour vérifier si nos valeurs sont exactes, on peut calculer l'absorption issue de cette impédance effective. Les valeurs pour le premier pic sont données dans la figure 2.35 et pour le second pic dans la figure 2.36.

Un décalage en fréquence s'observe sur la reconstruction du second pic d'absorption, il vient de la simulation avec Ansys HFSS et de son maillage automatique. Ce type de décalage, nous a conduits par la suite à utiliser COMSOL MultiPhysics pour vérifier nos résultats (non présentés). Ce modèle d'optimisation pour un absorbant à métamatériaux de type patchs circulaires fonctionne très bien. Il permet d'atteindre une absorption totale tout en laissant la liberté de choisir sur quel paramètre jouer.

Nous pouvons ainsi définir la fréquence de fonctionnement de notre absorbant à métamatériaux de type patchs circulaires à l'aide du modèle de cavité et optimiser le fonctionnement afin d'atteindre une absorption totale à l'aide du modèle théorique. Cet absorbant a les mêmes avantages que l'absorbant à métamatériaux comportant des patchs carrés. Pour finir notre étude sur ce type de structure, nous étudions maintenant l'influence du changement d'angle d'incidence et de polarisation de l'onde incidente. L'étude de la variation de l'angle de polarisation est particulièrement importante car c'est le risque de dépendance de la fréquence de fonctionnement en fonction de l'angle de polarisation de l'onde incidente qui nous a poussé à développer les absorbants à métamatériaux de type patchs circulaires.

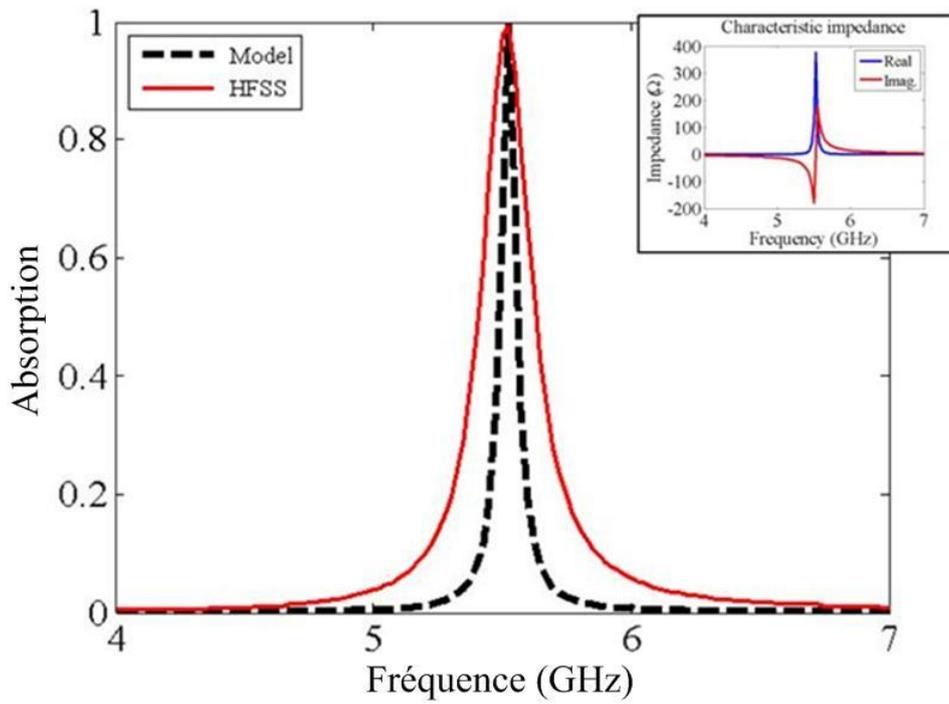


Figure 2.35- Calcul de l'impédance et de l'absorption à partir des paramètres déterminés par le modèle théorique pour la première résonance

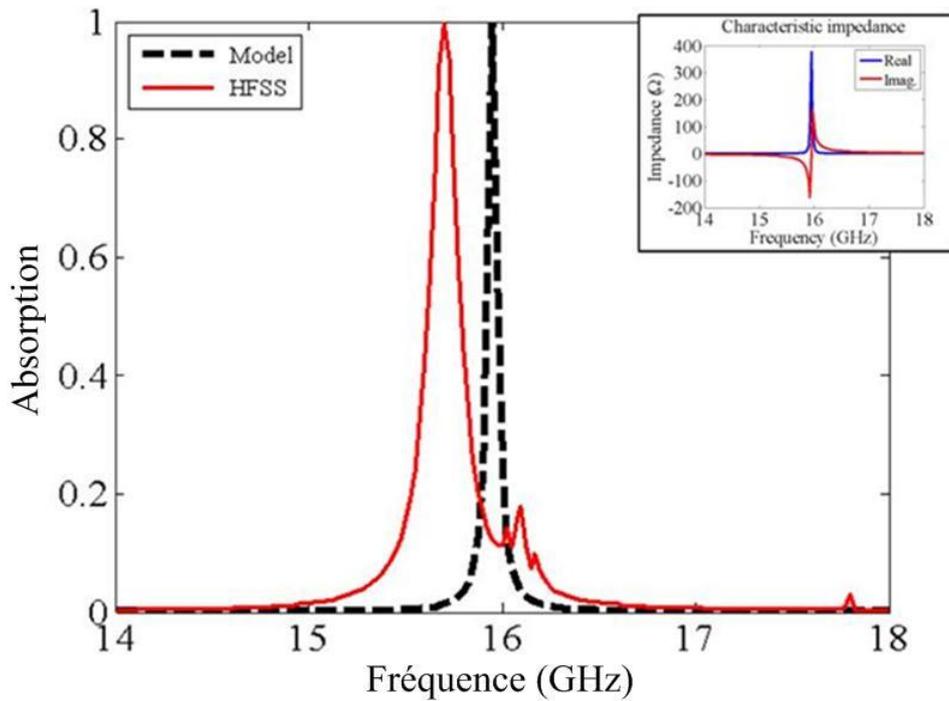


Figure 2.36- Calcul de l'impédance et de l'absorption à partir des paramètres déterminés par le modèle théorique pour la seconde résonance

f. Incidence et polarisation

De la même façon que pour l'absorbant précédent, il faut considérer pour cette étude de la variation de l'angle d'incidence et de l'angle de polarisation de l'onde incidente trois axes selon lesquels nous les faisons varier (figure 2.37).

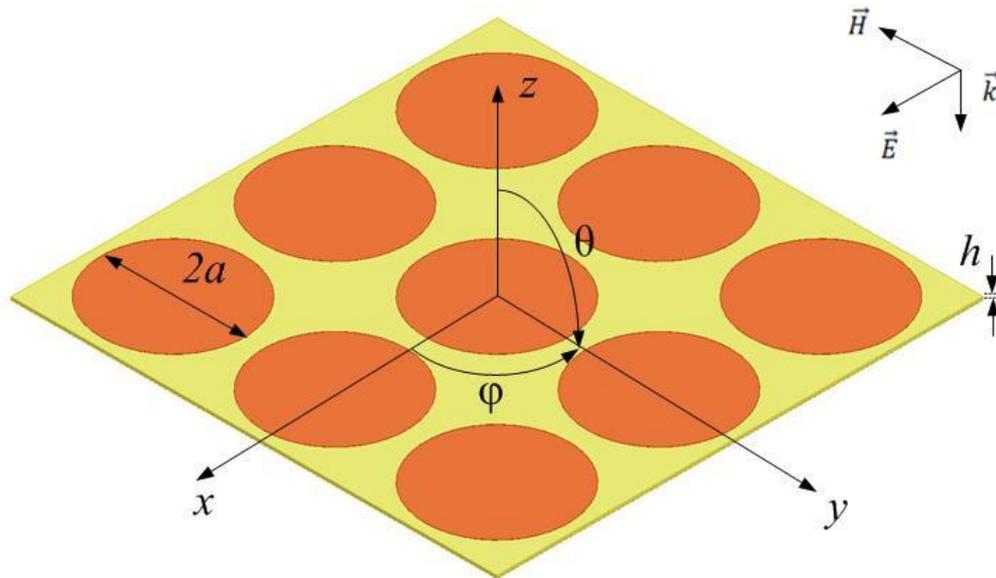


Figure 2.37 - Représentation des axes et des angles de variation pour l'incidence et la polarisation

Le champ E est selon l'axe x pour la variation de l'angle d'incidence. Nous opérons donc une rotation autour de l'axe x et autour de l'axe y pour faire varier les angles d'incidence qui seront notés respectivement variation selon θ_x et selon θ_y . Pour la variation de la polarisation, c'est une rotation autour de l'axe z de l'onde incidente qui est opérée, nommée variation selon φ_z . Les simulations sont réalisées à l'aide d'Ansys HFSS.

En modifiant l'angle d'incidence de l'onde émise selon θ_x (figure 2.38), on peut observer une diminution des performances générales en fonction de l'augmentation de l'angle donné. Aucun décalage en fréquence n'est observé par contre il y a une résurgence partielle de certains modes (TE020 autour de 9,5 GHz et TE030 autour de 12,9 GHz).

Le changement d'angle selon θ_y (figure 2.39) donne un résultat différent de la variation selon θ_x . Les modes sombres sont beaucoup plus excités que précédemment. On observe que le mode fondamental garde de bonnes performances alors que le mode TE110 à 15,95 GHz est fortement dégradé avec l'augmentation de l'angle. Les fréquences des deux pics d'absorption que l'on a en incidence normale ne changent pas.

La modification de polarisation de l'onde incidente (selon φ_z) en simulation ne modifie en rien les fréquences des pics d'absorption. Les niveaux d'absorption ne changent pas non plus alors que la distance entre les patchs selon le champ E évolue avec le changement de polarisation. Nous vérifierons ces résultats à l'aide des mesures réalisées dans le chapitre suivant.

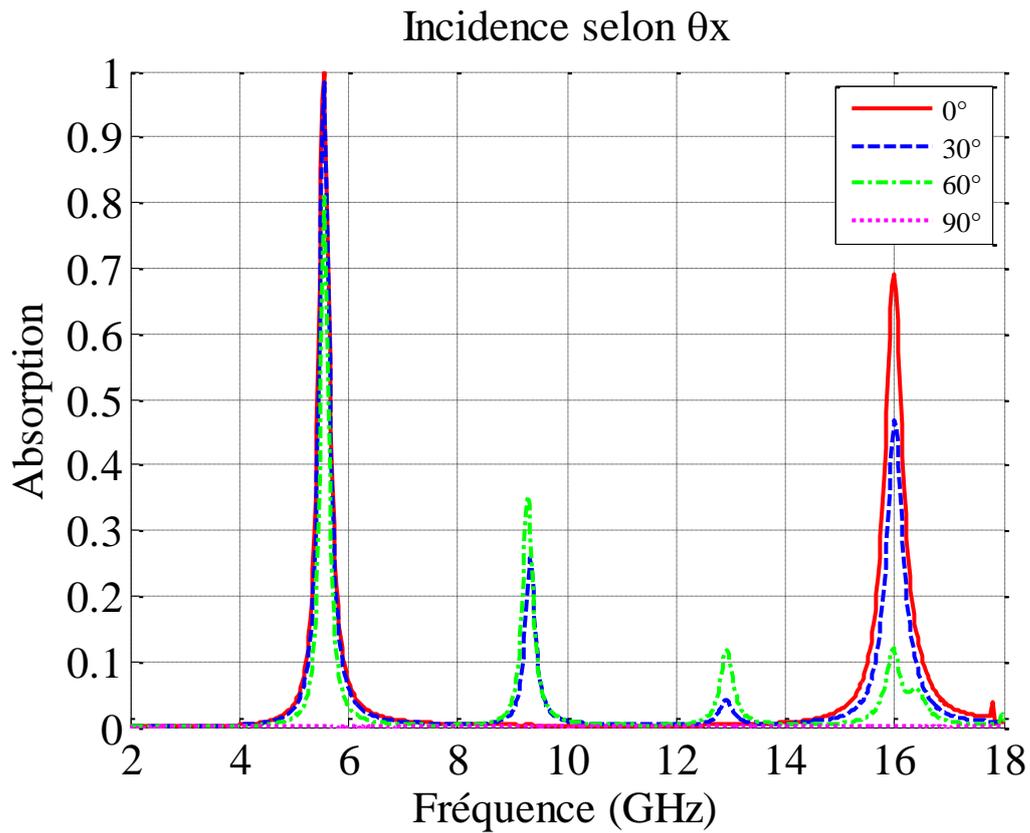


Figure 2.38 - Variation de l'angle d'incidence autour de l'axe x

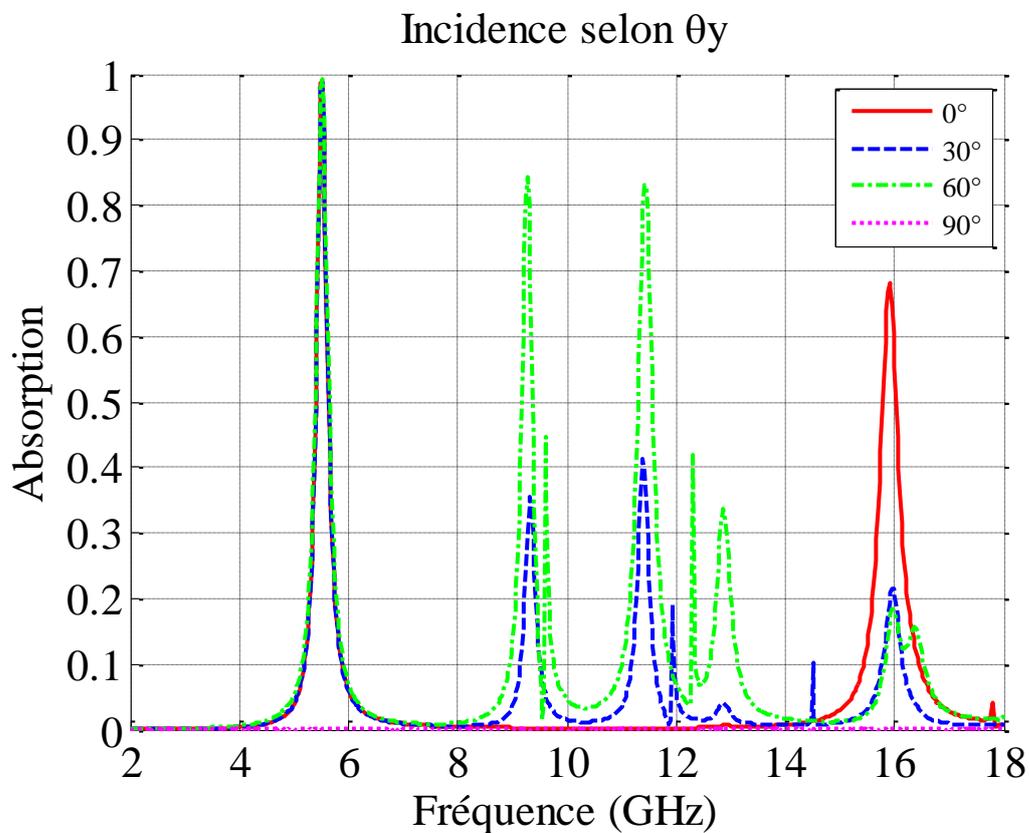


Figure 2.39 - Variation de l'angle d'incidence autour de l'axe y

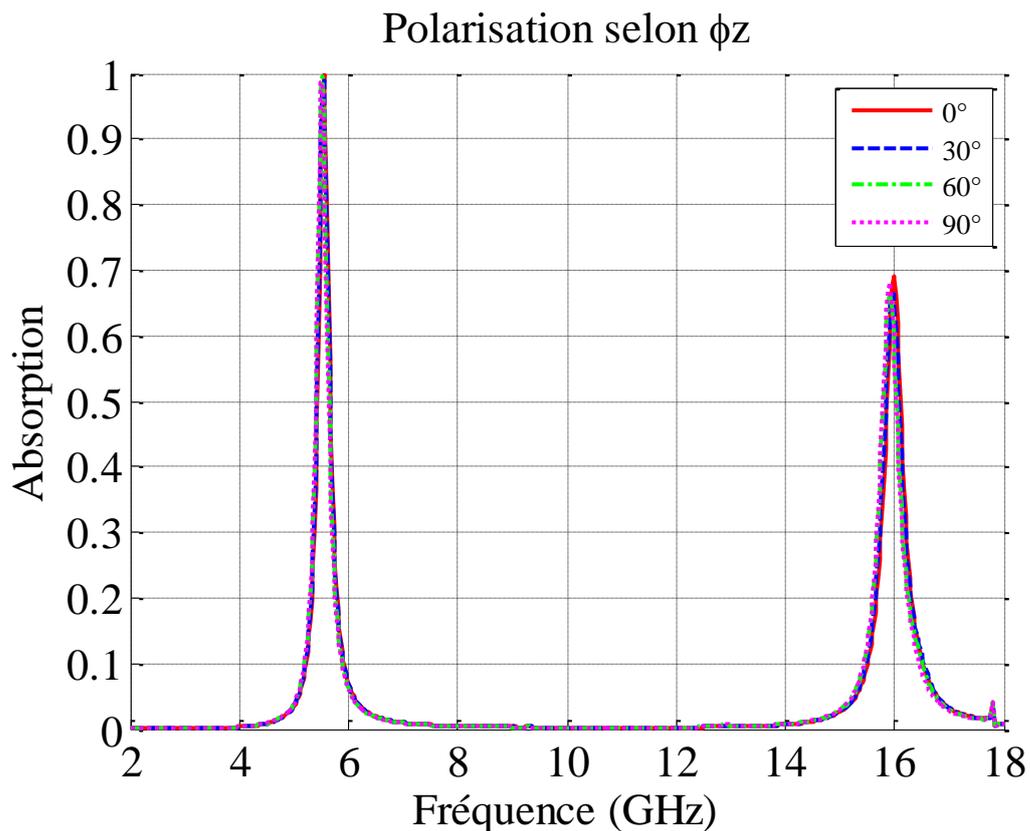


Figure 2.40 - Variation de l'angle de polarisation autour de l'axe z

La modification de polarisation de l'onde incidente (selon ϕ_z) en simulation ne modifie en rien les fréquences des pics d'absorption, sur la figure 2.40. Les niveaux d'absorption ne changent pas non plus alors que la distance entre les patchs évolue avec le changement de polarisation. Nous vérifierons ces résultats à l'aide des mesures réalisées dans le chapitre suivant.

g. Conclusion

Cette nouvelle structure d'absorbant à métamatériaux est très proche de ce que l'on a observé avec l'absorbant à métamatériaux de type patchs carrés. Les modes excités ne sont pas les mêmes dans les deux cas. Nous avons développé cet absorbant car nous avons peur de la dépendance en fréquence de la structure à patchs carrés avec le changement d'angle de polarisation. De la même façon que précédemment, avec cette structure nous pouvons définir les fréquences des différents modes et optimiser les structures pour obtenir une absorption totale. Il est donc possible de façonner un absorbant comme bon nous semble. Cet absorbant à métamatériaux garde les caractéristiques du précédent, à savoir qu'il est facile à fabriquer et d'une épaisseur réduite. Le problème majeur qui se pose encore à nous, est la bande très étroite de ce type de matériau. Nous proposons donc des optimisations pour la bande passante dans la suite de ce chapitre. Avant cela, nous avons étudié brièvement des absorbants à métamatériaux fabriqués à partir des matériaux présentés auxquels nous avons appliqués le principe de Babinet.

3. Application du principe de Babinet : absorbant à métamatériaux de type creux carrés

a. Simulations

Après avoir développé les absorbants à métamatériaux de type patchs carrés et patchs circulaires, nous avons cherché d'autres types d'absorbants à métamatériaux. La première autre structure que nous avons développée est le conjugué du patch carré, à savoir le creux carré. La structure qui est présentée ci-après a demandé beaucoup de temps d'optimisation pour obtenir une absorption suffisante. L'épaisseur du substrat est beaucoup plus importante que précédemment. Nous avons obtenu pour la structure unité de la figure 2.41 dont la vue en coupe est présentée figure 2.42.

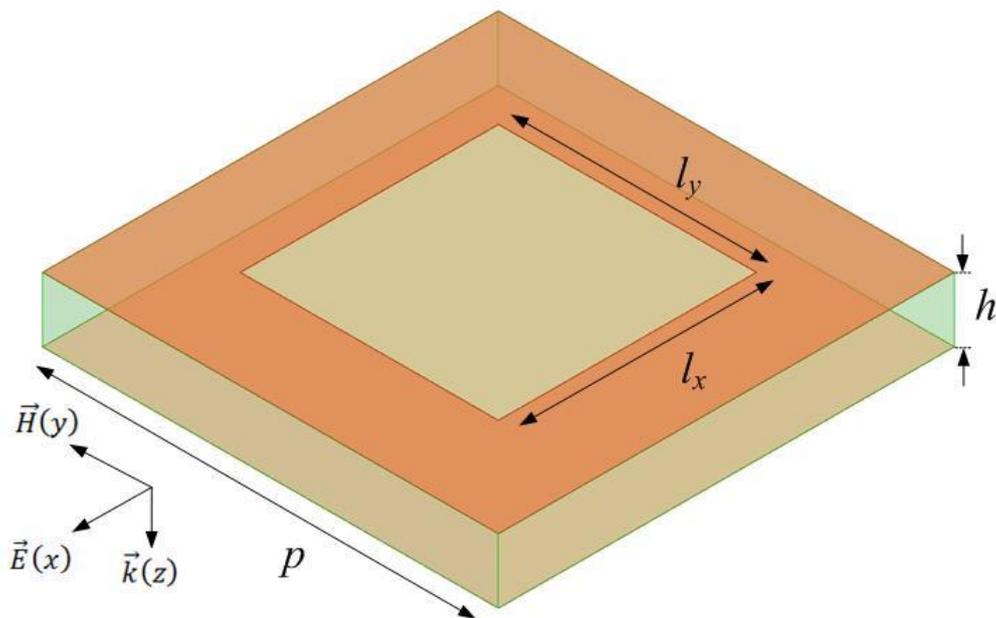


Figure 2.41 - Modélisation 3D d'une cellule unité d'un absorbant à métamatériaux de type creux carrés

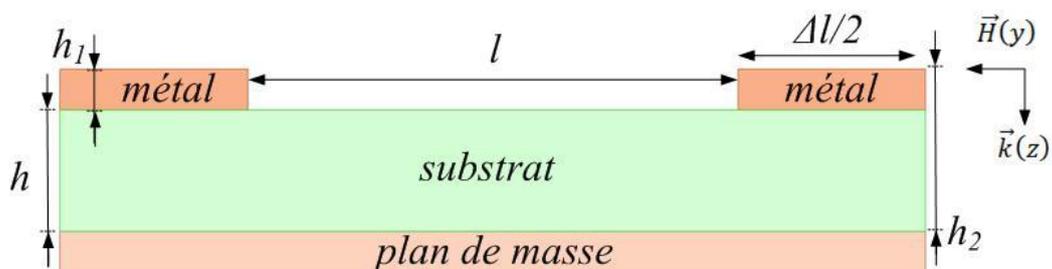


Figure 2.42 - Vue en coupe d'une cellule unité d'un absorbant à métamatériaux de type creux carrés

Les dimensions de cette structure unité sont dans le tableau suivant :

h_1	17 μm
h_2	3,017 mm
h	3 mm
l (creux carré, $l_x=l_y$)	12 mm
Δl	9,2 mm
p	21,2 mm

Le substrat utilisé est comme pour les structures précédentes en époxy FR4 et la métallisation est en cuivre. La simulation a été réalisée à l'aide Ansys HFSS.

Lorsque l'on extrait l'absorption de cette structure (figure 2.43), on observe clairement un nombre très important de résonances, et en particulier l'apparition de bandes d'absorption entre 14,5 GHz et 15,5 GHz. L'absorption est très importante pour les deux premiers pics d'absorption, à 6,75 GHz et à 9,4 GHz, elle est de l'ordre de 99 %. Malheureusement, ce type de structure demande une épaisseur importante pour fonctionner donc l'intérêt est moindre par rapport aux structures précédentes. L'épaisseur du matériau est de l'ordre de $\lambda/14$ si l'on considère la première résonance présentant une absorption (à 6,75 GHz). Cette structure a une épaisseur proche de ce que l'on peut trouver avec des absorbants comportant des circuits analogique type FSS (fréquence basse autour de $\lambda/(4.n)$) mais plus épais que ce que l'on a avec un absorbant magnétique. Nous n'avons pas poussé plus loin l'étude de ces absorbants à métamatériaux pour cette raison. Par contre, il reste un intérêt pour cette structure : elle emploie des matériaux courants.

Les cartes de champs au centre du substrat pour les deux premiers pics d'absorption sont présentées dans la figure 2.44. Nous avons ici plus de mal à discerner les modes qui se forment dans la structure, la lecture du fonctionnement est moins claire qu'avec les structures précédentes. Néanmoins, le phénomène semble être le même, il y a une interférence destructive qui donnera une réflexion nulle.

Il est possible de tracer l'impédance caractéristique de la structure (figure 2.45). Comme c'est le cas pour les absorbants à métamatériaux de type patches carrés, l'impédance caractéristique à la résonance tend vers l'impédance du vide. Pour les impédances aux fréquences correspondant aux deux premiers pics d'absorption, c'est particulièrement le cas. C'est ce que l'on observe quand on a une absorption quasi totale. Pour les autres, l'impédance réelle est soit trop grande soit trop petite et l'impédance imaginaire est loin de tendre vers zéro. Néanmoins, il s'agit bien du même type de fonctionnement que les structures précédentes mais avec l'inconvénient que ces structures sont très épaisses. Nous ne sommes pas allés plus loin dans le développement de ces structures et sur leur mode de fonctionnement.

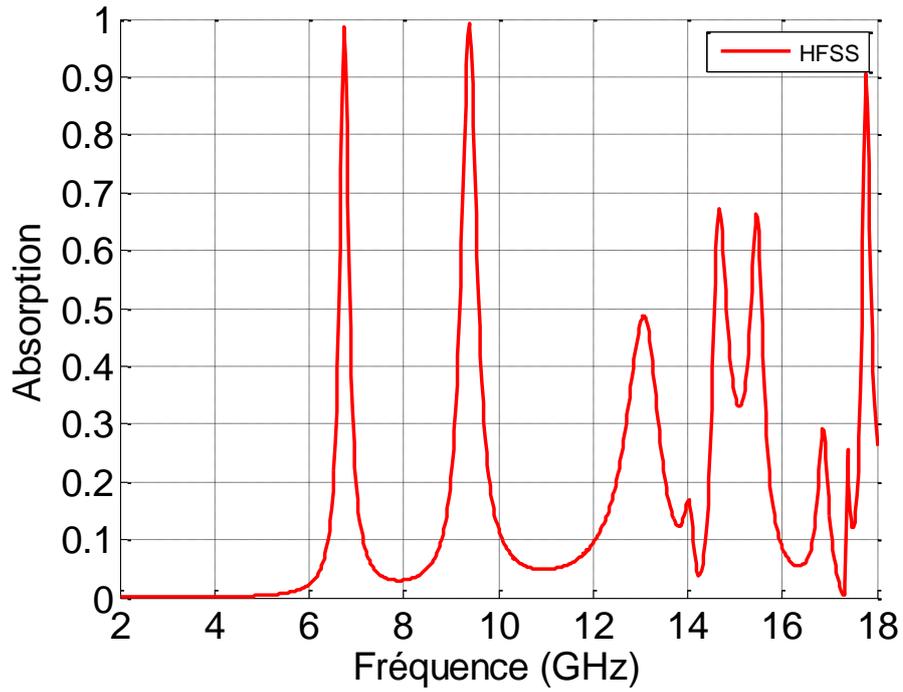


Figure 2.43 - Simulation de l'absorption de l'absorbant à métamatériaux de type creux carrés avec Ansys HFSS

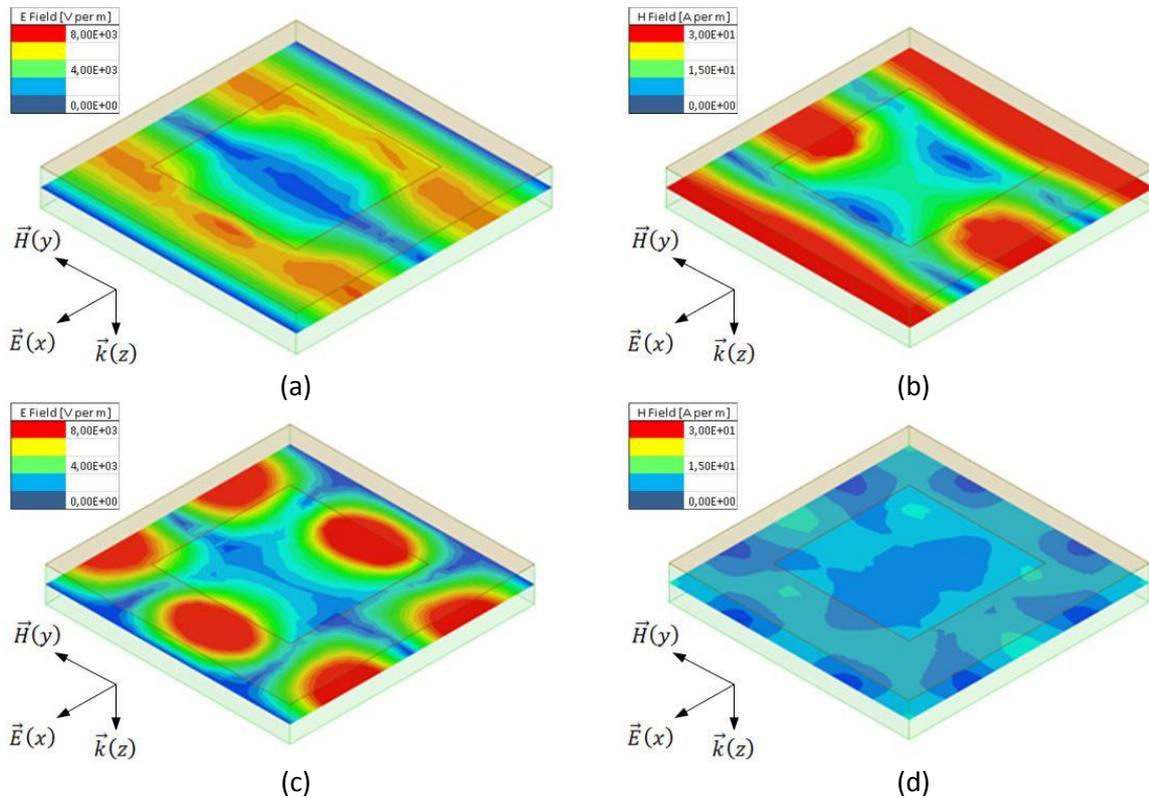


Figure 2.44 - (a) amplitude du champ E à 6,75 GHz, (b) amplitude du champ H à 6,75 GHz, (c) amplitude du champ E à 9,4 GHz, et (d) amplitude du champ H à 9,4 GHz

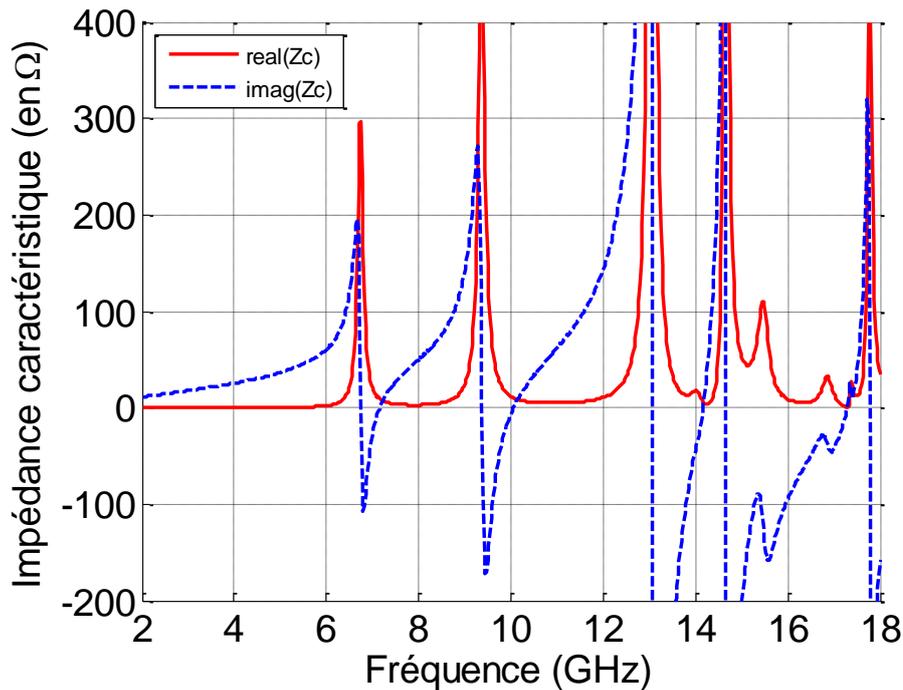


Figure 2.45 - Impédance caractéristique de l'absorbant à métamatériaux de type creux carrés

b. Conclusion sur les simulations

Nous avons cherché à appliquer le principe de Babinet sur les absorbants à métamatériaux de type patches carrés afin d'obtenir d'autres métamatériaux absorbants avec succès. Néanmoins, ces structures présentent l'inconvénient principale d'être épaisses (de l'ordre de dix fois supérieur) par rapport aux absorbants à métamatériaux déjà évoqués dans ce manuscrit de thèse. Nous n'avons pas développé d'avantage cette structure mais elle peut être une piste pour la réalisation d'absorbants spécifiques à certaines applications. Dans la même démarche de trouver d'autres structures d'absorbants à métamatériaux, nous avons appliqué le principe de Babinet aux absorbants constitués de patches circulaires.

4. Application du principe de Babinet : absorbant à métamatériaux de type creux circulaires

a. Simulations

Après avoir appliqué le principe de Babinet aux absorbants à métamatériaux de type patches carrés, nous l'avons appliqué aux patches circulaires. Le fonctionnement devrait être typiquement le même mais quelques divergences apparaissent. Elles vont être présentées ci-après. Comme précédemment le développement d'une structure unité avec une absorption suffisante pour être intéressante a pris un temps important d'optimisation. La figure 2.46 présente la structure unité et la figure 2.47 la vue en coupe.

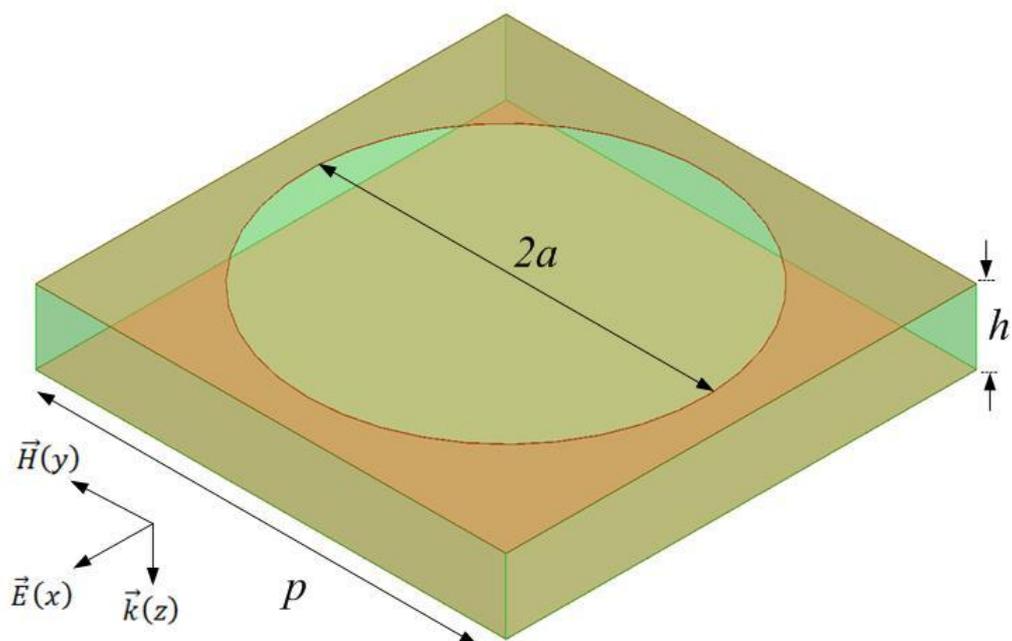


Figure 2.46 - Modélisation 3D d'une cellule unité d'un absorbant à métamatériaux de type creux circulaires

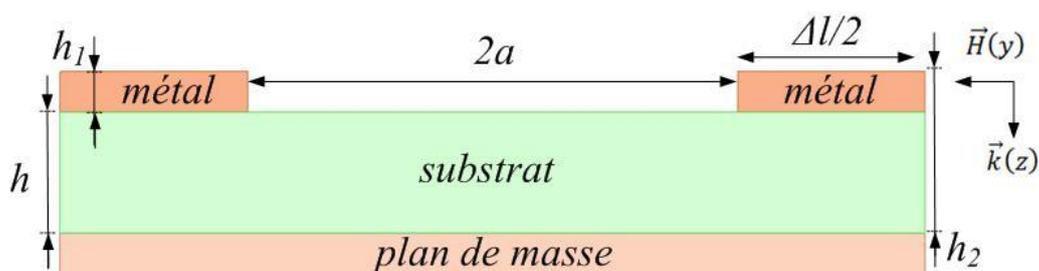


Figure 2.47 - Vue en coupe d'une cellule unité d'un absorbant à métamatériaux de type creux circulaires

L'ensemble des dimensions de la structure unité est présenté dans le tableau suivant :

h_1	17 μm
h_2	3,017 mm
h	3 mm
a	8 mm
Δl	3 mm
p	19 mm

Le substrat utilisé est de l'époxy FR4 et la métallisation est en cuivre. Comme pour l'absorbant à métamatériaux de type creux carrés le substrat est très épais et constitue le principal inconvénient de cet absorbant.

La simulation avec Ansys HFSS donne l'absorption de la figure 2.48. Cette structure présente moins de résonances que l'absorbant à métamatériaux de type creux carrés sur la bande étudiée. Mais il y a bien absorption de l'onde. Cette structure donne trois pics d'absorption très importants avec un espacement régulier. Le premier pic est à 7,9 GHz, ce qui fait une épaisseur de $\lambda/13$ à la résonance pour une absorption de 98 %. Le second pic d'absorption est à 12,3 GHz pour un peu plus de 99 % d'absorption et le dernier pic est à 16 GHz pour 83 % d'absorption.

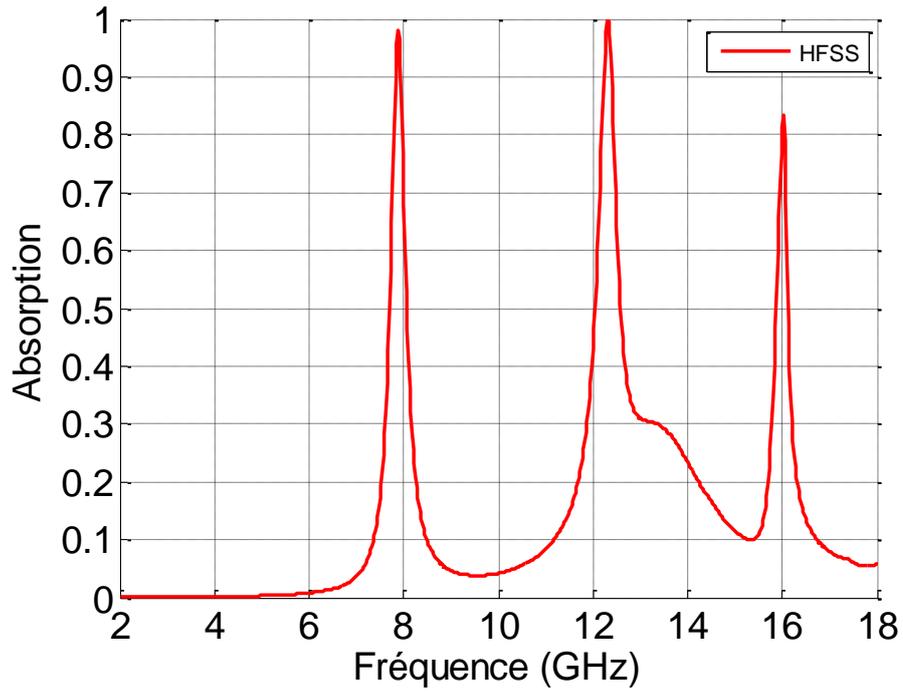


Figure 2.48- Simulation de l'absorption de l'absorbant à métamatériaux de type creux circulaires avec Ansys HFSS

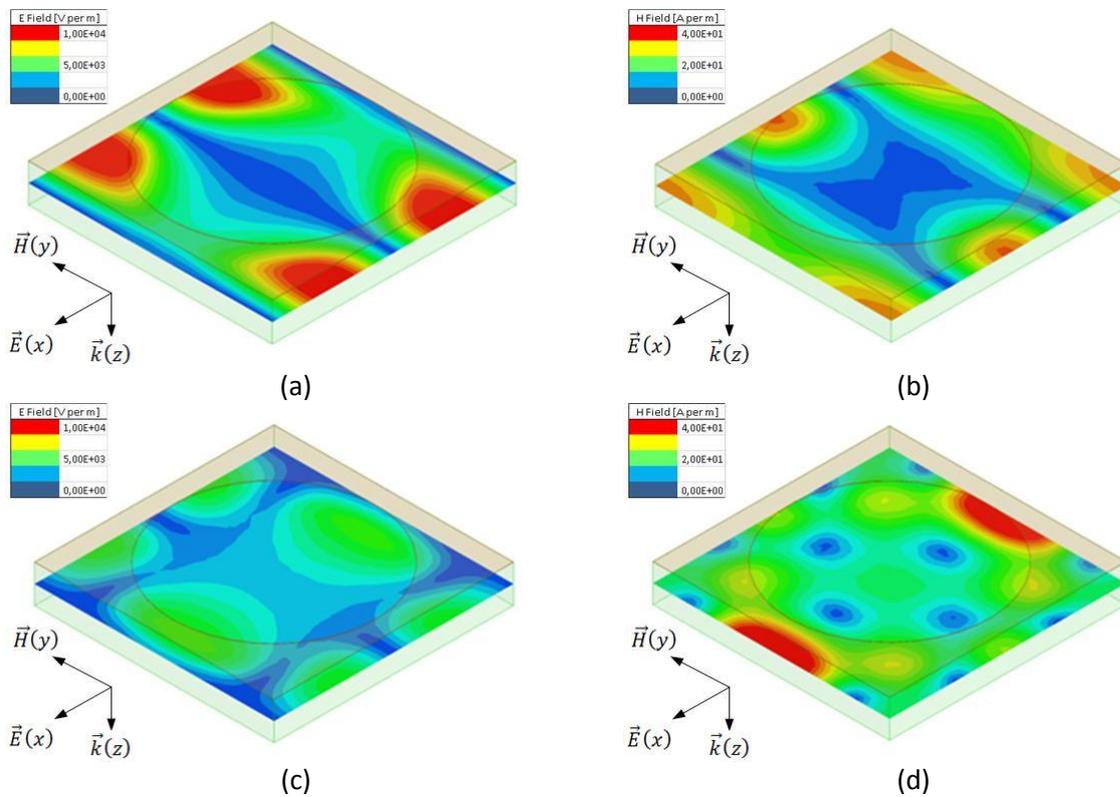


Figure 2.49- (a) amplitude du champ E à 7,9 GHz, (b) amplitude du champ H à 7,9 GHz, (c) amplitude du champ E à 12,3 GHz, et (d) amplitude du champ H à 12,3 GHz

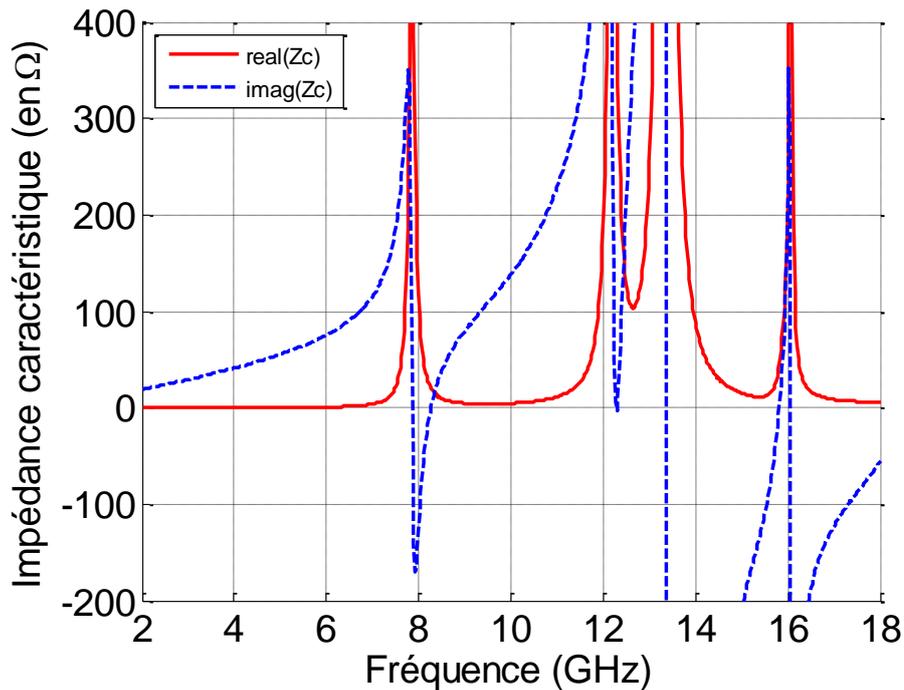


Figure 2.50 - Impédance caractéristique de l'absorbant à métamatériaux de type creux circulaires

Les cartes de champs pour les deux premiers pics d'absorption sont encore une fois assez dures à interpréter (figure 2.49). Il est difficile de dire quel mode est excité et dans quelle partie de la structure. Néanmoins, il est certain que les diagrammes de champs n'ont rien à voir avec ceux observés pour la structure composée de patches circulaires dont est issue cette structure. Si l'on trace l'impédance caractéristique de l'absorbant, on obtient le résultat de la figure 2.50.

L'impédance caractéristique a la même allure que les impédances précédemment observées, à savoir que l'impédance réelle tend vers l'impédance du vide, 377 Ohms, et l'impédance imaginaire tend vers zéro à la résonance. Il est intéressant de remarquer qu'aux alentours de 13,5 GHz, un autre mode est excité mais l'impédance est trop éloignée de l'impédance du vide pour que l'onde incidente pénètre suffisamment dans la structure. Les performances générales de cet absorbant à métamatériaux sont bonnes mais son épaisseur importante est un problème pour pouvoir continuer à travailler dessus.

b. Conclusion sur les simulations

L'application du principe de Babinet permet d'obtenir de nouveaux absorbants à métamatériaux mais demande une optimisation des paramètres géométriques pour obtenir une absorption suffisante pour être exploitée. L'optimisation des paramètres géométriques passe par l'augmentation de l'épaisseur du substrat et c'est le problème avec ce type de structure. Nous perdons l'un des paramètres recherché qui est la finesse du matériau. Cet absorbant fonctionne bien et utilise des matériaux courants (cuivre/FR4) mais nous n'avons pas continué à développer ce type de structure. Nous préférons nous tourner vers les absorbants à métamatériaux de types patches carrés ou circulaires dont nous allons chercher à optimiser la bande passante.

5. Conclusion intermédiaire sur les premières structures

Les absorbants à métamatériaux de types patchs carrés et patchs circulaires sont la base pour les travaux qui vont suivre. Le développement et la compréhension du fonctionnement de ces premières structures a pris une part importante du temps de recherche durant ma thèse. Les tailles et les fréquences employées pour les structures présentées ne sont pas choisies au hasard car elles prennent place dans la rédaction de publications afin d'obtenir une présentation claire des résultats mais sans chercher à les classer par ordre de performance. Les absorbants à métamatériaux de type creux carrés et creux circulaires n'ont pas été utilisés par la suite mais restent des absorbants pouvant être utilisés pour la réalisation de projets spécifiques, par exemple un absorbant dont tous les motifs doivent être reliés. L'ensemble des absorptions présentées précédemment est rappelé dans la figure 2.51.

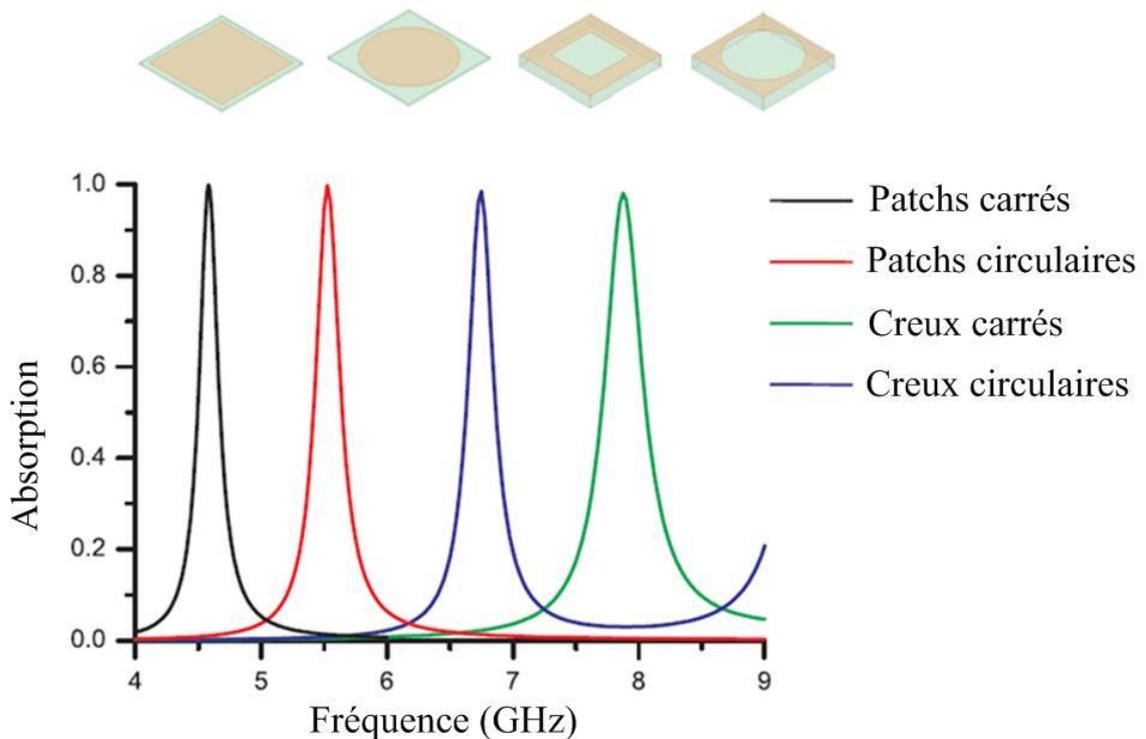


Figure 2.51 - Rappel de l'absorption des différents types d'absorbants présentés

III. Optimisation de la bande de fonctionnement

Les structures de base des métamatériaux absorbants proposés précédemment ont un fonctionnement proche de ce qui est observé pour des absorbants résonnants. Nous nous sommes penchés sur l'optimisation la plus simple qui y est apportée, c'est à dire l'empilement de structure, comme c'est le cas avec les couches de Jaumann qui sont un empilement d'écrans de Salisbury.

Nous nous sommes également intéressés à une optimisation utilisée dans les absorbants comportant des circuits analogiques qui est la juxtaposition de circuits différents les uns à côté des

autres afin d'obtenir simultanément différentes bandes de fonctionnement correspondant aux différents circuits. Ces deux types d'optimisations ont pour but d'élargir la bande de fonctionnement de l'absorbant. Commençons par l'empilement de structures.

1. Optimisation par empilement

a. Simulations

En s'inspirant des travaux sur les couches de Jaumann, nous avons cherché à empiler plusieurs de nos structures de base. Le but est d'obtenir plusieurs pics d'absorption assez proches pour qu'ils puissent former une petite bande d'absorption. A travers nos nombreuses simulations, nous nous sommes aperçus qu'il est possible d'empiler de nombreuses structures. Il faut respecter un certain ordre afin d'obtenir un fonctionnement optimal. Pour les structures constituées de patches, la logique veut que l'on mette les patches les plus petites au dessus des patches les plus grands afin que l'onde incidente éclaire l'ensemble des patches présents. Pour les structures constituées de creux, ce sont les creux les plus grands qui doivent être placés au dessus des creux les plus petits afin que l'onde incidente éclaire également l'ensemble des motifs.

En empilant des écrans de Salisbury de même taille, on renforce l'absorption à la fréquence ciblée. Ce que décrivent très bien les études sur les couches de Jaumann. Néanmoins, ce qui nous intéresse avant tout c'est de pouvoir cibler différentes fréquences assez proches. Afin de bien mettre en évidence l'intérêt de ce type d'optimisation, voici un exemple de simulation qui donne une bonne idée de ce qu'il est possible de réaliser à l'aide de cette méthode d'optimisation. Il faut considérer une cellule unité tel que dans la figure 2.52, qui a une vue en coupe telle que la figure 2.53.

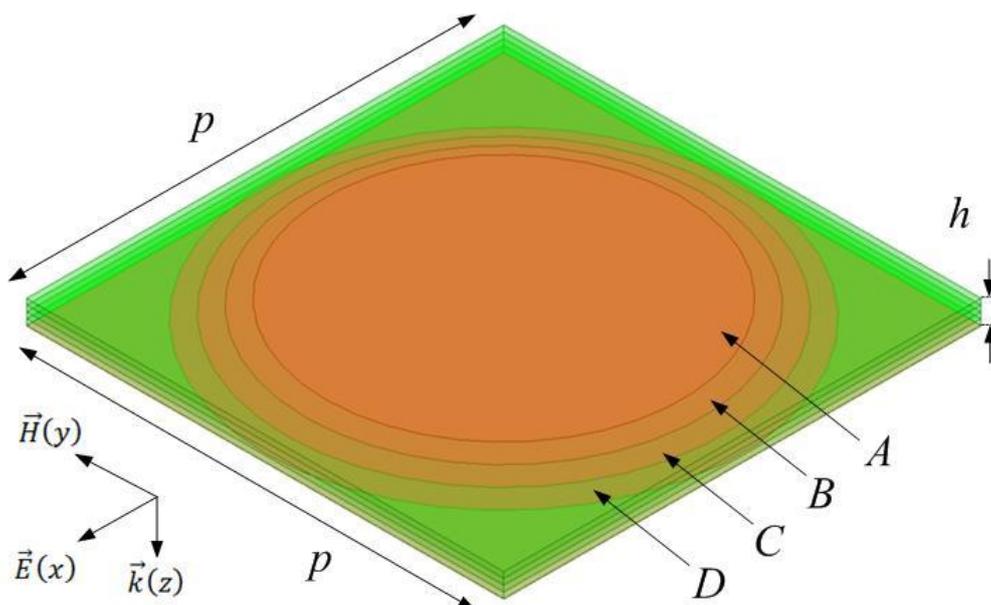


Figure 2.52- Modélisation 3D d'une cellule unité d'un absorbant à métamatériaux de type patches circulaires constituée de plusieurs épaisseurs

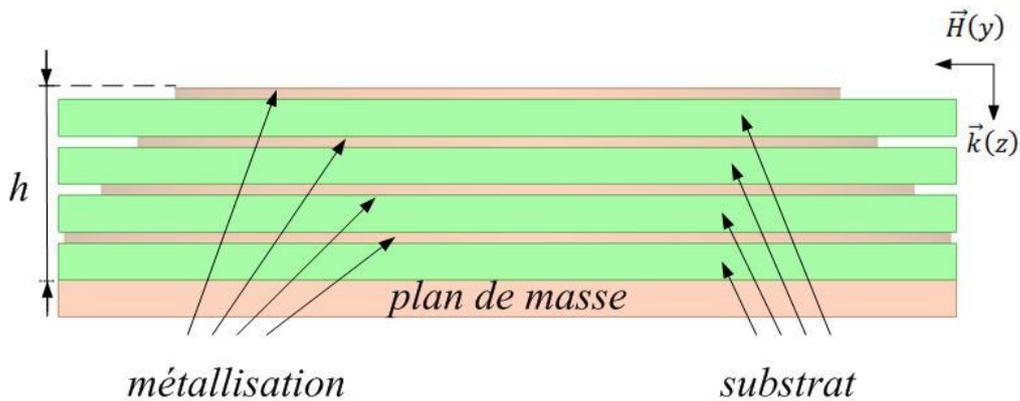


Figure 2.53 - Vue en coupe d'une cellule unité d'un absorbant à matamat riaux de type patches circulaires constituée de plusieurs épaisseurs

Les dimensions de la structure sont dans le tableau suivant :

h	1,268 mm
p	24,2 mm
Rayon A	9 mm
Rayon B	10 mm
Rayon C	11 mm
Rayon D	12 mm

Les patches de 17 μm d'épaisseurs en cuivre sont situés au centre de la structure unité et espacés en hauteur des substrats d'époxy FR4 de 0,3 mm. Les matériaux utilisés sont les mêmes que précédemment. Les épaisseurs de substrats ont été choisies pour avoir la même épaisseur que pour l'absorbant à base de patches.

La simulation de cette structure à l'aide d'Ansys HFSS donne l'absorption de la figure 2.54. On peut observer que cette structure présente un nombre important de pic d'absorption et notamment quatre pics autour de 4GHz très proches. Les quatre premières résonances se situent à 3,35 GHz, 3,7 GHz, 4,05 GHz et 4,55 GHz. L'épaisseur de la structure complète   la première résonance correspond à $\lambda/70$. En approchant un peu plus ces pics d'absorption, il est possible de créer une bande d'absorption, et pour cela il faut rapprocher en taille les différents patches. Il est également possible de créer un empilement ciblant précisément différentes fréquences éloignées. Le problème de l'empilement est que plus on souhaite avoir de pics d'absorption est plus on aura une structure épaisse. Donc plus la structure aura une large bande de fonctionnement et moins la structure sera intéressante au niveau de son épaisseur.

Aussi, lors de la conception, les patches sont alignés entre eux afin de ne pas masquer celui qui est en dessous. Il n'est donc pas possible de modifier l'espacement entre patches sur le même plan sans dégrader les performances de l'ensemble de la structure. Si l'on souhaite ajuster une résonance pour qu'elle atteigne une absorption totale, il vaut mieux jouer sur l'épaisseur du substrat sur lequel est posé le patch lié à cette résonance.

L'impédance de cette structure (figure 2.55) présente différentes résonances issues des différents patches avec une impédance qui devient purement résistive à chaque résonance et tend vers l'impédance du vide. Chaque patch apporte donc sa contribution à l'ensemble de la structure.

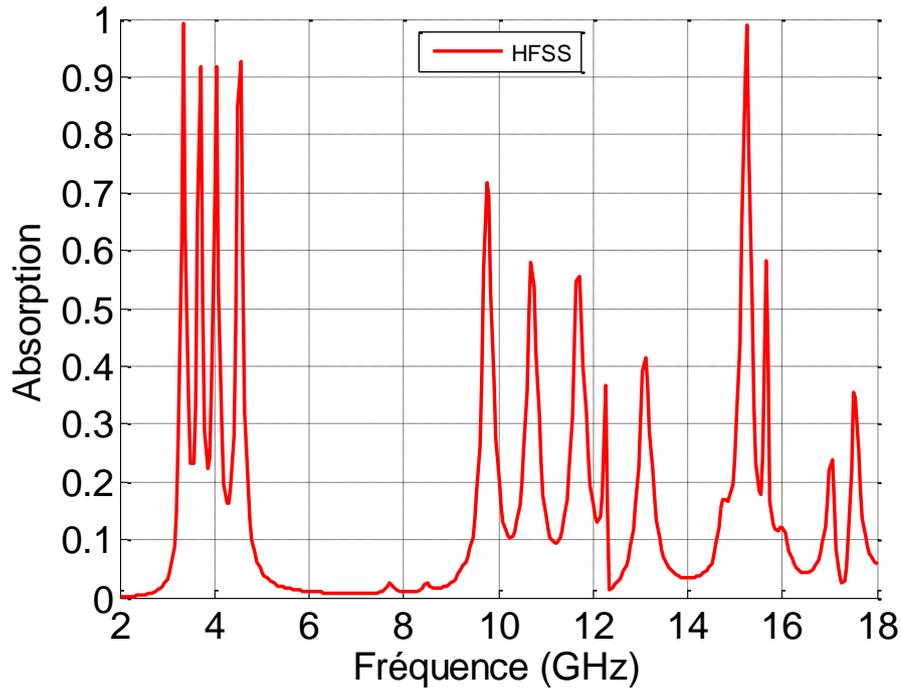


Figure 2.54 - Simulation de l'absorption de l'absorbant à métamatériaux de type patches circulaires constitué de plusieurs épaisseurs avec Ansys HFSS

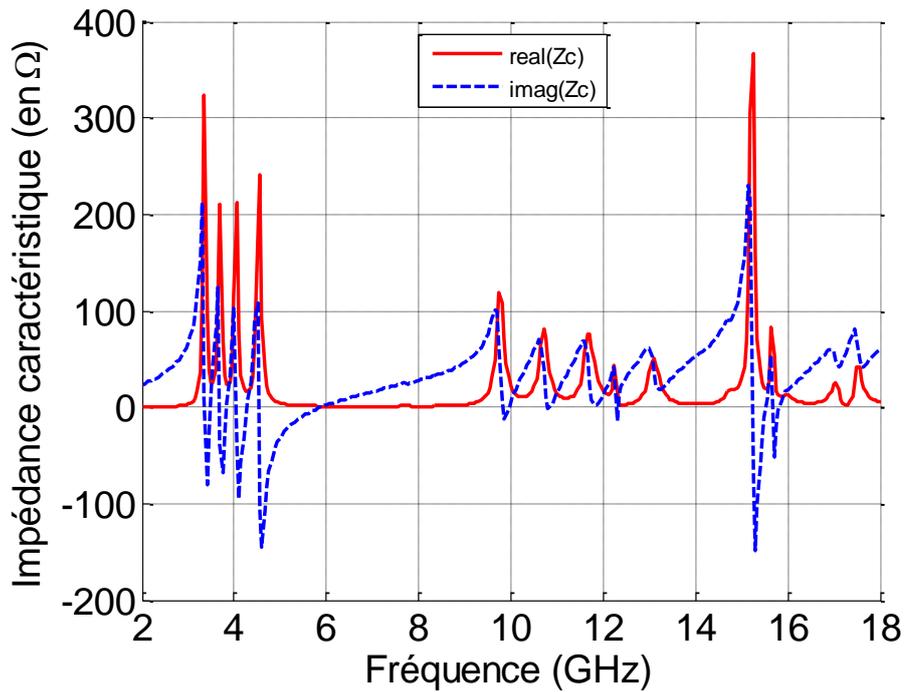


Figure 2.55 - Impédance caractéristique de l'absorbant à métamatériaux de type patches circulaires constitué de plusieurs épaisseurs

b. Conclusion sur l'optimisation par empilement

Cette méthode d'optimisation de la bande de fonctionnement est intéressante et fonctionne comme prédit par l'analogie aux couches de Jaumann : l'empilement de plusieurs structures ciblant

différentes fréquences donne une unique structure capable de couvrir l'ensemble des fréquences des structures seules. Cette méthode d'optimisation présente comme avantage sa simplicité de mise en œuvre mais a pour inconvénient l'épaisseur importante que peut avoir la structure pour couvrir une large bande d'absorption et l'obligation d'aligner les patchs quand ils sont superposés. Une autre méthode d'optimisation est possible, elle consiste à placer les différents patchs sur le même substrat.

2. Optimisation par juxtaposition

Nous ne nous sommes pas arrêtés sur la seule optimisation consistant à empiler les structures. Nous avons cherchés d'autres méthodes d'optimisation de la bande de fonctionnement et la seconde méthode vient des absorbants comportant des circuits analogiques, qui sont également résonants. Il s'agit de la juxtaposition de motif. Cette méthode est plus complexe à mettre en œuvre que l'empilement car la disposition de patchs de tailles différentes sur le même plan va impliquer un espacement entre patch non homogène. Nous allons étudier deux exemples afin de bien comprendre le phénomène.

a. Première simulation

Tout d'abord, nous allons étudier une structure représentative des défauts inhérents à ce type d'optimisation. Cette structure est assez simple et est développée pour un fonctionnement sous un seul angle de polarisation de l'onde incidente. La structure unité est présentée sur la figure 2.56.

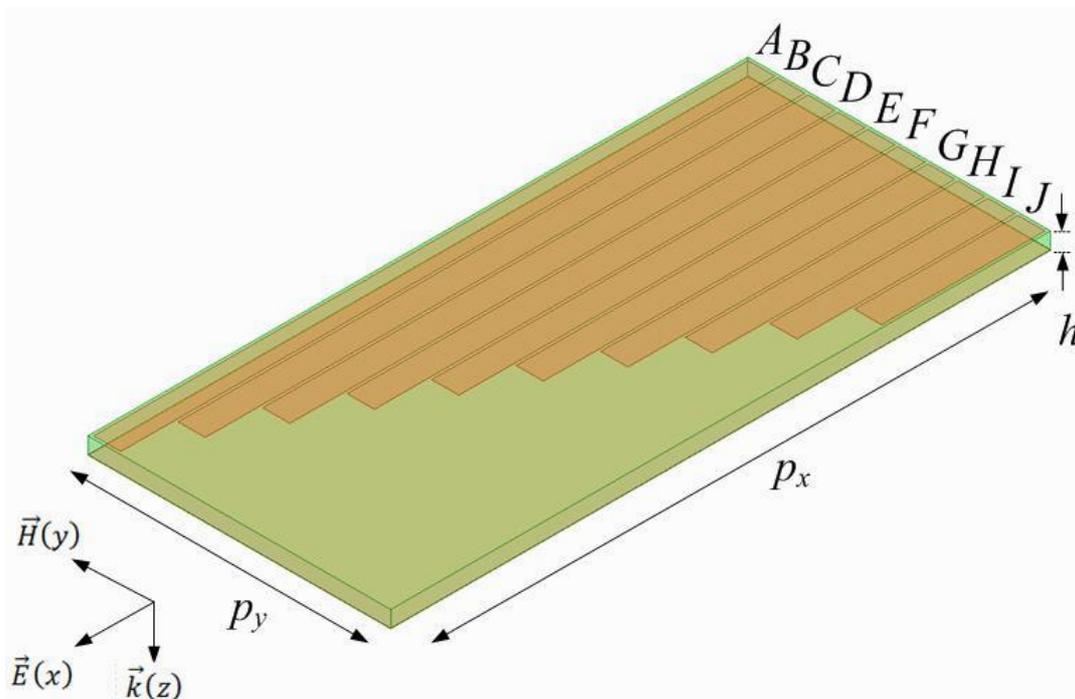


Figure 2.56- Modélisation 3D d'une cellule unité d'un absorbant à métamatériaux constitué de plusieurs patchs rectangulaires juxtaposés

Les dimensions des différents patchs sont :

A	24 mm
B	22 mm
C	20 mm
D	18 mm
E	16 mm
F	14 mm
G	12 mm
H	10 mm
I	8 mm
J	6 mm

Les autres dimensions sont tel que :

p_x	24,2 mm
p_y	11,1 mm
h	0,317 mm

Comme précédemment le substrat est en époxy FR4 de 0,3 mm d'épaisseur et la métallisation est en cuivre de 17 μm d'épaisseur. Les patchs sont espacés entre eux de 0,1 mm selon l'axe y .

On extrait de la simulation l'absorption qui correspond à cette structure (figure 2.57). Ici, on voit bien la création d'un nombre important de pics d'absorption. Chaque pic correspond à un mode de l'un des patchs. Les pics correspondant au premier mode de chaque patch sont comme suit :

Longueur patch	Fréquence relevée	Fréquence calculée
24 mm	2,95 GHz	2,97 GHz
22 mm	3,75 GHz	3,25 GHz
20 mm	4,15 GHz	3,57 GHz
18 mm	4,6 GHz	3,97 GHz
16 mm	5,15 GHz	4,47 GHz
14 mm	5,95 GHz	5,1 GHz
12 mm	6,75 GHz	5,95 GHz
10 mm	7,95 GHz	7,15 GHz
8 mm	8,95 GHz	8,94 GHz
6 mm	11,95 GHz	11,92 GHz

Chaque patch apporte sa contribution dans cette structure grâce à leurs tailles différentes, et, ils résonnent à des fréquences différentes. On constate une progressivité de la fréquence de résonance en fonction de la diminution de la taille du patch. Ce qui est particulièrement frappant c'est la perte d'absorption en fonction de l'augmentation de la distance entre patchs de même taille (selon x). L'augmentation de la distance entre patchs va influencer sur le coefficient d'amortissement de la structure qui détermine directement le niveau d'absorption. D'ailleurs, l'épaisseur du substrat a été optimisée pour obtenir une bonne absorption à la première résonance. L'autre problème de cette structure est d'être sensible à la polarisation car en tournant la structure de 90° selon l'axe z la réponse sera complètement différente, mais avec cette fois une distance entre patch qui redeviendra régulière.

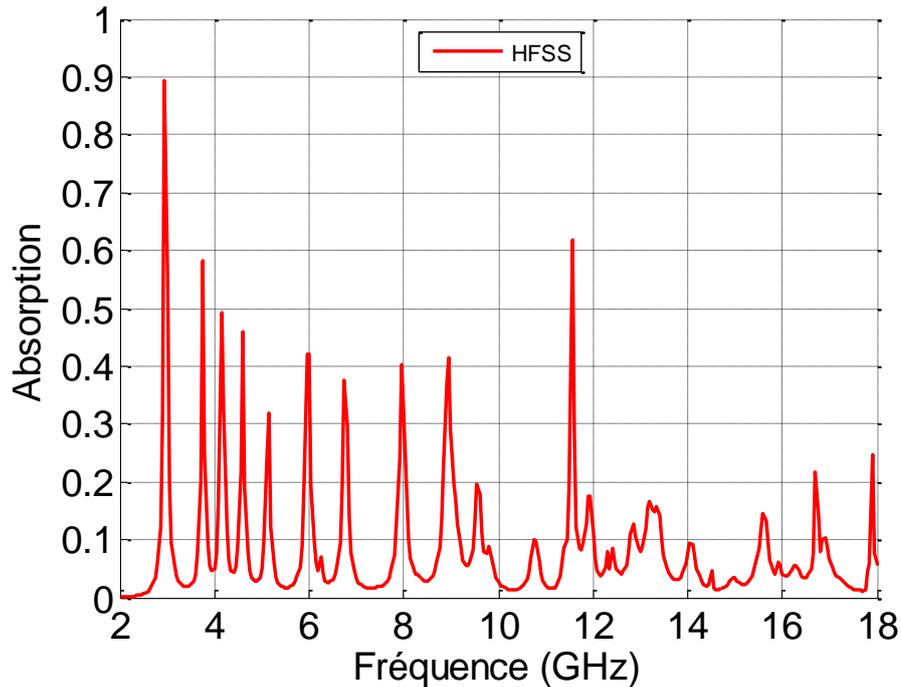


Figure 2.57 - Simulation de l'absorption de l'absorbant à métamatériaux constitué de plusieurs patches rectangulaires juxtaposés avec Ansys HFSS

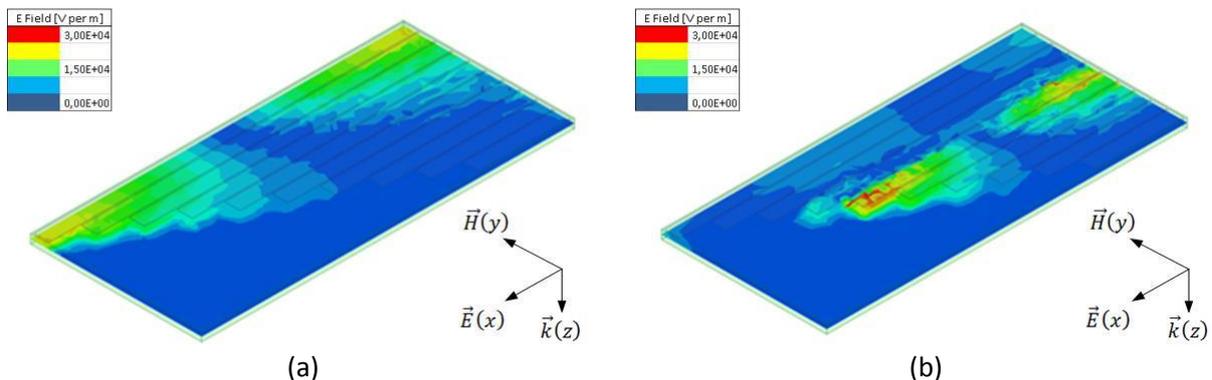


Figure 2.58 - (a) amplitude du champ E à 2,95 GHz, et (b) amplitude du champ E à 5,15 GHz

Pour cet exemple, l'observation de l'amplitude du champ E (figure 2.58) facilite la compréhension du fonctionnement de l'optimisation par juxtaposition. En effet, chaque patch est lié à une résonance différente. Ce type d'optimisation permet d'avoir une structure sur laquelle on peut placer plusieurs pics d'absorption proches les uns des autres.

A partir de cette simulation, nous pouvons extraire l'impédance caractéristique de la figure 2.59.

Ainsi, cette première simulation met en évidence le fait que l'optimisation par juxtaposition fonctionne bien et permet de faire résonner plusieurs patches sur un même substrat à des fréquences différentes. Cette optimisation est moins contraignante au niveau de l'épaisseur que l'optimisation par empilement. Le principal problème ici est la distance entre patches qui n'est pas la même pour tous les patches, ce qui va influencer sur le niveau d'absorption pour certaines résonances.

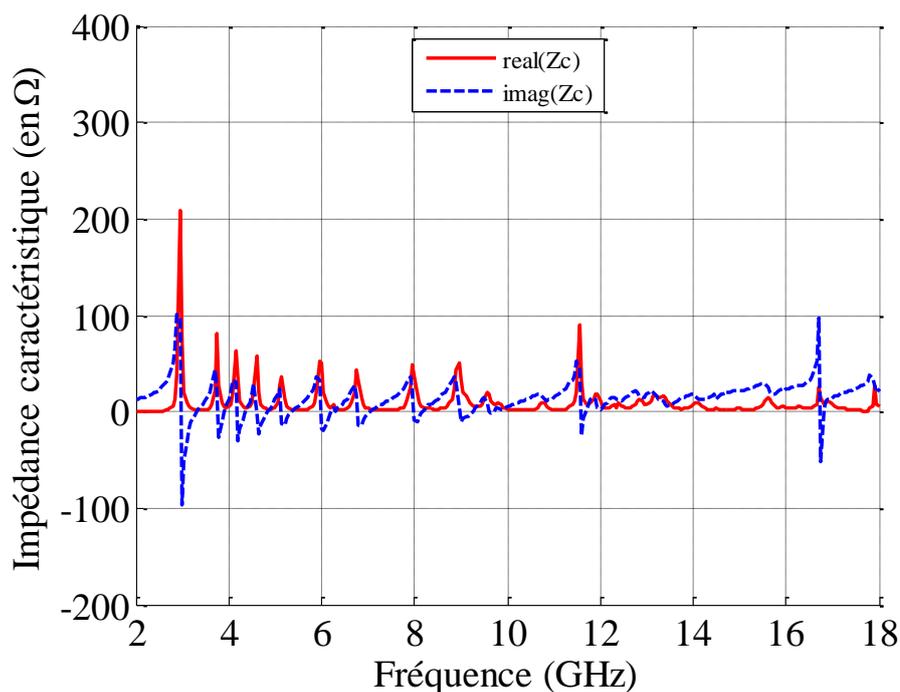


Figure 2.59 - Impédance caractéristique de l'absorbant à métamatériaux constitué de plusieurs patches rectangulaires juxtaposés

Contrairement à l'optimisation par superposition, l'épaisseur du substrat pour chaque patch n'est pas réglable car ils sont placés sur le même. Donc, obtenir une absorption totale pour l'ensemble des résonances est très compliqué car il faut sélectionner l'épaisseur de substrat qui convient pour obtenir la meilleure absorption possible et modifier la géométrie de la structure pour obtenir les espacements entre patches qui améliorent au mieux les performances. Le second exemple montre les performances qu'il est possible d'atteindre en travaillant correctement ce type d'optimisation.

b. Seconde simulation

Le second exemple présente une solution technique possible pour couvrir une petite bande de façon aisée avec une faible épaisseur de substrat. Un nombre très important de simulations a été nécessaire pour finaliser cette optimisation. La structure unité se présente comme dans la figure 2.60.

Les dimensions de cette structure sont les suivantes :

Patch carré A	6,6 mm de côté
Patch carré B	6,9 mm de côté
Patch carré C	7,15 mm de côté
Patch carré D	7,3 mm de côté
h	0,317 mm
p	19,25 mm

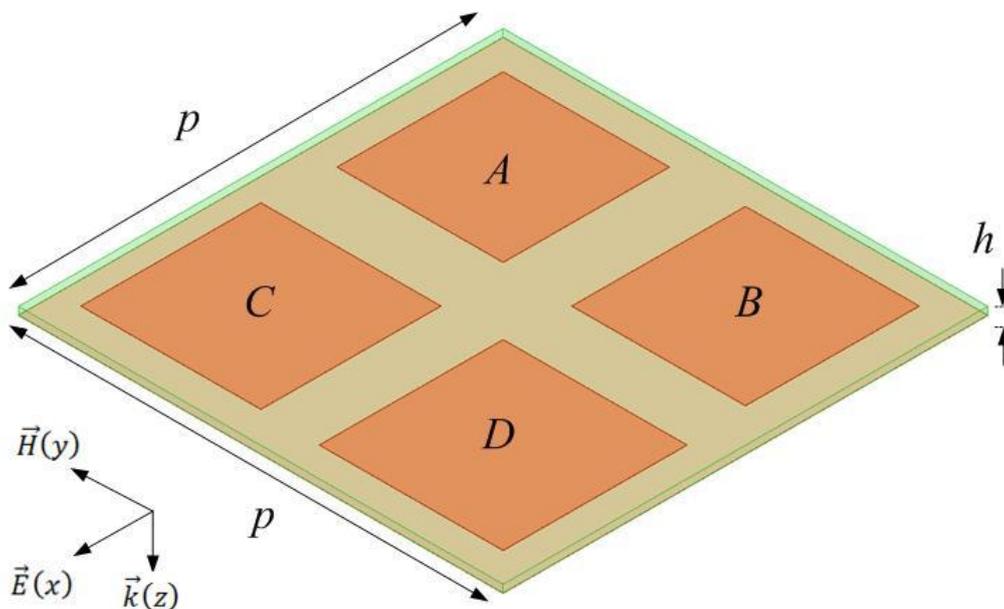


Figure 2.60 - Modélisation 3D d'une cellule unité d'un absorbant à métamatériaux constitué de plusieurs patches carrés juxtaposés

Cette structure unité est carrée et se compose d'un substrat en époxy FR4 de 0,3 mm d'épaisseur posé sur un plan de masse en cuivre et de quatre patches carrés disposés régulièrement à sa surface. La métallisation en cuivre à la surface du substrat fait 17 μm d'épaisseur. La simulation a été réalisée avec Ansys HFSS.

On peut tracer l'absorption de cette structure à partir de la simulation (figure 2.61). Dans cette simulation, nous avons ciblé la fréquence de 10 GHz. On observe clairement la création d'une petite bande d'absorption due à la proximité des résonances. Les pics d'absorption se situent à 9,4 GHz (pour 9,53 GHz calculé), 9,55 GHz (pour 9,8 GHz calculé), 9,9 GHz (pour 10,35 GHz calculé) et 10,3 GHz (pour 10,8 GHz calculé). Le niveau d'absorption moyen des pics est de l'ordre de 85 %. Au niveau de l'épaisseur de la structure, on se situe entre $\lambda/100$ et $\lambda/90$. La bande passante à 50 % d'absorption (-3 dB) est de l'ordre de 1,2 GHz.

Les diagrammes du champ E au centre de la structure sont donnés dans la figure 2.62. On observe facilement sur les cartographies de champ que chaque patch correspond à une résonance. L'absorbant à métamatériaux fonctionne comme prédit, chaque patch absorbe à une fréquence et ces fréquences sont si rapprochées que l'on observe une seule bande d'absorption. D'ailleurs, les performances sont plutôt bonnes pour cet absorbant à métamatériaux. Ce type de structure pourrait être utilisé pour réduire la réflexion d'un dispositif autour de 10 GHz sur une surface et laisser ce dispositif réfléchir aux autres fréquences.

On peut observer l'impédance caractéristique de cette structure sur la figure 2.63. L'impédance réelle n'est pas tout à fait égale à l'impédance du vide, ce qui explique que l'absorption n'est pas totale. L'impédance imaginaire par contre retombe bien à zéro à chaque résonance. L'optimisation par juxtaposition fonctionne donc correctement.

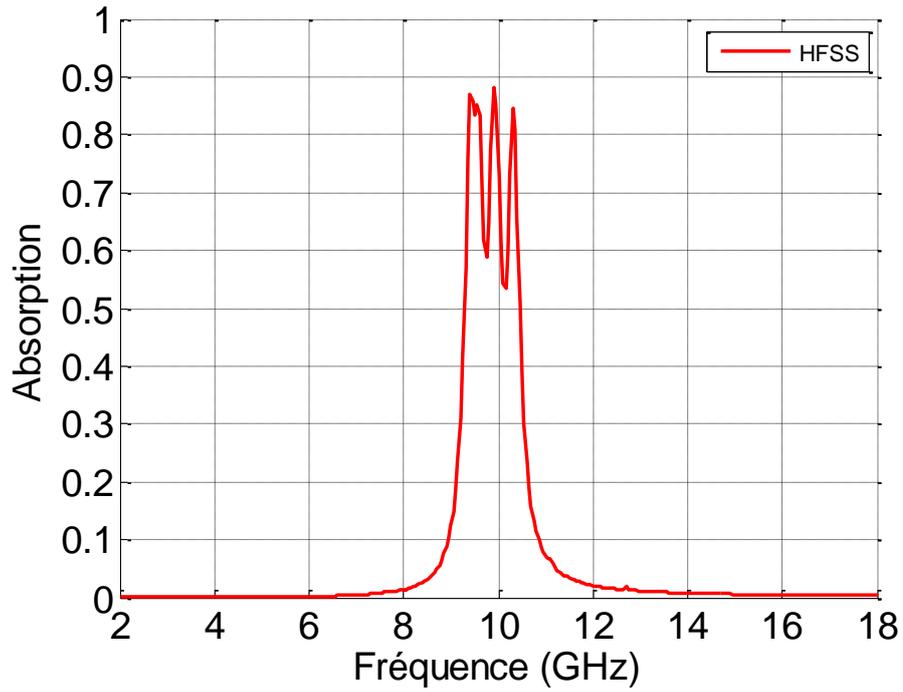


Figure 2.61 - Simulation de l'absorption de l'absorbant à métamatériaux constitué de plusieurs patches carrés juxtaposés avec Ansys HFSS

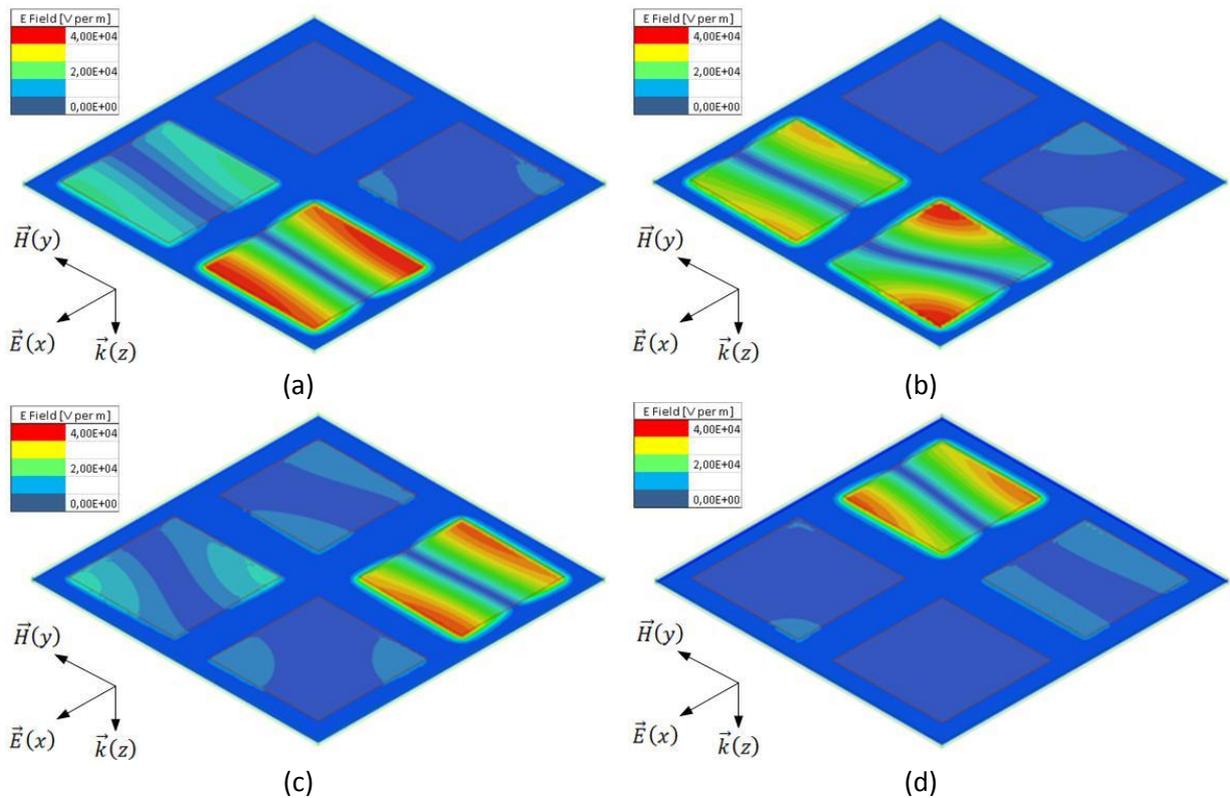


Figure 2.62 - (a) amplitude du champ E à 9,4 GHz, (b) amplitude du champ E à 9,55 GHz, (c) amplitude du champ E à 9,9 GHz, et (d) amplitude du champ E à 10,3 GHz

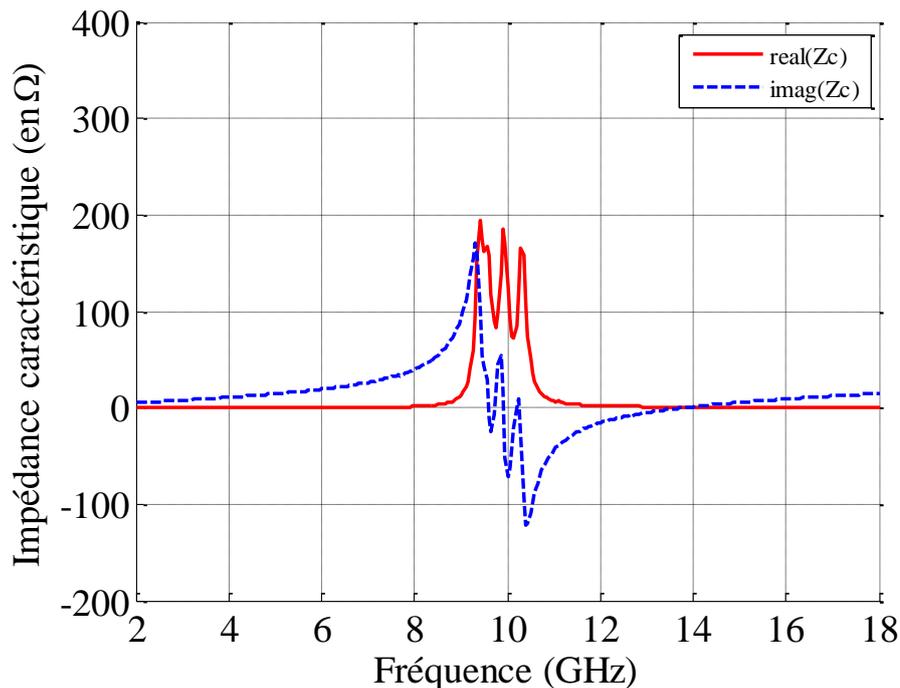


Figure 2.63 - Impédance caractéristique de l'absorbant à métamatériaux constitué de plusieurs patches carrés juxtaposés

c. Conclusion sur l'optimisation par juxtaposition

Ce type d'optimisation pousse encore un peu plus loin les possibilités données par le nouveau type d'absorbant que nous développons. En optimisant la bande de fonctionnement de l'absorbant sans pour autant augmenter son épaisseur, il est possible d'utiliser cet absorbant pour de nouvelles applications que ce soit la furtivité radar ou la compatibilité électromagnétique. Les avantages de ces absorbants à métamatériaux sont évidents : utilisation de matériaux courants et faible épaisseur. Malgré cela, l'inconvénient majeur qui est la difficulté d'atteindre une absorption totale sur une bande reste un frein important dans cette méthode d'optimisation. Dans les simulations qui suivent, nous allons présenter les travaux faits pour la réalisation de prototypes.

IV. Conception et simulations des premiers prototypes

1. Introduction

Durant la période de développement des absorbants à métamatériaux et des modèles les caractérisant, nous avons eu besoin de vérifier la véracité de nos travaux. Les premiers prototypes ont permis d'appréhender progressivement le mécanisme d'absorption dans nos matériaux. Dans cette partie, les prototypes sont présentés de façon chronologique, c'est à dire qu'ils suivent l'évolution de notre compréhension de la conception d'absorbants à métamatériaux.

Nous présentons ci-après les simulations des prototypes réalisées avant fabrication. Les réalisations et les mesures sont abordées dans le chapitre suivant.

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à des structures de métamatériaux issues de la littérature. Ces structures ne proviennent pas d'autres absorbants à métamatériaux mais plutôt de FSS. Nous débutons par une structure plutôt simple pour évoluer vers des structures plus complexes mais qui ont un potentiel certain.

Chaque prototype est simulé sous Ansys HFSS comme une cellule unité avec des conditions miroirs comme conditions limites. Ainsi la cellule unité est dupliquée à l'infini selon les directions x et y . Le substrat employé est en époxy FR4 ($\epsilon_r = 4,4 + i0,088$ et $\mu_r = 1$) de 0,3 mm d'épaisseur (très souple). La métallisation de nos structures se fait avec du cuivre de 17 μm d'épaisseur. Pour nous laisser plus de flexibilité dans le type de montage que l'on souhaite faire, nous avons décidé de ne pas intégrer le plan de masse à l'absorbant à métamatériaux. Ce choix nous impose de coller de façon mécanique (colle ou adhésif) le métamatériau au plan de masse, ainsi il faut simuler cette couche que nous symbolisons par un espace vide de 0,2 mm. L'introduction de cette espace va modifier la permittivité du substrat de notre métamatériau dans nos modèles. Pour déterminer la nouvelle valeur de permittivité, il faut considérer un substrat équivalent aux deux couches époxy + air avec la relation suivante :

$$\epsilon_{r,\text{équivalent}} = \frac{\epsilon_{r,FR4} \cdot h_{FR4} + \epsilon_{r,\text{air}} \cdot h_{\text{air}}}{h_{FR4} + h_{\text{air}}} \quad (79)$$

Ci-après l'étude des simulations du premier prototype.

2. Fallahi

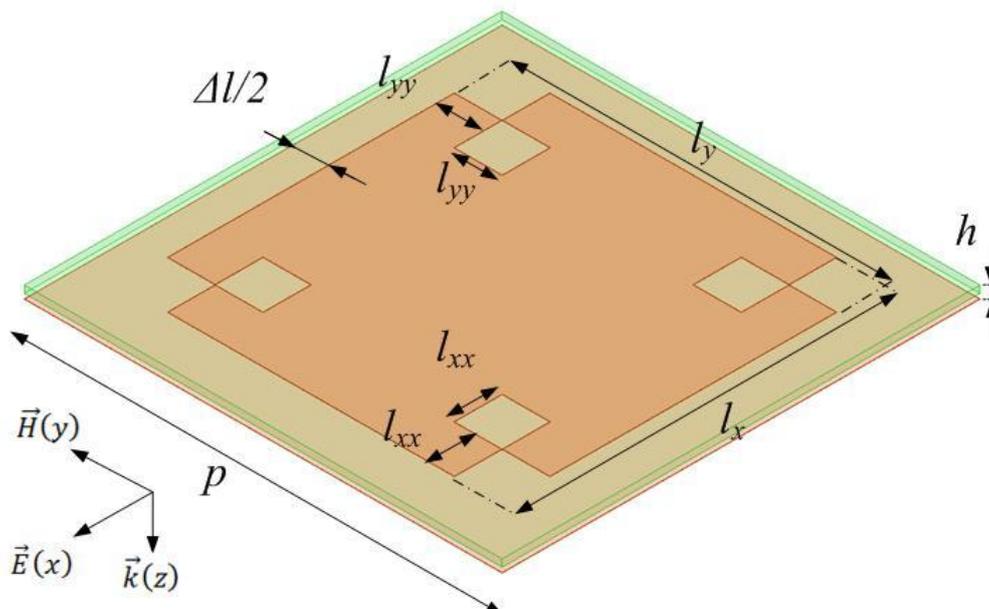


Figure 2.64 - Modélisation 3D d'une cellule unité d'un absorbant de type Fallahi

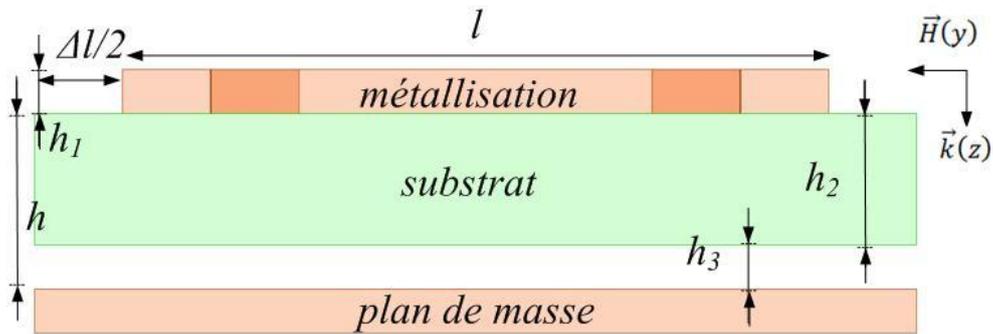


Figure 2.65 - Vue en coupe d'une cellule unité d'un absorbant de type Fallahi

Cette première structure est issue des travaux d'A. Fallahi⁷⁷ sur les matériaux absorbants comportant des circuits analogiques de type FSS. A. Fallahi a cherché à optimiser au maximum ces structures pour obtenir une forte absorption sur une bande la plus large possible dans une gamme de fréquences proches de celles que l'on étudie. C'est ce qui nous a poussés à utiliser ces FSS comme modèle. Ainsi la forme du patch crée est directement prise d'un des motifs qu'A. Fallahi présente. L'avantage de ce type de forme est que cette structure a une bande de fonctionnement très large. La taille du motif a été optimisée de façon empirique en simulation pour fonctionner à la fréquence voulue. La structure unité de l'absorbant à mat mat riaux est présentée sur la figure 2.64 et la vue en coupe sur la figure 2.65.

Comme précisé précédemment, un espacement d'air est laissé entre le plan de masse et le mat mat riau, il s'agit de l'adessif que nous avons utilisé pour fixer le prototype. Les dimensions de notre cellule unité sont présentées dans ce tableau :

h_1	17 μm
h_2	0,3 mm
h_3	0,2 mm
h	0,5 mm
$lx (=ly)$	16 mm
$lxx (=lyy)$	2 mm
Δl	4 mm
p	20 mm

La simulation de cet absorbant à mat mat riaux nous donne l'absorption de la figure 2.66. Il fonctionne en simulation et présente une allure intéressante avec deux pics d'absorption, un autour de 6 GHz avec 60 % d'absorption et un autour de 10,2 GHz avec 88 % d'absorption. Ce premier absorbant a été conçu pour pouvoir confronter les simulations et les mesures. La forme caractéristique de son absorption peut mettre en évidence des erreurs de simulation quand ces résultats sont comparés aux mesures.

Le prototype suivant est très différent géométriquement de celui-ci. Il a été conçu pour être comparé avec cet absorbant à mat mat riaux afin de comprendre l'importance des paramètres géométriques.

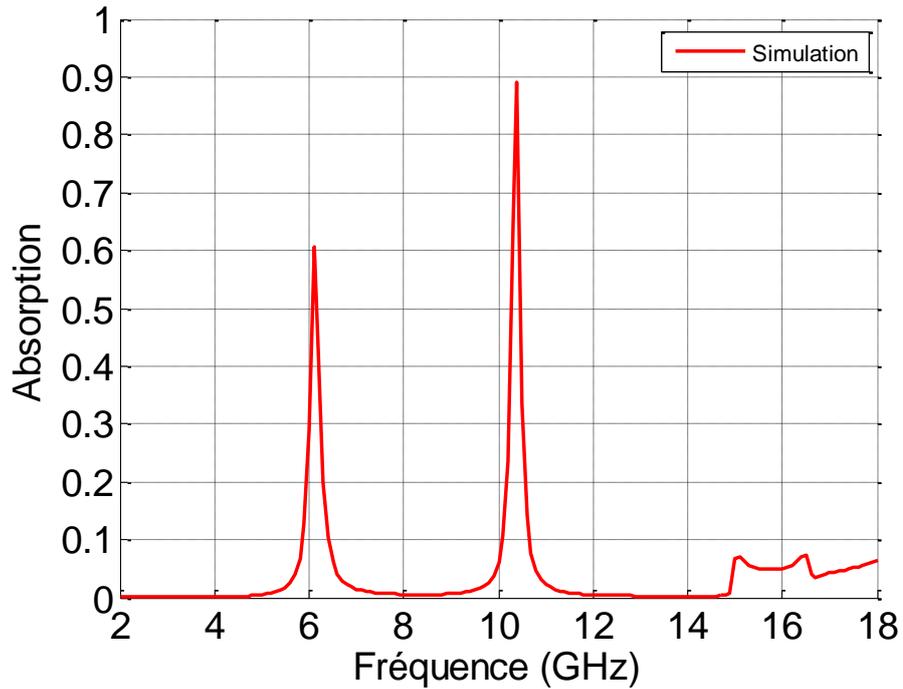


Figure 2.66 - Absorption de l'absorbant à métamatériaux de type Fallahi

3. BigG

Cette seconde structure que nous avons développée à l'IEF s'inspire également de formes de FSS. Il s'agit d'une spirale carrée. Les spirales ont l'avantage de présenter une bande de fonctionnement large dans les applications pour lesquelles elles sont utilisées. Les tailles des différents éléments ont été optimisées de façon empirique en simulation mais lors de la conception nous n'avons pas encore toute l'expertise dont nous disposons aujourd'hui. Cet absorbant à métamatériaux se présente comme dans la figure 2.67. La vue en coupe est à la figure 2.68.

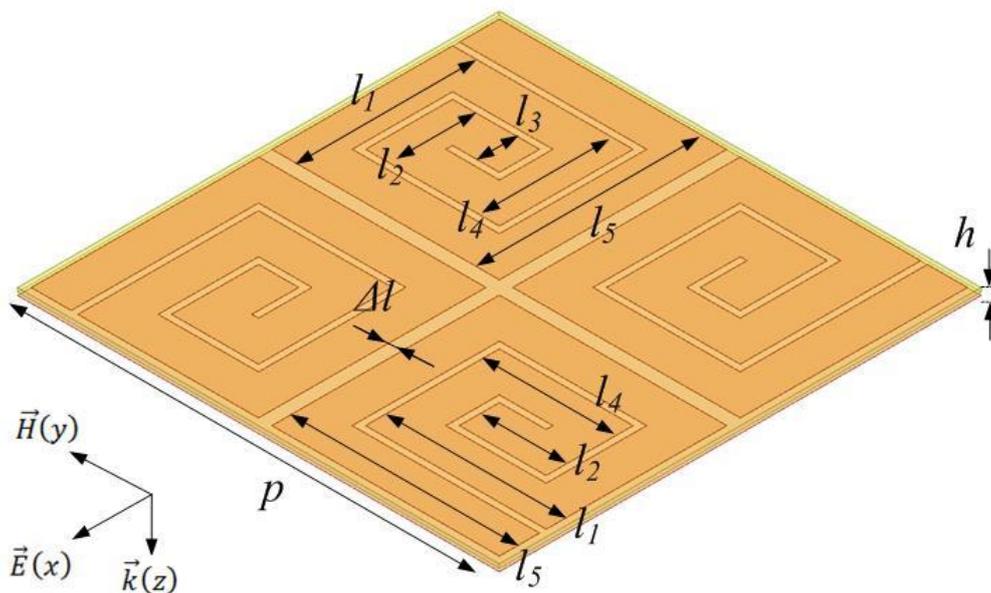


Figure 2.67 - Modélisation 3D d'une cellule unité d'un absorbant de type BigG

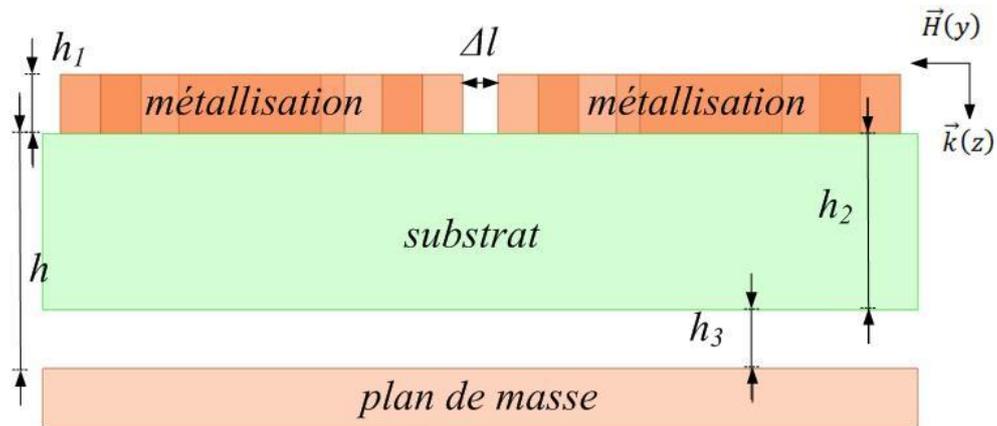


Figure 2.68 - Vue en coupe d'une cellule unité d'un absorbant de type BigG

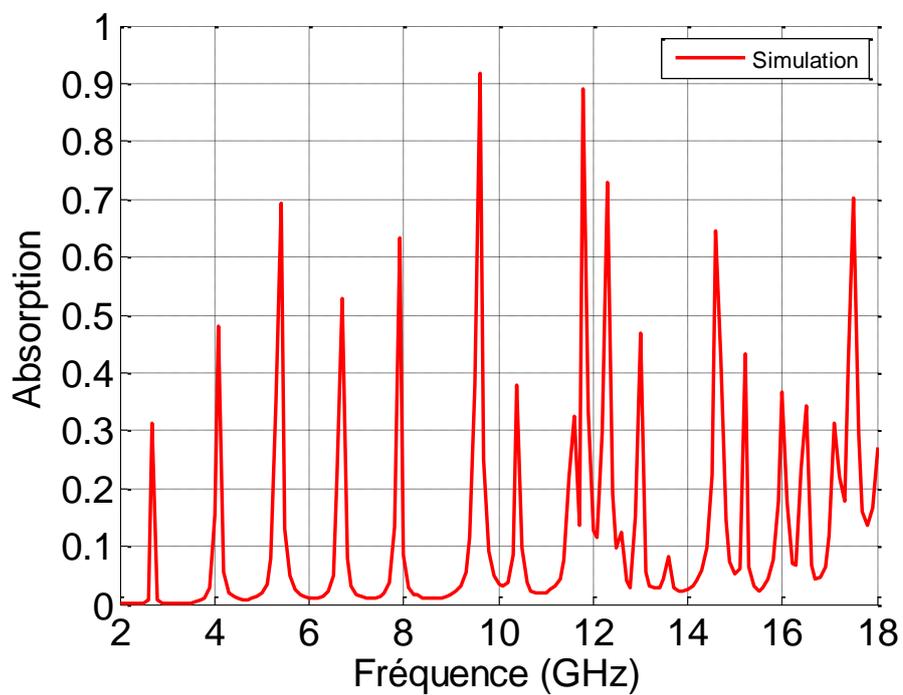


Figure 2.69 - Absorption de l'absorbant de type BigG

Les différentes dimensions sont données dans le tableau suivant :

h_1	17 μm
h_2	0,3 mm
h_3	0,2 mm
h	0,5 mm
l_1	13,5 mm
l_2	6,5 mm
l_3	3 mm
l_4	10 mm
l_5	17 mm
Δl	1 mm
p	36 mm

L'absorption issue de la simulation de cette cellule unité est telle que dans la figure 2.69. Le nombre important d'éléments de tailles différentes crée un nombre important de pics d'absorption. C'est cette allure d'absorption qui nous a poussé à vouloir réaliser un prototype. A partir de cette structure, nous avons mis en relation la taille des éléments avec leur fréquence de fonctionnement et avons commencé à interpréter les résultats de simulation.

4. CrossRoll Fallahi

Cette réalisation est un essai de couplage de deux structures précédemment réalisées, la structure Fallahi et la structure BigG. Le but du couplage est de rechercher une absorption importante et large bande. Les dimensions de la structure ont été optimisées encore une fois de façon empirique pour atteindre la bande de fréquence voulue et le niveau d'absorption souhaité. La cellule unité de notre absorbant est représentée dans la figure 2.70 et la vue en coupe dans la figure 2.71.

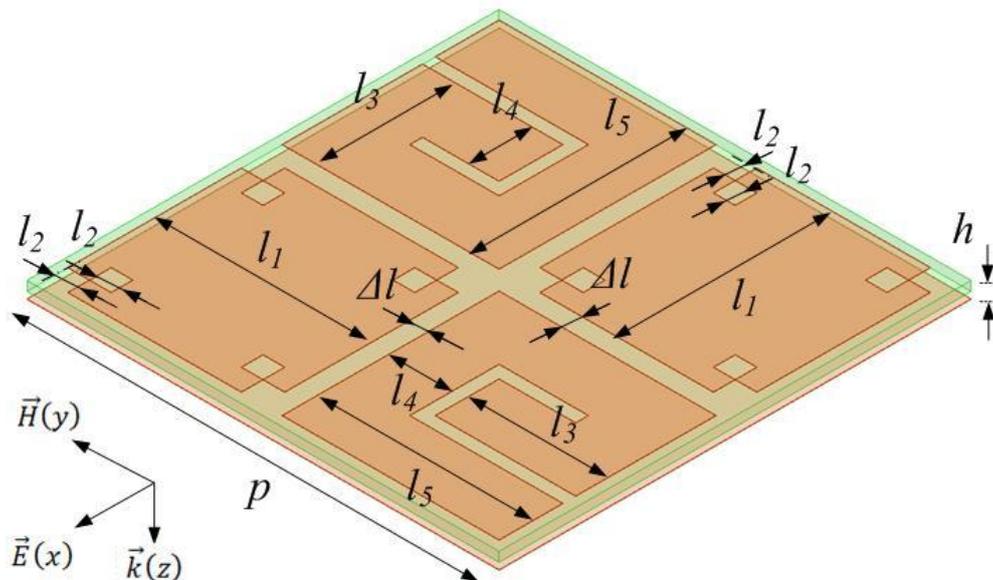


Figure 2.70 - Modélisation 3D d'une cellule unité d'un absorbant de type CrossRoll Fallahi

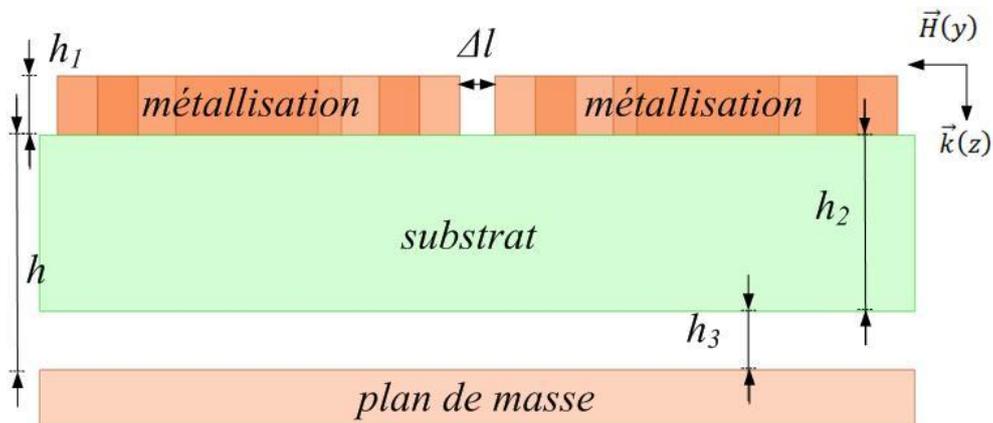


Figure 2.71 - Vue en coupe d'une cellule unité d'un absorbant de type CrossRoll Fallahi

Toutes les dimensions de cet absorbant sont dans le tableau suivant :

h_1	17 μm
h_2	0,3 mm
h_3	0,2 mm
h	0,5 mm
l_1	6,8 mm
l_2	0,68 mm
l_3	4,4 mm
l_4	2 mm
l_5	6,8 mm
Δl	0,6 mm
p	14,8 mm

Les différents éléments constituant l'absorbant à métamatériaux sont beaucoup plus petits en longueur que les deux structures dont ils sont extraits.

Cette fois-ci l'absorption a la forme donnée dans la figure 2.72. Les performances générales de cet absorbant à métamatériaux ne sont pas très bonnes. Il a néanmoins une courbe d'absorption très caractéristique avec un premier pic à 5,4 GHz peu important puis quatre pics d'absorption groupés. Le premier de ces pics d'absorption provient d'un mode qui se crée dans la partie de la structure inspirée par les travaux d'A. Fallahi, le deuxième pic d'absorption est lié à un mode de la partie en spirale carrée, le troisième d'un mode dans la structure Fallahi puis les deux derniers modes dans la spirale carrée. Ainsi, il est possible de créer différents pics d'absorption à l'aide de différents éléments sur un même plan. On peut donc chercher à positionner ces pics proches l'un de l'autre afin d'obtenir une bande d'absorption et avoir un niveau d'absorption proche d'être total.

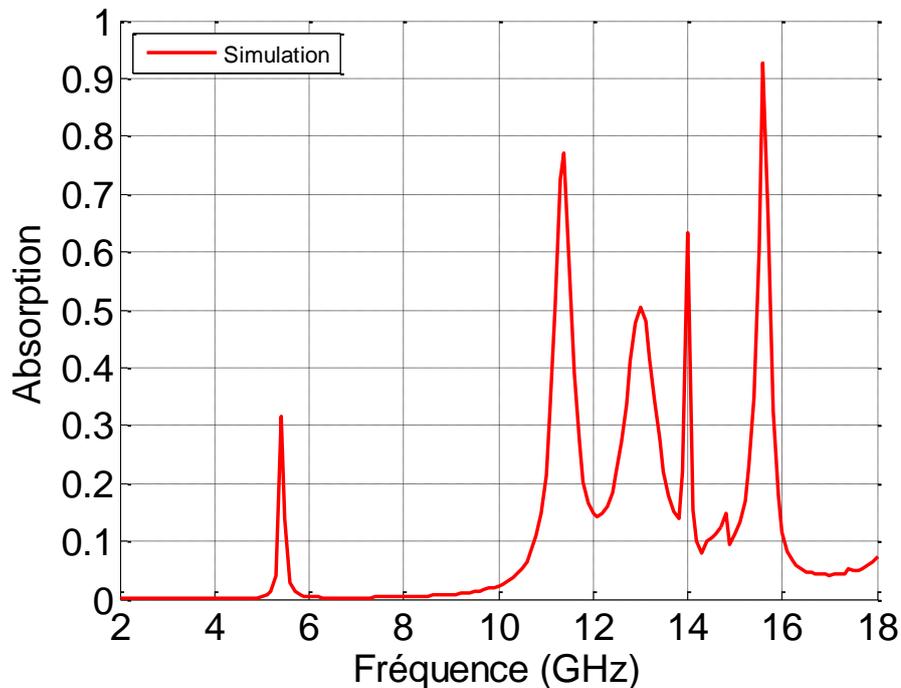


Figure 2.72 - Absorption de l'absorbant de type CrossRoll Fallahi

Nous avons cherché à partir de cette structure à développer un absorbant à métamatériaux encore plus optimisé qui présente une vraie bande d'absorption en utilisant des éléments simples qui permettent de cibler facilement des fréquences. C'est à partir de ce moment que nous avons utilisé des patchs carrés ou rectangulaires puis par la suite circulaires. Il est facile de définir la première résonance de ces patchs en utilisant le modèle des lignes de transmission par analogie avec ce qui se fait pour les antennes planaires. Nous avons ainsi développé l'absorbant à métamatériaux qui suit.

5. MultiCross

Cette structure qui clôt la première série de prototypes est issue des recherches sur l'optimisation maximum de la bande de fonctionnement d'un absorbant à métamatériaux. L'utilisation de patchs carrés et rectangulaires vient de la volonté d'avoir des structures dont il est simple de calculer la fréquence de résonance, contrairement à ce qui a été fait avec les structures précédentes. L'agencement des patchs est inspiré des métamatériaux fractals. L'espacement entre patchs a été optimisé empiriquement en simulation car nous n'avons pas encore développé le modèle théorique pour atteindre l'absorption totale au moment de la fabrication de ce prototype. Nous avons cherché à obtenir un diagramme d'absorption proche de ce que réalise la structure CrossRoll Fallahi, à savoir un premier pic d'absorption seul puis une bande d'absorption. La structure unité se présente comme dans la figure 2.73 et la vue en coupe comme dans la figure 2.74.

Les dimensions de chacun des patchs sont données dans le tableau suivant :

	Longueur (selon x , en mm)	Largeur (selon y , en mm)
A	6,6	6,6
B	15,2	6,6
C	6,6	15,2
D	3,3	3,3
E	7,6	3,3
F	3,3	7,6
G	1,65	1,65
H	3,8	1,65
I	1,65	3,8
J	0,825	0,825
K	1,9	0,825
L	0,825	1,9
M	1,9	1,9

L'absorption correspondant à la l'absorbant à métamatériaux de type MultiCross est donné dans la figure 2.75.

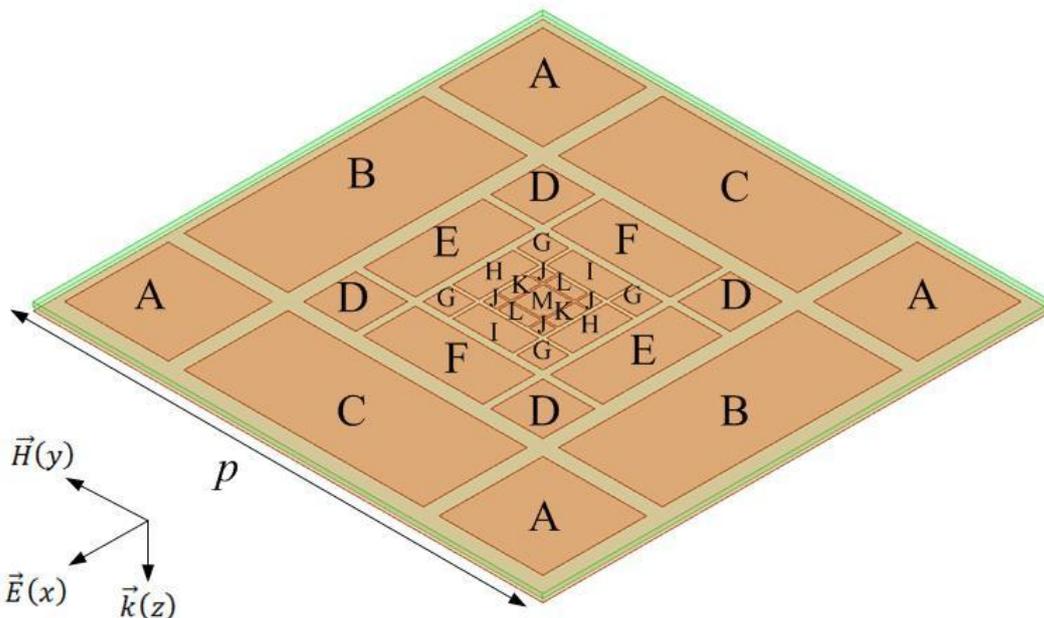


Figure 2.73 - Modélisation 3D d'une cellule unité d'un absorbant de type MultiCross

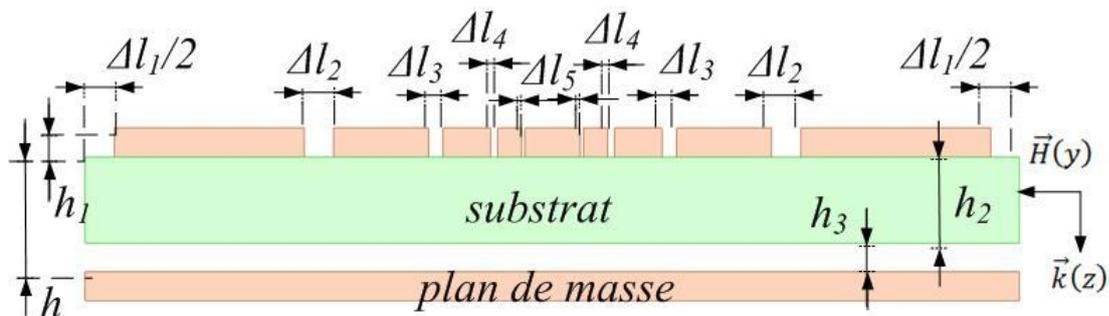


Figure 2.74 - Vue en coupe d'une cellule unité d'un absorbant de type MultiCross

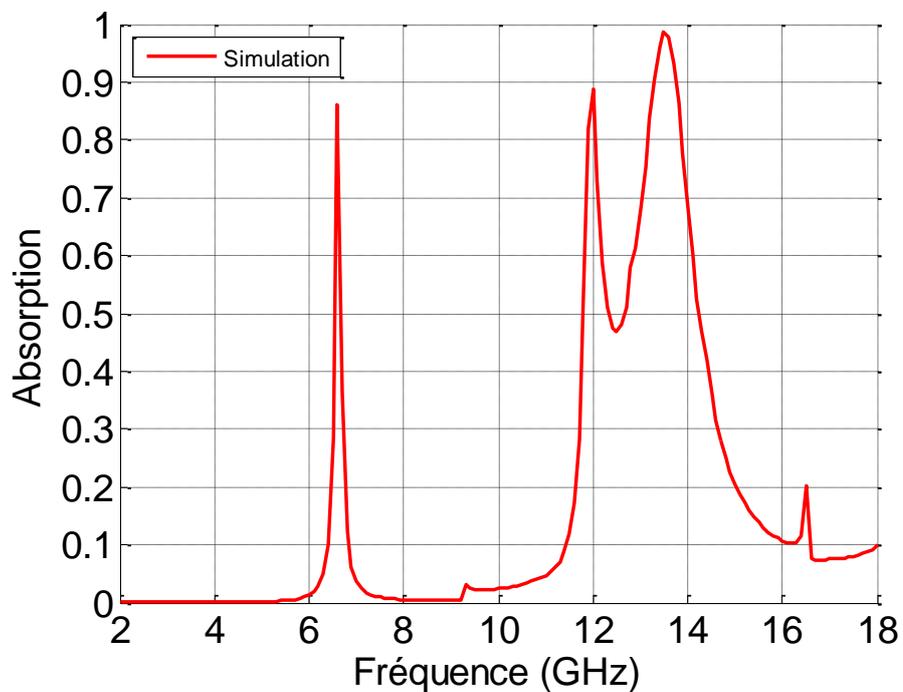


Figure 2.75 - Absorption de l'absorbant de type MultiCross

Les dimensions que l'on observe sur la coupe (figure 2.74) sont répertoriées dans ce tableau :

h_1	17 μm
h_2	0,3 mm
h_3	0,2 mm
h	0,5 mm
Δl_1	2 mm
Δl_2	1 mm
Δl_3	0,5 mm
Δl_4	0,25 mm
Δl_5	0,125 mm
p	32,4 mm

Le travail réalisé sur cette structure est concluant car nous obtenons enfin une bande d'absorption correcte. Cette structure contrairement à la structure CrossRoll Fallahi présente un premier pic d'absorption à 6,6 GHz qui correspond au premier mode du patch B. On obtient une absorption pour ce pic de 86 % avec une épaisseur de $\lambda/88$. Une bande d'absorption est créée grâce à deux pics rapprochés autour de 13 GHz, pour un maximum d'absorption de 98,6 %. La bande d'absorption se forme grâce au premier mode des patches A, C et E. Cette structure d'absorbant à métamatériaux est très intéressante car pour la première fois nous obtenons une absorption à partir de dimensions que nous avons calculés. De plus cette structure a un fonctionnement caractéristique avec un premier pic distant en fréquence d'une bande d'absorption, ce qui va nous permettre d'investiguer plus en profondeur différentes optimisations et des concepts pour de futures applications.

Cet absorbant à métamatériaux est une structure très prometteuse qui est l'aboutissement de nos premiers travaux. Cette structure utilise des éléments géométriques simples, patches carrés et rectangulaires, et a une absorption très caractéristique avec un premier pic suivi d'une bande à un niveau assez élevé. Cette structure illustre le brevet que nous avons déposé⁷⁸ et sert à mener d'autres recherches que nous allons présenter dans la partie suivante.

6. Conclusion sur les premières simulations de prototypes

Ces premières simulations ont été faites en même temps que nous avons développé les modèles de calcul des fréquences de fonctionnement de nos absorbants à métamatériaux. Ces structures sont importantes pour notre étude. Elles montrent que l'absorption peut être réalisée à l'aide de structures petites devant la longueur d'onde et que l'on peut cibler des fréquences. Le rapprochement de plusieurs pics d'absorption crée une bande d'absorption.

Les structures complexes inspirées de structures de la littérature ont un inconvénient majeur qui provient de la difficulté de prédire leur fréquence de fonctionnement et leur niveau d'absorption. Ainsi, je préfère privilégier les structures à base de patches carrés ou rectangles voir circulaires pour la suite de mes développements d'absorbants à métamatériaux.

Dans les travaux qui suivent, nous étudions une structure constituée de patches circulaires qui met en évidence notre maîtrise du phénomène d'absorption. Puis, nous traitons d'optimisation et de l'utilisation de ces absorbants à métamatériaux quand ils sont conformés.

V. Simulations particulièrement intéressantes

1. Introduction

Dans cette partie, nous abordons l'étude des simulations qui met en évidence les possibilités des absorbants à métamatériaux. Tout d'abord, nous étudions l'adaptabilité du motif, puis la superposition de couches, ensuite l'augmentation de l'espacement entre métasurface et plan de masse et pour finir la conformation de métamatériaux absorbants.

2. MultiPatches

Après avoir réalisé l'absorbant à métamatériaux MultiCross, nous avons cherché à créer une structure qui valide la compréhension du fonctionnement de nos structures à base de patches. Nous sommes partis de cette structure et avons cherché à obtenir les mêmes performances avec une structure à base de patches circulaires que l'on nomme MultiPatches. L'utilisation de patches circulaires doit améliorer le fonctionnement de la structure quand on change la polarisation de l'onde incidente. La cellule unité est présentée sur la figure 2.76 et la vue en coupe sur la figure 2.77.

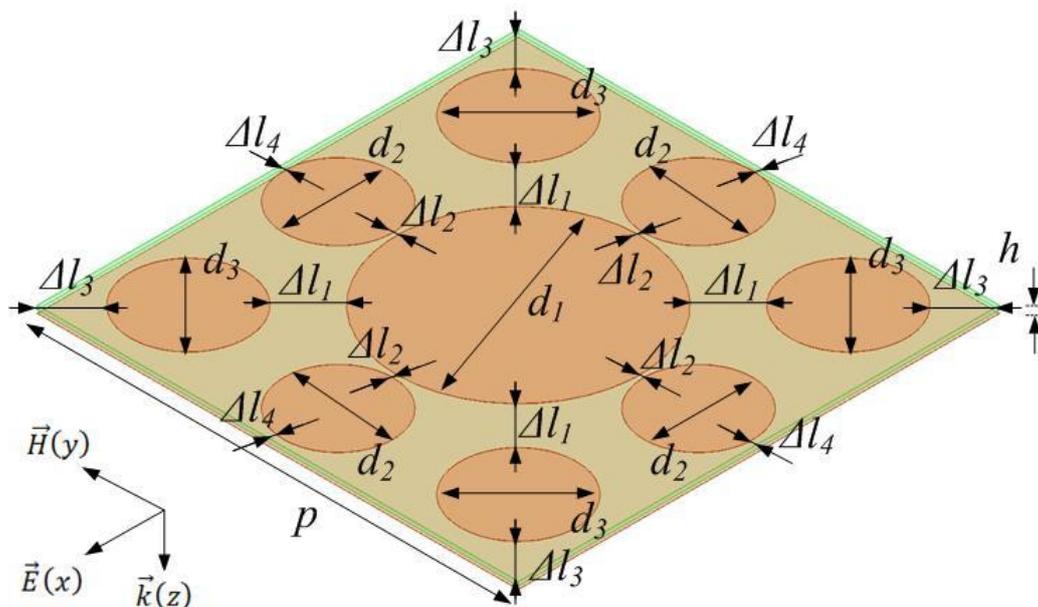


Figure 2.76 - Modélisation 3D d'une cellule unité d'un absorbant de type MultiPatches



Figure 2.77 - Vue en coupe d'une cellule unité d'un absorbant de type MultiPatches

La structure est constituée de patches circulaires de trois diamètres différents placés de façon régulière sur un substrat en époxy FR4. Les dimensions de cet absorbant à métamatériaux sont données dans ce tableau :

h_1	17 μm
h_2	0,3 mm
h_3	0,2 mm
h	0,5 mm
d_1	17,68 mm
d_2	8,41 mm
d_3	7,9 mm
Δl_1	3,925 mm
Δl_2	0,31 mm
Δl_3	3,57 mm
Δl_4	0,45 mm
p	35 mm

Cette structure est de conception simple et est étudiée pour avoir les mêmes caractéristiques d'absorption que MultiCross. Les trois diamètres de patches circulaires sont choisis ainsi : le patch de diamètre 17,68 mm pour une résonance autour de 6,5 GHz, le patch de diamètre 8,41 mm pour une résonance autour de 12,5 GHz et le patch de diamètre 7,9 mm pour une résonance autour de 13,5 GHz. L'espacement entre patch a été optimisé pour atteindre l'absorption la plus importante possible tout en gardant un alignement de patches simple.

La figure 2.78 dévoile la caractéristique d'absorption de cet absorbant à métamatériaux. On y voit un premier pic d'absorption autour de 6,75 GHz puis une bande d'absorption entre 13 GHz et 13,7 GHz. La simulation de la structure montre un fonctionnement comparable à la structure MultiCross malgré une bande d'absorption moins large.

Cet absorbant à métamatériaux démontre notre capacité à créer des absorbants avec un but précis, avoir le même fonctionnement que l'absorbant MultiCross. Je ne présente pas d'autres structures utilisant des patches circulaires. Nous abordons ci-après une optimisation possible à appliquer sur les absorbants à métamatériaux, la superposition de plusieurs couches identiques.

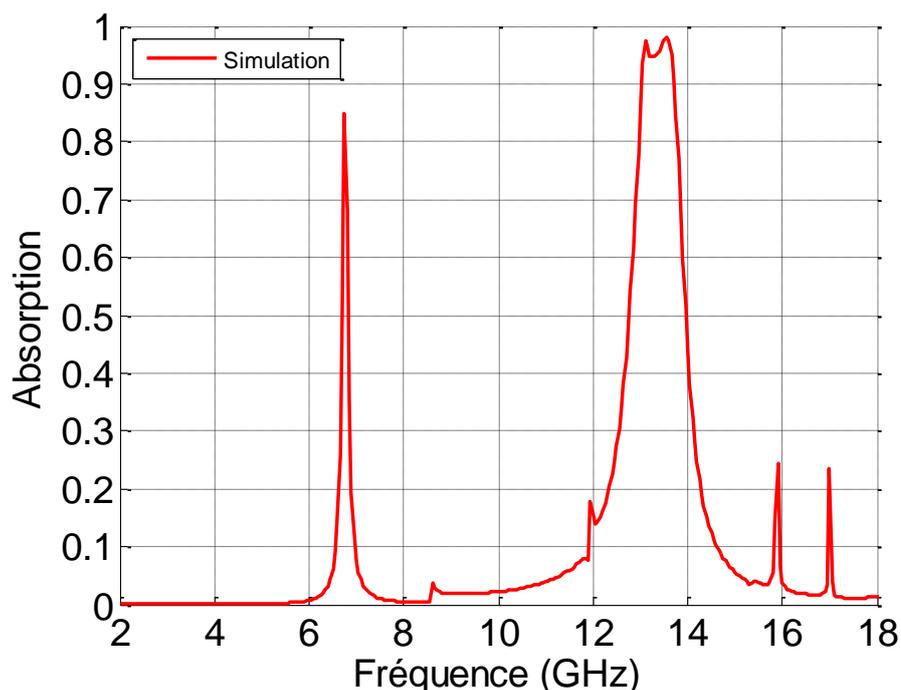


Figure 2.78 - Absorption de l'absorbant de type MultiPatches

3. Multicouche de MultiCross

Nous avons montré qu'en superposant plusieurs couches de matériaux différents, il est possible de cumuler les effets de chacun des matériaux. En empilant plusieurs couches identiques, il doit être possible d'augmenter le niveau d'absorption de l'ensemble de la structure. Nous avons donc cherché à observer ce phénomène en reproduisant plusieurs fois la structure MultiCross. Les simulations sont réalisées avec Ansys HFSS pour des empilements allant jusqu'à six épaisseurs (figure 2.79).

Avec comme dimensions pour les épaisseurs :

h_1	17 μm
h_2	0,3 mm
h_3	0,2 mm

Entre chaque épaisseur de MultiCross, il y a un espacement de 0,2 mm correspondant à l'adhésif utilisé pour monter la structure.

Tout d'abord on peut observer l'évolution de l'absorption pour une, deux et trois couches (figure 2.80). Sur ces simulations on voit une diminution globale de fréquence de fonctionnement de l'absorbant avec l'augmentation du nombre de couches. Entre la structure en une seule couche et celle à deux couches, on observe une amélioration des performances pour la bande d'absorption, qui atteint 99,7 %. Par contre, le passage de deux à trois couches induit une dégradation des performances.

Pour comprendre le phénomène, il faut prendre en considération que les motifs placés au dessus de la structure multicouche ont pour substrat plusieurs couches, donc avec une épaisseur importante et un indice équivalent différent d'une simple couche d'air et d'époxy. Les motifs placés dans l'empilement se retrouvent avec un substrat qui peut être composé de plusieurs couches mais également d'un superstrat dont il faut tenir compte. On obtient une multitude de pics d'absorptions avec ce type de structure à plusieurs couches. Le niveau d'absorption de chaque pic est lié à l'emplacement du patch qui le crée.

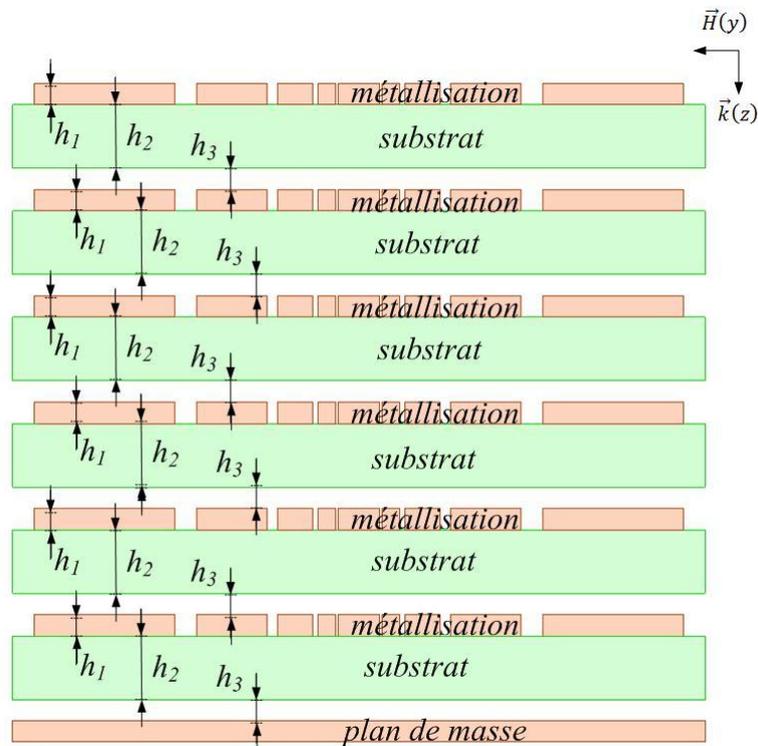


Figure 2.79 - Vue en coupe d'un empilement de six couches d'absorbant de type MultiCross

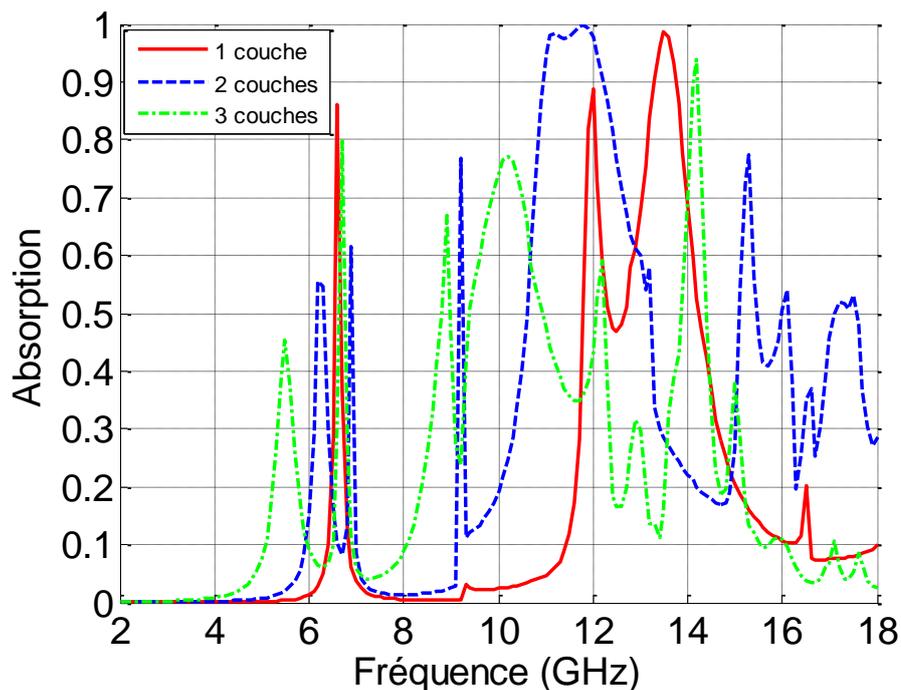


Figure 2.80 - Absorption pour 1, 2 et 3 couches d'absorbant de type MultiCross

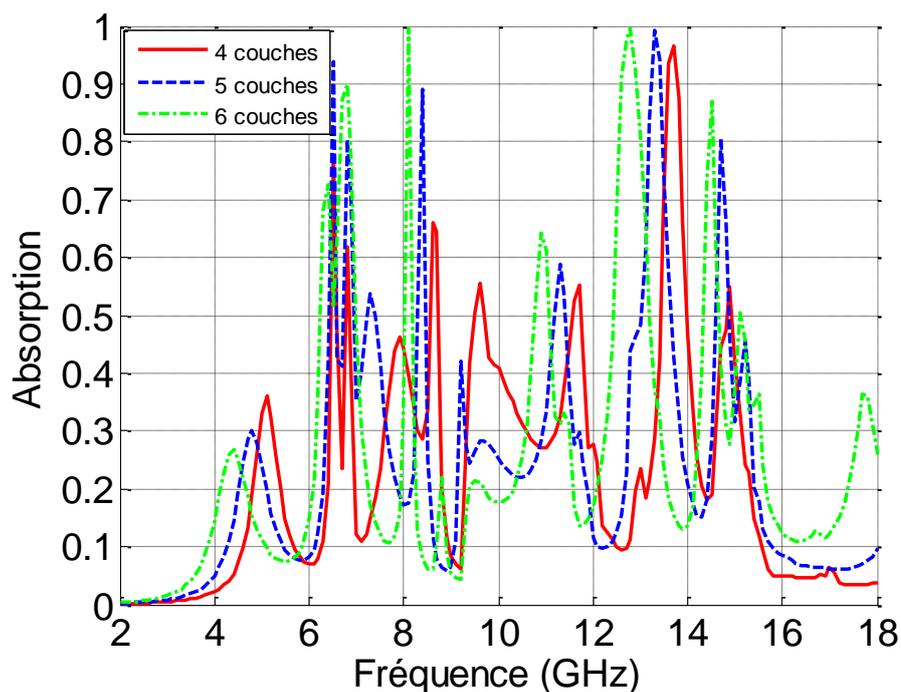


Figure 2.81 - Absorption pour 4, 5 et 6 couches d'absorbant de type MultiCross

Nous avons également simulé des structures constituées de quatre, cinq et six couches dont nous présentons les allures dans la figure 2.81. De la même façon que précédemment, on observe un décalage vers les basses fréquences de l'ensemble des courbes avec l'augmentation du nombre de couches de métamatériaux.

De façon générale, comme nous le voyons dans les simulations, l'empilement de structures identiques peut conduire à l'amélioration des performances de l'absorbant à métamatériaux final. C'est le cas pour l'empilement de deux couches. Cette technique d'optimisation fonctionne dans certains cas, mais présente le désavantage d'augmenter fortement l'épaisseur. Pour optimiser le niveau d'absorption en gardant une épaisseur restreinte, il vaut mieux se tourner vers le modèle théorique et l'amélioration du coefficient d'amortissement que de superposer plusieurs structures identiques.

Nous abordons dans la partie suivante un moyen de faire évoluer le coefficient d'amortissement.

4. Evolution de l'espacement entre le substrat et le plan de masse

Au cours de nos simulations, nous nous sommes intéressés à faire changer la valeur de l'espacement entre le substrat et le plan de masse de nos absorbants à métamatériaux. L'augmentation de l'épaisseur de cette couche d'air doit diminuer la valeur de l'indice et les pertes du substrat équivalent formé sous les patches métalliques. Si l'indice diminue, la fréquence est censée augmenter. Et si les pertes diminuent, l'amortissement dissipatif ($\nu = \frac{R}{2L}$) va changer par rapport à

l'amortissement radiatif ($\gamma = \frac{|\beta|^2}{2CZ_0}$). Cela peut améliorer ou dégrader les performances. Nous avons réalisé les simulations sur la structure MultiCross en faisant évoluer l'espacement de 0,2 mm à 0,6 mm. L'objectif avec ces simulations est de montrer qu'une modification du fonctionnement d'un absorbant à métamatériaux peut être réalisé de façon simple même après fabrication. L'espacement que nous faisons varier sur la vue en coupe (figure 2.74) de la cellule unité est l'épaisseur h_3 .

La comparaison entre les différentes simulations est donnée dans la figure 2.82.

En simulation, la fréquence de fonctionnement de notre absorbant à métamatériaux augmente légèrement et le niveau d'absorption de notre premier pic diminue en fonction de l'augmentation de l'épaisseur alors que la bande d'absorption se resserre et augmente en niveau. Il y a donc une modification du rapport entre l'amortissement radiatif et l'amortissement dissipatif.

Ces simulations permettent de montrer une méthode de modification de l'indice du substrat et du coefficient d'amortissement par un changement de géométrie. Cette méthode de modification est simple à mettre en œuvre et peut permettre d'utiliser une même structure pour plusieurs applications ou optimiser son fonctionnement après fabrication. Il faut garder à l'esprit que les dimensions sont très petites, l'ajustement de l'espacement doit être précis pour ne pas avoir d'erreur.

Après l'étude de l'évolution de l'espacement entre le substrat et le plan de masse, nous vérifions le fonctionnement de notre absorbant quand il subit une contrainte de déformation. L'utilisation de l'absorbant conformé est une caractéristique importante pour son utilisation industrielle.

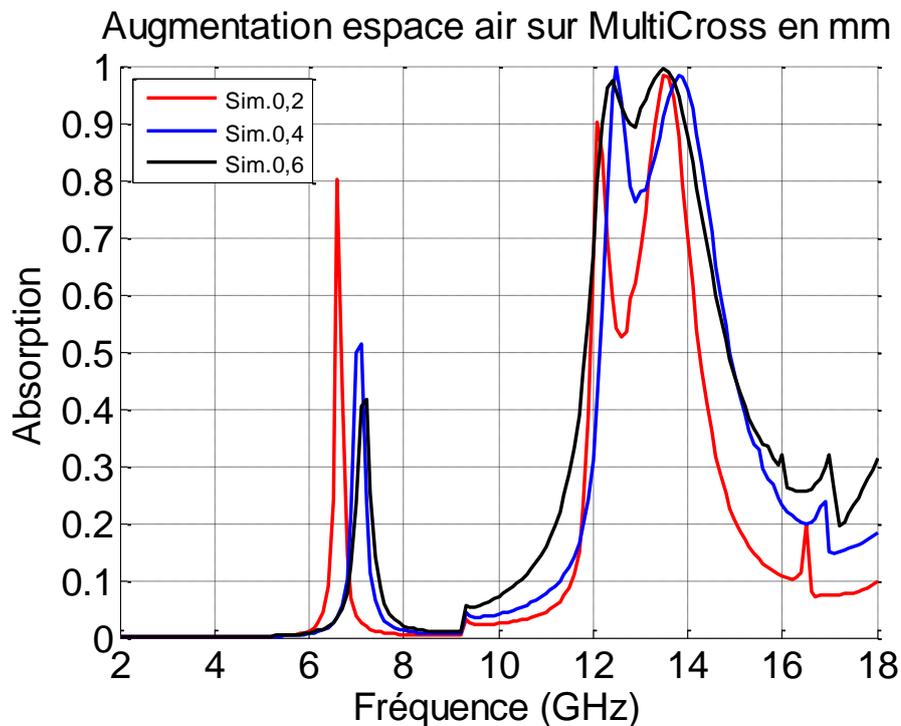


Figure 2.82 - Simulation de l'absorption pour un espacement entre substrat et plan de masse de 0,2 mm, 0,4 mm et 0,6 mm pour l'absorbant de type MultiCross

5. Absorbant sur cylindre

Afin de caractériser le fonctionnement de nos absorbants à métamatériaux quand ils sont conformés, nous avons cherché à les simuler en les posant sur des cylindres de diamètres différents. Nous disposons de cylindres de diamètres 100 mm et 220 mm. Il est très important de définir si ces absorbants sont conformables pour pouvoir définir quelle application il est possible de réaliser avec. Si l'absorbant a un fonctionnement changeant quand il est conformé, il ne pourra être utilisé que sur des plans. Donc il faudra créer des pavés ou tuiles d'absorbants pour couvrir des surfaces non planes. Si l'absorbant a un comportement non changeant en fonction de sa conformation, il sera facile à adapter à toutes sortes de surfaces. Nous présentons uniquement les travaux concernant une épaisseur de MultiCross avec un espacement d'air entre le substrat et le plan de masse de 0,2 mm pour les deux cylindres qui ont été sélectionnés.

Pour cette étude, nous avons fait des simulations sous CST Microwave Studio qui est adapté pour l'étude de structures comportant beaucoup d'éléments. La représentation d'une section de cylindre recouvert d'absorbant en simulation est donné dans la figure 2.83 et la représentation de face est donné dans la figure 2.84.

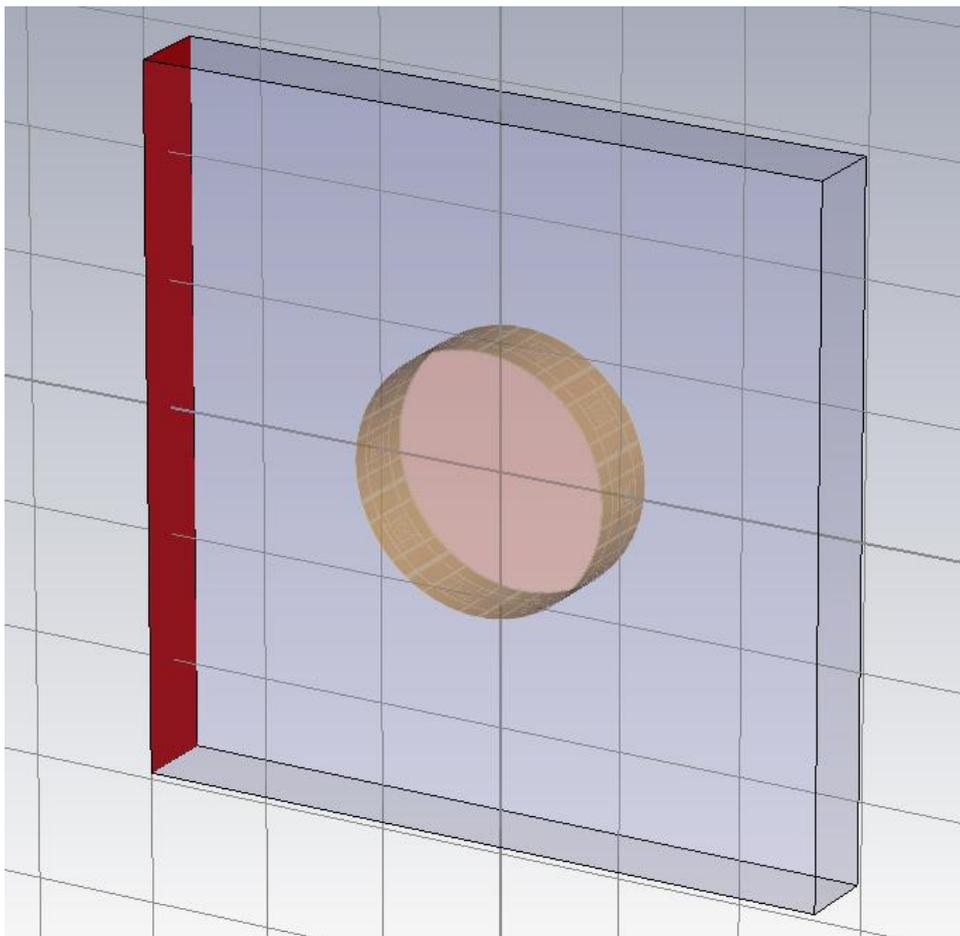


Figure 2.83 - Modélisation 3D d'une section de cylindre recouvert d'absorbant de type MultiCross

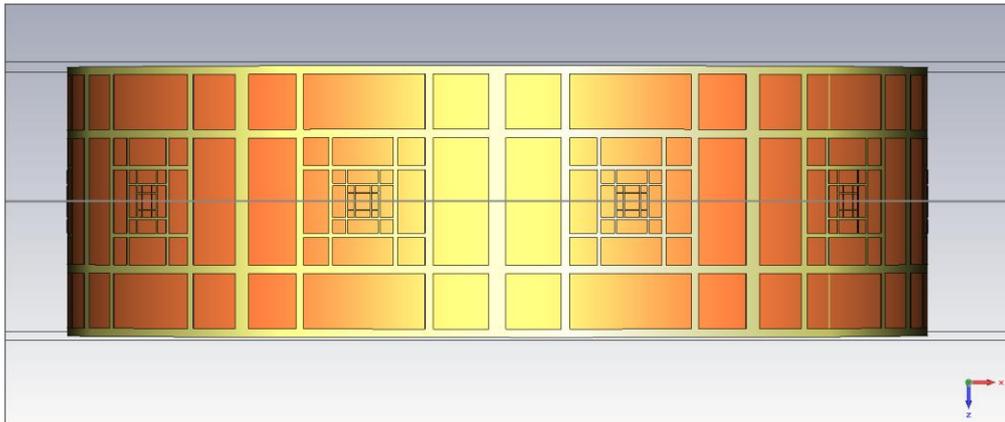


Figure 2.84 - Modélisation 3D d'une section de cylindre recouvert d'absorbant de type MultiCross vue de face

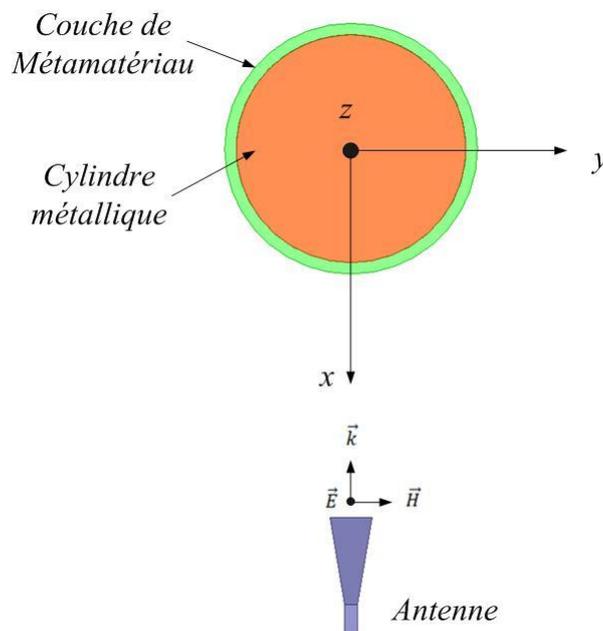


Figure 2.85 - Schéma du montage du cylindre recouvert d'absorbant de type MultiCross en simulation

La simulation est réalisée pour donner le coefficient de réflexion avec un seul port, soit le S11, avec l'antenne placée en face (figure 2.85).

Nous avons simulé dans un premier temps le cylindre métallique seul puis l'avons recouvert de l'absorbant à métamatériaux afin de mettre en évidence la contribution de ce dernier. Pour la simulation sur le cylindre de 100 mm de diamètre, nous obtenons une réflexion telle que la figure 2.86.

Dans cette simulation, on observe un premier pic d'absorption autour de 6 GHz qui est très important puis une bande d'absorption de 12 à 13,5 GHz et enfin une autre bande autour de 16,5 GHz. Ce fonctionnement se rapproche de celui de l'absorbant à métamatériaux MultiCross quand il est posé sur une surface plane. Il y a juste un léger décalage vers les basses fréquences pour le premier pic et la bande à autour de 16,5 GHz qui n'existe pas à plat. Avec cette conformation forte, les résultats de simulation sont encourageants.

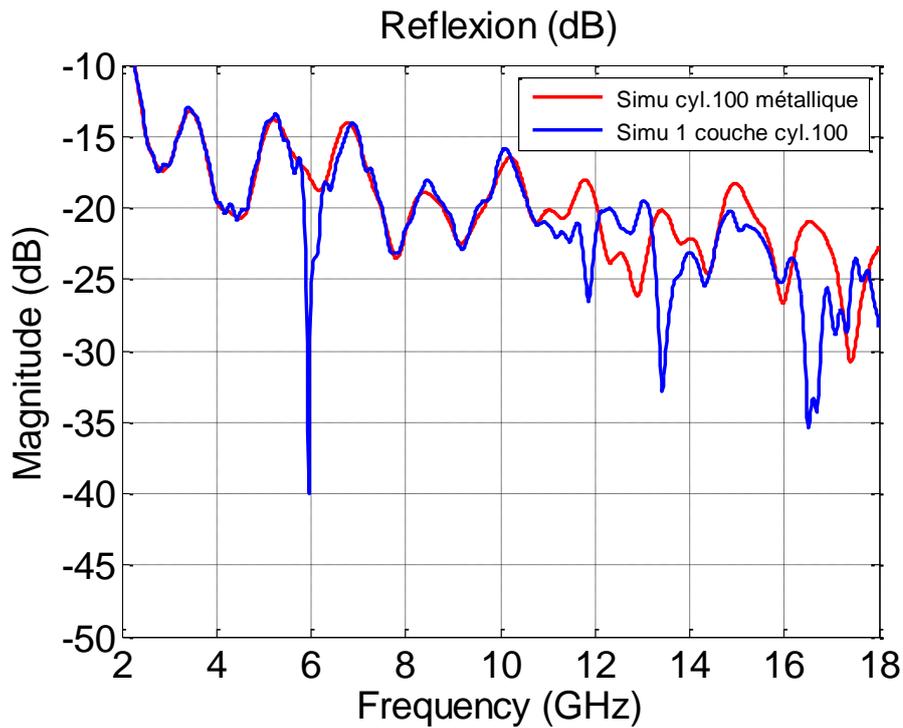


Figure 2.86- Comparatif des paramètres S11 du cylindre métallique de diamètre 100 mm seul et du cylindre recouvert d'une couche d'absorbant de type MultiCross en simulation

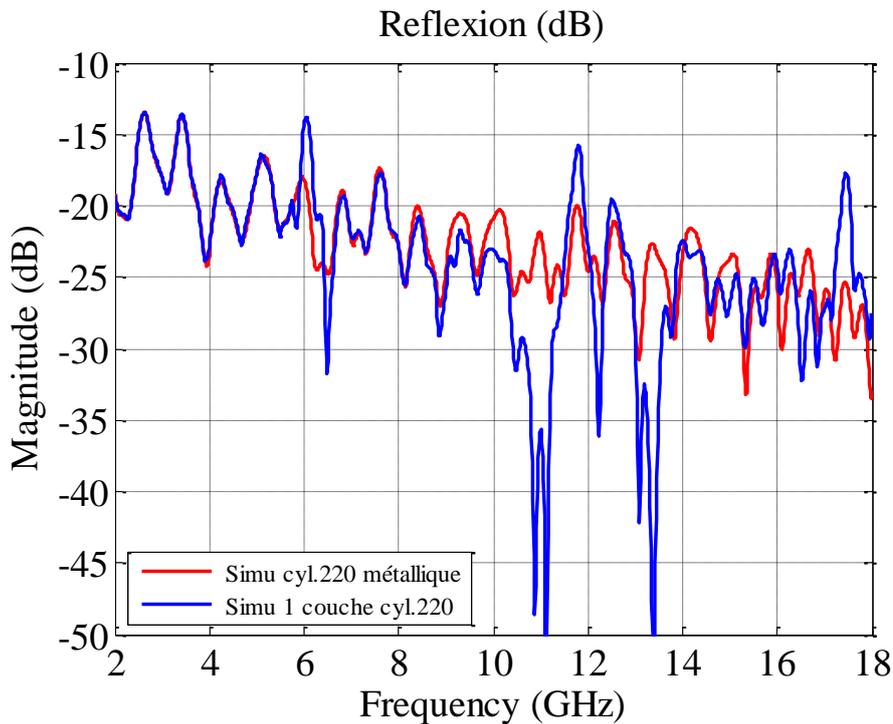


Figure 2.87- Comparatif des paramètres S11 du cylindre métallique de diamètre 220 mm seul et du cylindre recouvert d'une couche d'absorbant de type MultiCross en simulation

Le cylindre de 220 mm de diamètre a un rayon de courbure moins important que celui de 100 mm de diamètre. Le résultat de la simulation est présenté dans la figure 2.87.

Cette simulation présente également beaucoup de similitudes avec l'absorbant avec plan de masse plat. On a un premier pic d'absorption à 6,5 GHz, puis une bande d'absorption inédite autour

de 11 GHz et enfin on retrouve la bande d'absorption qui va de 12,8 GHz à 13,5 GHz. On se rapproche des performances de l'absorbant à plat avec une bande supplémentaire. Posé sur un cylindre, le métamatériau conserve son absorption.

L'étude de conformation de nos absorbants à métamatériaux montre qu'il est possible de les utiliser sur des surfaces courbes, mais qu'il faut prendre en compte un possible décalage en fréquence et la formation de nouvelles bandes d'absorption. Nous testons uniquement la possibilité de poser nos absorbants sur des cylindres, c'est à dire des rayons de courbures réguliers. Si l'on souhaite utiliser des absorbants à métamatériaux pour un rayon de courbure non-régulier, une étude doit être réalisée en fonction du cas de figure rencontré pour définir le décalage en fréquence que l'on a. Nous vérifions si ces résultats se confirment en mesure dans le chapitre suivant.

6. Conclusion sur les simulations particulièrement intéressantes

Les simulations présentées dans cette partie montrent que nous pouvons créer à l'aide de nos modèles des absorbants à métamatériaux selon un but précis. La réalisation d'un absorbant à métamatériaux imitant la structure MultiCross est une réussite en simulation. Les simulations mettent en évidence l'adaptabilité et la facilité d'utilisation des absorbants à métamatériaux. Il est possible de faire évoluer leurs caractéristiques de fonctionnement après fabrication soit en modifiant l'épaisseur d'air les séparant du plan de masse soit en les empilant. Enfin leur fonctionnement est peu altéré quand ils sont conformés. Cela indique qu'un grand panel d'utilisations est possible. Nous vérifions en mesure dans le chapitre suivant l'ensemble de ces points.

Dans la partie suivante, nous mettons en évidence le potentiel de ce type de matériau pour la réalisation d'absorbant inédit.

VI. Etude du couplage d'absorbants à métamatériaux avec des absorbants magnétiques

1. But de l'étude

Dans cette étude, nous cherchons à améliorer les performances d'un absorbant magnétique commercial en le couplant à l'une de nos structures. Le but premier étant d'obtenir une bande d'absorption plus large vers les basses fréquences. D'autres aspects sont intéressants comme la création de pics d'absorption isolés à basses fréquences et la diminution de la masse de l'absorbant hybride.

Les absorbants magnétiques ont de bonnes performances d'absorption sur de larges bandes et sont généralement très petit devant la longueur d'onde. Leur principal problème est qu'ils sont très denses car fortement chargés en matériaux ferreux. L'épaisseur et le taux de charge de ces

matériaux sont très influents sur leur fréquence de fonctionnement. Nous essayons donc d'introduire nos absorbants à métamatériaux dans un absorbant magnétique afin d'en diminuer la fréquence de fonctionnement. L'ajout de l'absorbant à métamatériaux a un impacte sur la masse finale de l'absorbant hybride mais également sur son épaisseur.

Afin de réaliser cette étude, nous avons besoin d'absorbants magnétiques. Notre partenaire Airbus Group nous a fourni deux types d'absorbants, que nous appelons absorbant magnétique 1 et absorbant magnétique 2. Les simulations sont faites avec les deux types d'absorbant magnétique que nous avons couplés à nos absorbants à métamatériaux.

Nos structures de métamatériaux ont une face avant fortement métallique. Nous avons réalisé plusieurs simulations et nous nous sommes aperçus qu'il est plus judicieux de placer l'absorbant à métamatériaux sous l'absorbant magnétique pour des résultats optimaux.

2. Matériaux employés pour la réalisation de prototypes

Pour la réalisation des prototypes de cette thèse, nous employons comme diélectrique de l'époxy FR4 de 0,3 mm d'épaisseur issue de l'industrie. Les paramètres de ce matériau sont soumis à de faibles variations comme des concentrations non homogènes de fibre de verre ou des variations minimales de l'épaisseur. L'époxy FR4 a une densité de 1900 kg/m^3 et les matériaux absorbants magnétique de l'étude ont une densité autour de 4000 kg/m^3 . Les motifs métalliques sont en cuivre d'épaisseur de $17 \text{ }\mu\text{m}$ sans traitement ni vernis. La densité du cuivre est de 8960 kg/m^3 .

a. Absorbant magnétique 1

L'absorbant magnétique 1 est constitué de deux couches de matériaux magnétiques (figure 2.88). Cela permet de couvrir une bande très large. La première épaisseur (h_{abs1}) fait 1,7 mm d'épaisseur et la seconde épaisseur (h_{abs2}) fait 0,78 mm pour une épaisseur totale (h_{abs}) de 2,48 mm. L'absorption de ce matériau est donnée sur la figure 2.89. Les paramètres de ces matériaux nous ont été fournis par Airbus Group pour que nous puissions les simuler sans problèmes. L'absorption de ce premier matériau est plutôt large sur la bande d'étude choisie. Il va nous servir de support pour nos premières simulations et déterminer tout le processus pour intégrer des absorbants magnétiques dans Ansys HFSS.

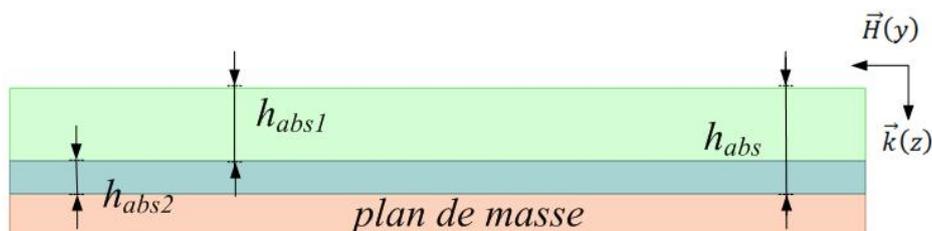


Figure 2.88 - Vue en coupe de l'absorbant magnétique 1

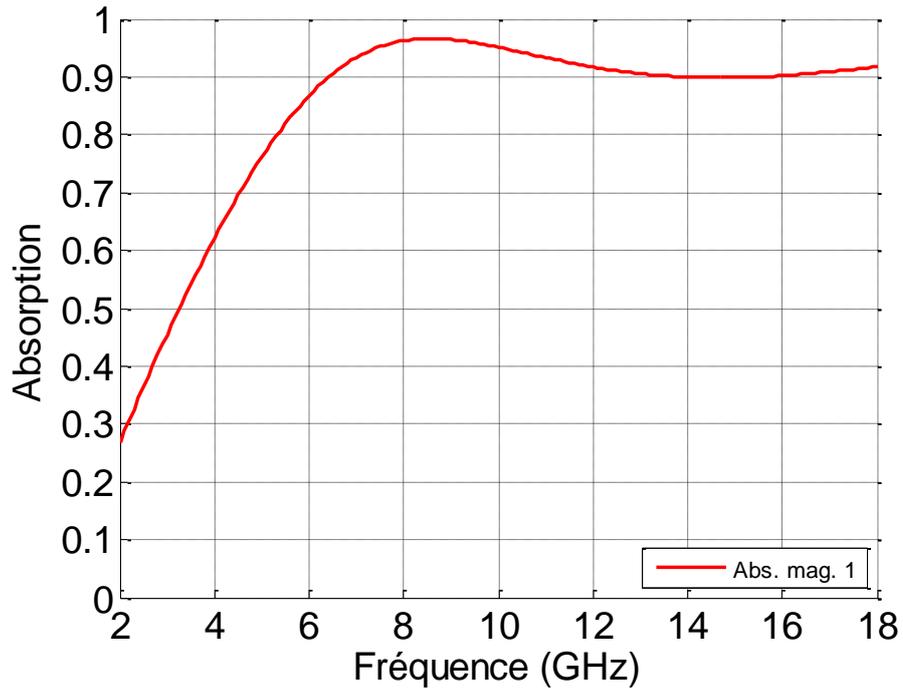


Figure 2.89 - Absorption de l'absorbant magnétique 1

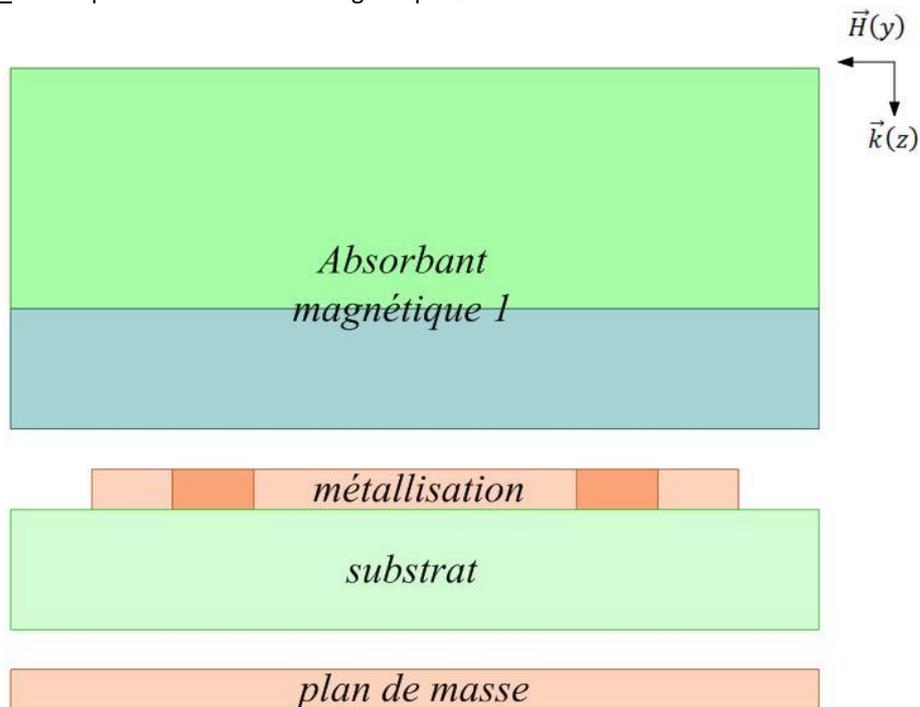


Figure 2.90 - Vue en coupe de l'absorbant magnétique 1 couplé avec un absorbant à métamatériaux

Une fois couplé avec les prototypes réalisés, la vue en coupe de l'empilement est telle que la figure 2.90.

Les absorbants à métamatériaux sont réalisés sans plan de masse intégré de façon à pouvoir laisser plus de flexibilité dans le choix de montage. Comme précédemment l'adhésif utilisé est représenté par un espace vide de 0,2 mm entre le plan de masse et le substrat. De la même façon,

nous utilisons de la colle entre l'absorbant magnétique et les absorbants à métamatériaux. Au final, l'empilement à base d'absorbant magnétique 1 fait 3,197 mm d'épaisseur.

b. Absorbant magnétique 2

L'absorbant magnétique 2 est constitué d'une seule couche de matériau magnétique (figure 2.91), il cible donc une seule fréquence. Son épaisseur (h_{abs}) est de 1,75 mm. On peut le comparer à l'absorbant commercial MR21-0003 de 1 mm d'épaisseur que nous avons pu mesurer et dont nous disposons à l'IEF (figure 2.92).

L'absorbant magnétique 2 est moins large-bande que le premier. Cela va permettre de mieux apprécier l'apport des absorbants à métamatériaux. Une fois couplé avec les prototypes réalisés, l'empilement vu en coupe se présente comme dans la figure 2.93.

Pour les montages réalisés avec l'absorbant magnétique 2, nous employons la même méthode qu'avec l'absorbant magnétique 1. Nous collons chaque éléments ensemble avec une épaisseur de colle de 0,2 mm. L'épaisseur des empilements avec l'absorbant magnétique 2 est de 2,467 mm.

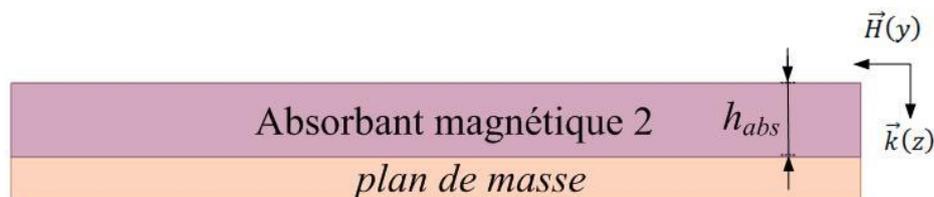


Figure 2.91 - Vue en coupe de l'absorbant magnétique 2

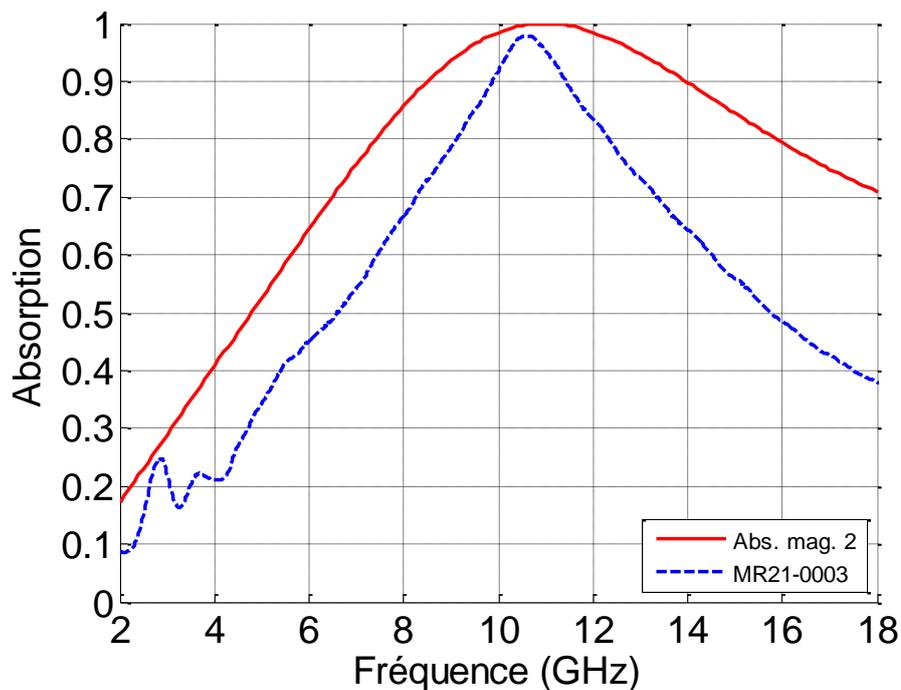


Figure 2.92 - Absorption de l'absorbant magnétique 2

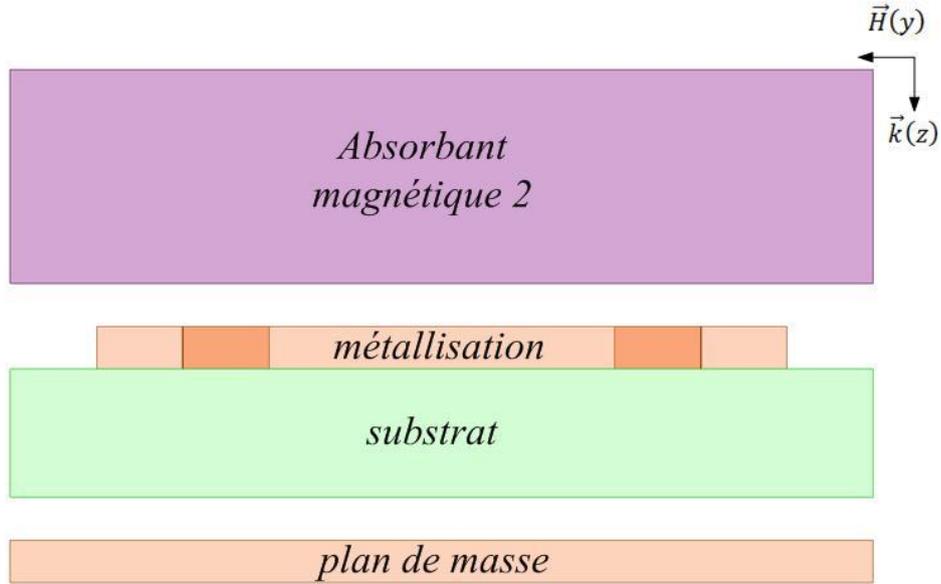


Figure 2.93 - Vue en coupe de l'absorbant magnétique 2 couplé avec un absorbant à métamatériaux

3. Etude de l'impact d'un superstrat

L'ajout d'un matériau au dessus de l'absorbant à métamatériaux modifie les fréquences des résonances issues de ce matériau. Pour définir le décalage en fréquence qui résulte de l'empilement de différents matériaux, nous nous sommes aidés d'une publication traitant du sujet pour les antennes patchs⁷⁹. Un empilement basique de diélectriques aura pour permittivité équivalente⁸⁰, la permittivité moyenne de l'ensemble de l'empilement et pour perméabilité équivalente, la perméabilité moyenne de l'ensemble de l'empilement. On peut l'écrire comme suit :

$$\varepsilon_{eq} = \left(\sum_{n=1}^N \frac{t_n}{\varepsilon_n} \right)^{-1} \cdot \left(\sum_{n=1}^N t_n \right) \quad (80)$$

$$\mu_{eq} = \left(\sum_{n=1}^N \frac{t_n}{\mu_n} \right)^{-1} \cdot \left(\sum_{n=1}^N t_n \right) \quad (81)$$

Avec ε_n permittivité de la $n^{\text{ème}}$ couche de diélectrique, μ_n perméabilité de la $n^{\text{ème}}$ couche de diélectrique et t_n épaisseur de la $n^{\text{ème}}$ couche de diélectrique.

Quand un patch est inséré dans un empilement de diélectrique, on peut définir la permittivité et la perméabilité équivalente de l'ensemble comme présenté dans la figure 2.94.

On peut définir la largeur effective du patch w_{eff} et la quantité v_e comme suit :

$$w_{eff} = w + \frac{2.h}{\pi} \cdot \ln \left[17,08 \cdot \left(\frac{w}{2.h} + 0,92 \right) \right] \quad (82)$$

$$v_e = \frac{2.h}{\pi} \cdot \tan^{-1} \left[\frac{\pi}{2 \cdot \frac{w_{eff}}{h}} \cdot \left(\frac{h_2}{h} - 1 \right) \right] \quad (83)$$

On peut introduire les facteurs de remplissage q_1 , q_2 , q_3 et q_4 :

$$q_1 = 1 - \frac{h}{2.w_{eff}} \cdot \ln \left(\frac{\pi}{h} \cdot w_{eff} - 1 \right) - q_4 \quad (84)$$

$$q_2 = 1 - q_1 - q_3 - 2 \cdot q_4 \quad (85)$$

$$q_3 = \frac{1}{2} \cdot \frac{h-v_e}{w_{eff}} \cdot \ln \left[\pi \cdot \frac{w_{eff}}{h} \cdot \frac{\cos\left(\frac{v_e \pi}{2 \cdot h}\right)}{\pi \cdot \left(\frac{h_2}{h} \cdot \frac{1}{2}\right) + \frac{v_e \pi}{2 \cdot h}} + \sin\left(\frac{v_e}{2} \cdot \frac{\pi}{h}\right) \right] \quad (86)$$

$$q_4 = \frac{h}{2.w_{eff}} \cdot \ln \left(\frac{\pi}{2} - \frac{h}{2.w_{eff}} \right) \quad (87)$$

Ces facteurs donnent une permittivité intermédiaire effective de :

$$\begin{aligned} \varepsilon_{eff} = & \varepsilon_{r1} \cdot q_1 + \varepsilon_{r1} (1 - q_1)^2 \cdot [\varepsilon_{r2}^2 \cdot q_2 \cdot q_3 + \varepsilon_{r2} \cdot \varepsilon_{r3} \cdot (q_2 \cdot q_4 + (q_3 + q_4)^2)] \\ & \cdot [\varepsilon_{r2}^2 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot q_4 + \varepsilon_{r1} \cdot (\varepsilon_{r2} \cdot q_3 + \varepsilon_{r3} \cdot q_4) \cdot (1 - q_1 - q_4)^2 + \varepsilon_{r2} \cdot \varepsilon_{r3} \cdot q_4 \cdot (q_2 \cdot q_4 + (q_3 + q_4)^2)]^{-1} \end{aligned} \quad (88)$$

On peut ainsi obtenir la permittivité relative équivalente du substrat équivalent sous le patch qui vaut :

$$\varepsilon'_r = \frac{2 \cdot \varepsilon_{eff} - 1 + A}{1 - A} \quad (89)$$

Avec

$$A = \left(1 + \frac{10 \cdot h}{w_{eff}} \right)^{-1/2} \quad (90)$$

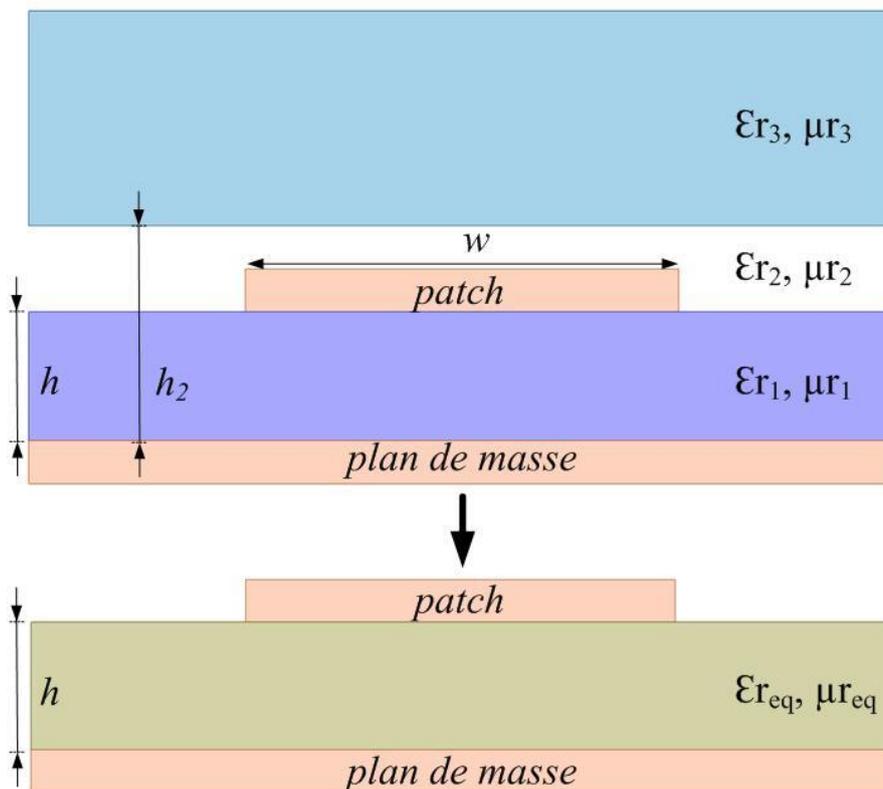


Figure 2.94 - Représentation des différents paramètres permettant de calculer un substrat équivalent

Il est ainsi possible de déterminer par avance les variations en fréquence des résonances de nos absorbants à métamatériaux induites par les différents superstrats que nous allons utiliser. Pour les absorbants magnétiques 1 et 2 les résonances ont tendance à descendre en fréquence.

4. Simulations

Pour l'ensemble des simulations, nous réutilisons les structures précédemment réalisées qui fonctionnent dans la même gamme de fréquence que nos absorbants magnétiques. Ces structures sont particulièrement bien adaptées pour être utilisées dans le cadre de cette étude. Les résultats sont présentés dans le même ordre qu'ils sont présentés précédemment dans cette thèse.

a. Fallahi

Dans un premier temps, la structure unité inspirée des travaux d'A. Fallahi (rappelé dans la figure 2.95) est couplée à l'absorbant magnétique 1. La simulation de l'empilement est comparée à l'absorbant magnétique 1 seul dans la figure 2.96. Le couplage des deux absorbant fonctionne bien. On observe très clairement un décalage du fonctionnement de l'absorbant magnétique 1 vers les basses fréquences et un pic important d'absorption à 4,9 GHz avec 99,9% d'absorption. La bande d'absorption obtenue avec le couplage absorbant à métamatériaux et absorbant magnétique 1 couvre la même bande que si l'on faisait évoluer de façon proportionnelle les épaisseurs de l'absorbant magnétique 1 seul pour atteindre 2,4 mm. Avec cette épaisseur, l'absorbant magnétique 1 pèse 9,6 kg/m² alors que l'absorbant hybride pèse 10,6 kg/m². Dans ce cas, il n'y a pas de gain de masse si l'on utilise l'absorbant que nous avons créé par rapport à un absorbant magnétique. L'absorbant hybride est plus épais avec 3,197 mm que l'absorbant magnétique équivalent.

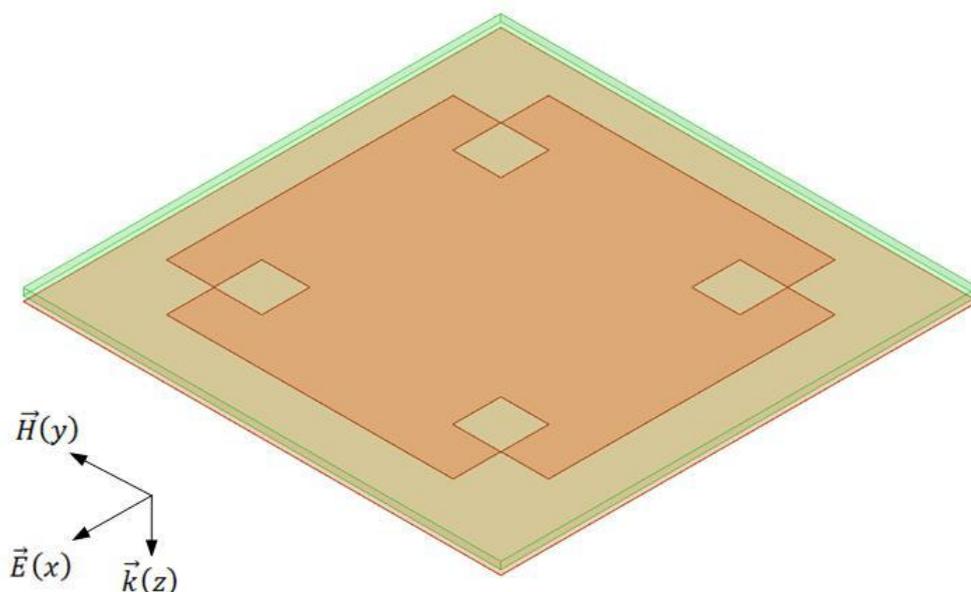


Figure 2.95 - Rappel de la modélisation 3D d'une cellule unité d'un absorbant de type Fallahi

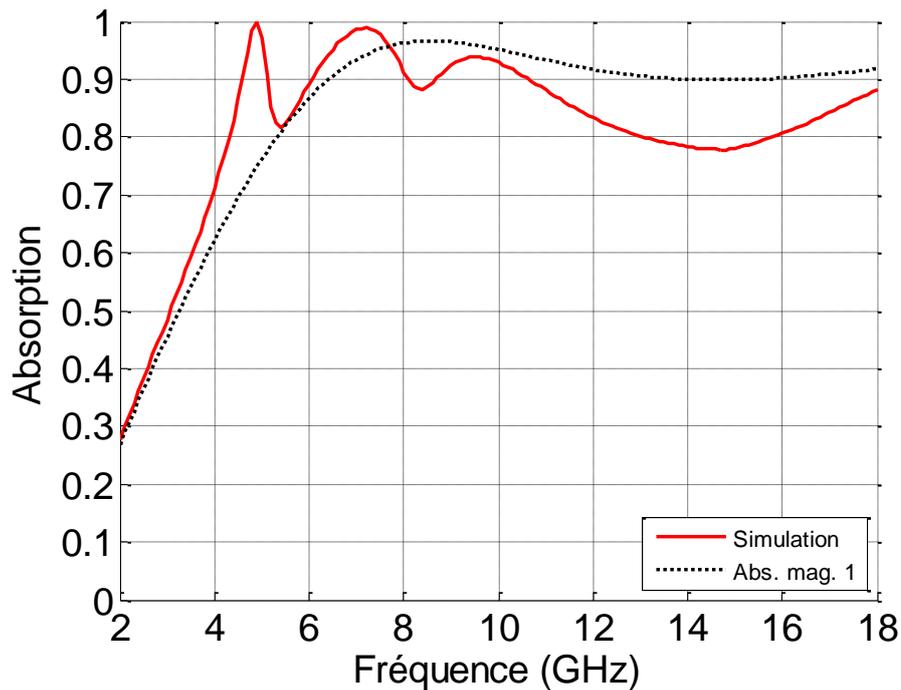


Figure 2.96 - Comparaison de l'absorption de l'empilement Fallahi/absorbant magnétique 1 et de l'absorbant magnétique 1 seul

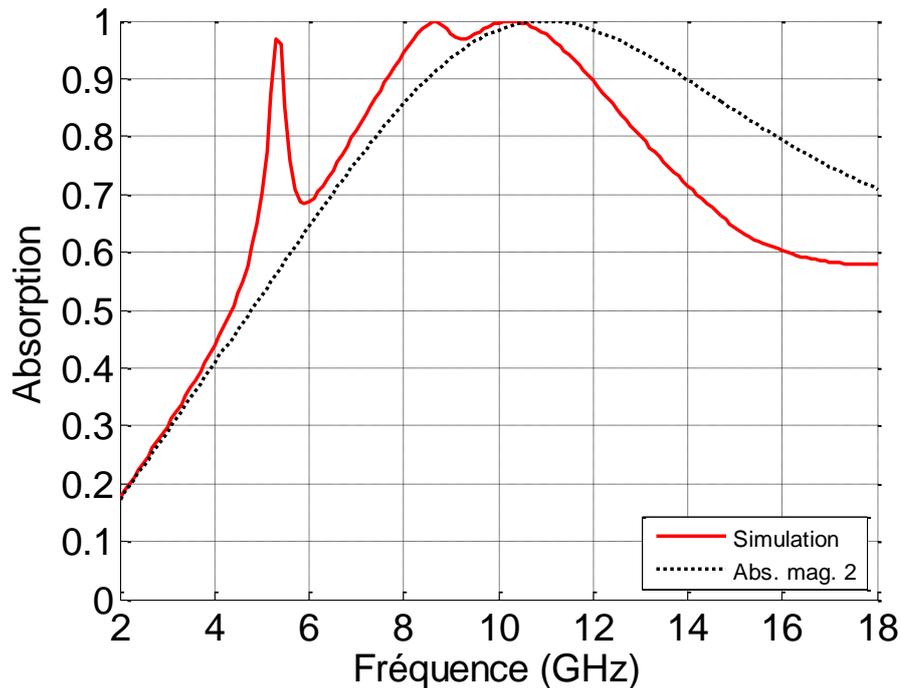


Figure 2.97 - Comparaison de l'absorption de l'empilement Fallahi/absorbant magnétique 2 et de l'absorbant magnétique 2 seul

Pour la simulation d'un absorbant composé de l'absorbant à métamatériaux de type Fallahi et de l'absorbant magnétique 2 (figure 2.97), on observe également un décalage de la bande de fonctionnement vers les basses fréquences. Un pic d'absorption très important fait également son apparition à 5,3 GHz. Ce pic a une absorption de l'ordre de 96,8 %. Avec cet absorbant, l'absorption atteint même 99,98 % au plus fort de la bande d'absorption (à 10,2 GHz). Pour comparaison, la

bande d'absorption du matériau hybride correspond à la l'absorption du matériau magnétique 2 s'il faisait 2 mm d'épaisseur, soit 8 kg/m^2 . Notre structure est plus légère et ne fait que $7,7 \text{ kg/m}^2$ mais par contre elle est plus épaisse avec ces 2,467 mm.

Ce deuxième résultat de simulation est intéressant. Il montre que l'on peut obtenir des matériaux absorbants moins massifs et en gardant la même allure d'absorption que les absorbants magnétiques par l'utilisation d'absorbants hybrides constitués d'absorbant à métamatériaux et d'absorbant magnétique. Par contre, l'épaisseur de notre empilement est supérieure à celle de l'absorbant magnétique équivalent (+23%). Aussi, notre absorbant hybride présente un pic d'absorption supplémentaire par rapport à l'absorbant magnétique. L'allure de l'absorption que nous créons a une configuration inédite.

Ces résultats sont encourageants, nous avons donc simulé les autres structures d'absorbant à métamatériaux pour voir si des améliorations plus flagrantes sont possibles.

b. BigG

La seconde structure, développée à l'IEF, est inspirée de FSS (rappel en figure 2.98). Une fois couplée avec l'absorbant magnétique 1, l'absorption est telle que dans la figure 2.99. Dans cette simulation, on observe un décalage en fréquence de la bande de fonctionnement vers les basses fréquences et l'apparition de deux pics d'absorption à 3,3 GHz et 4,4 GHz. Le résultat est assez intéressant, il présente malgré cela une dégradation des performances au delà de 8 GHz. Comme pour la structure Fallahi et l'absorbant magnétique 1, l'allure de la courbe obtenue correspond à celle d'un absorbant magnétique 1 d'environ 2,4 mm d'épaisseur, si l'on ne considère pas les deux pics d'absorption à 3,3 et 4,4 GHz. Ainsi, cette absorbant hybride n'est encore une fois ni intéressant pour son épaisseur ni pour sa masse par rapport à un absorbant magnétique. Par contre, la forme de l'allure de son absorption peut être intéressante.

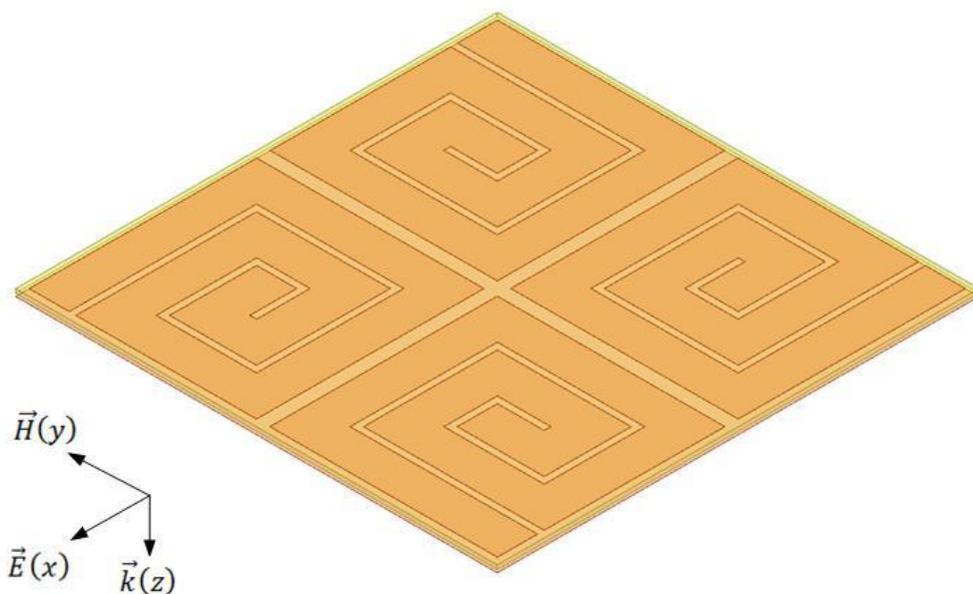


Figure 2.98 - Rappel de la modélisation 3D d'une cellule unité d'un absorbant de type BigG

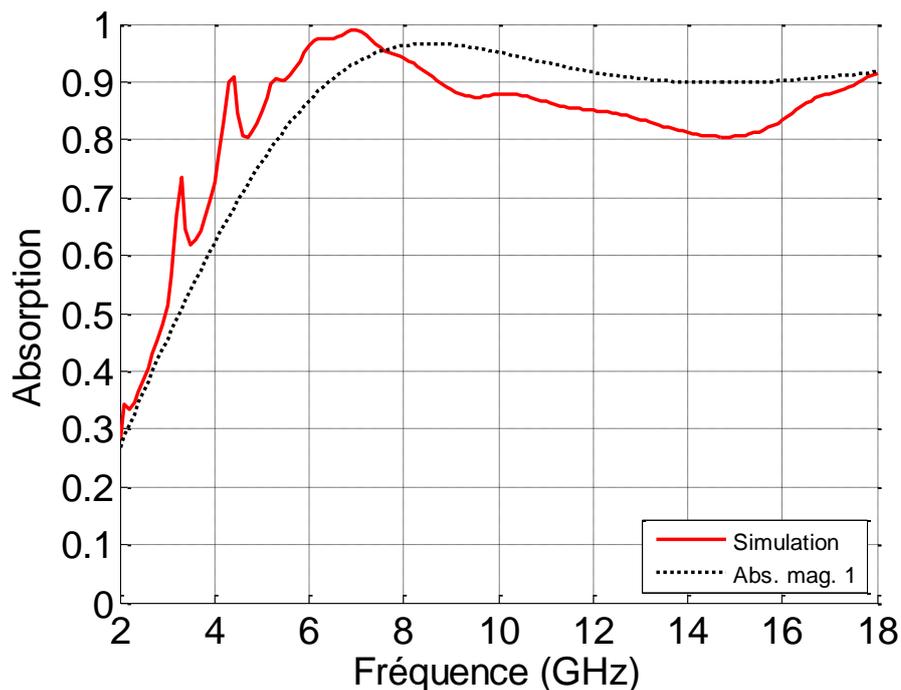


Figure 2.99- Comparaison de l'absorption de l'empilement BigG/absorbant magnétique 1 et de l'absorbant magnétique 1 seul

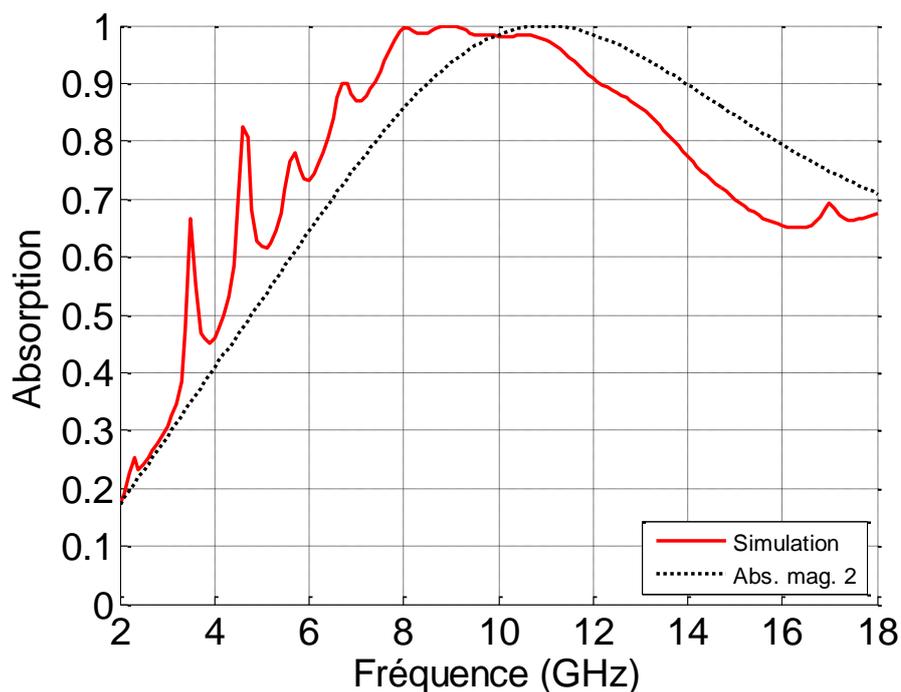


Figure 2.100- Comparaison de l'absorption de l'empilement BigG/absorbant magnétique 2 et de l'absorbant magnétique 2 seul

L'absorption de la structure BigG avec l'absorbant magnétique 2 est très bonne (figure 2.100). La bande d'absorption descend fortement en fréquence et affiche des performances proches de l'absorbant magnétique 2 s'il faisait une épaisseur de 2,3 mm. De plus on retrouve plusieurs pics d'absorptions supplémentaires à 3,5 GHz, 4,6 GHz, 5,7 GHz et 6,8 GHz. Nous avons donc au niveau de l'épaisseur un matériau qui se rapproche un peu plus de son équivalent en absorbant magnétique pur avec 2,467 mm et 2,3 mm respectivement.

Le couplage structure BigG avec absorbant magnétique donne des résultats intéressants et différents de ce que l'on avait avec le couplage structure Fallahi et absorbant magnétique. Les allures des courbes sont différentes et on observe facilement la contribution qu'apporte les absorbant à métamatériaux. Voyons l'allure de l'absorption pour la structure suivante.

c. CrossRoll Fallahi

Quand on couple cette structure à métamatériaux (figure 2.101) avec l'absorbant magnétique 1, nous obtenons le résultat de la figure 2.102. L'empilement des absorbants donne un résultat intéressant pour le déplacement de la bande de fonctionnement. On observe également la dégradation des performances entre 7 et 14 GHz. Le premier pic d'absorption de l'absorbant à métamatériaux se retrouve autour de 4,4 GHz pour une absorption de 80 %. La bande se situe autour de 6,5 GHz avec un maximum de 99,84% d'absorption. Ce type de fonctionnement est une bonne illustration du type de résultats que nous souhaitons atteindre pour démontrer la possibilité d'amélioration des matériaux absorbants existant par l'adjonction d'absorbant à métamatériaux. Néanmoins, il est difficile de comparer ces résultats avec l'absorbant magnétique 1 seul car l'allure est très différente.

Pour la création d'un absorbant hybride CrossRoll Fallahi/absorbant magnétique 2, nous avons l'absorption de la figure 2.103. On observe un fonctionnement assez similaire d'avec le matériau absorbant 1 à savoir le déplacement de la bande de fonctionnement vers les basses fréquences tout en gardant bien le pic et la bande d'absorption observés sur l'absorbant à métamatériaux. Les performances générales de l'absorbant sont moins bonne également avec un maximum d'absorption de 91,2 % d'absorption à 7,8 GHz. La dégradation importante des performances sur une bande est présente, entre 8 et 14 GHz. Nous ne pouvons pas vraiment comparer cette structure avec une épaisseur importante d'absorbant magnétique 2 car les allures d'absorption ne concordent pas mais on observe clairement la contribution de la métasurface.

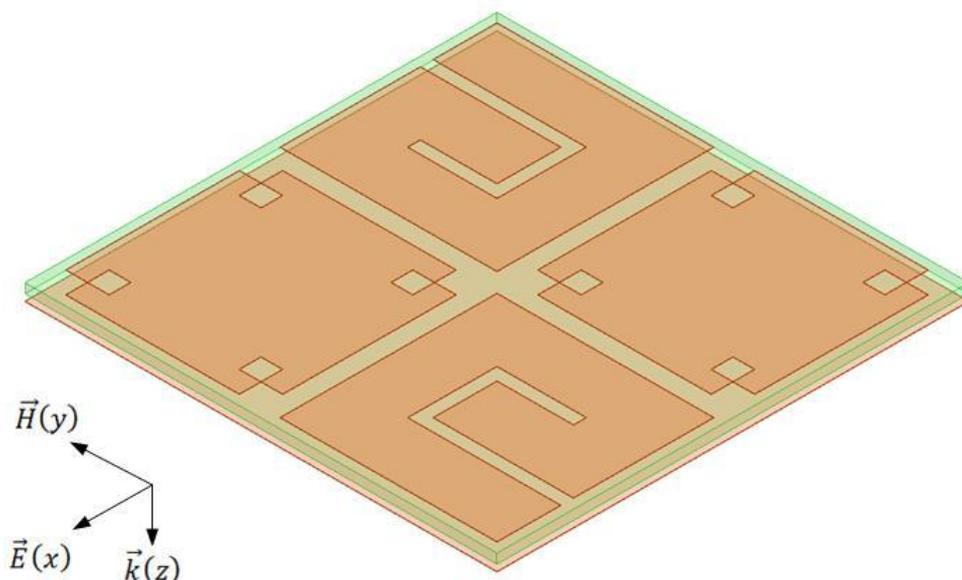


Figure 2.101 - Rappel de la modélisation 3D d'une cellule unité d'un absorbant de type CrossRoll Fallahi

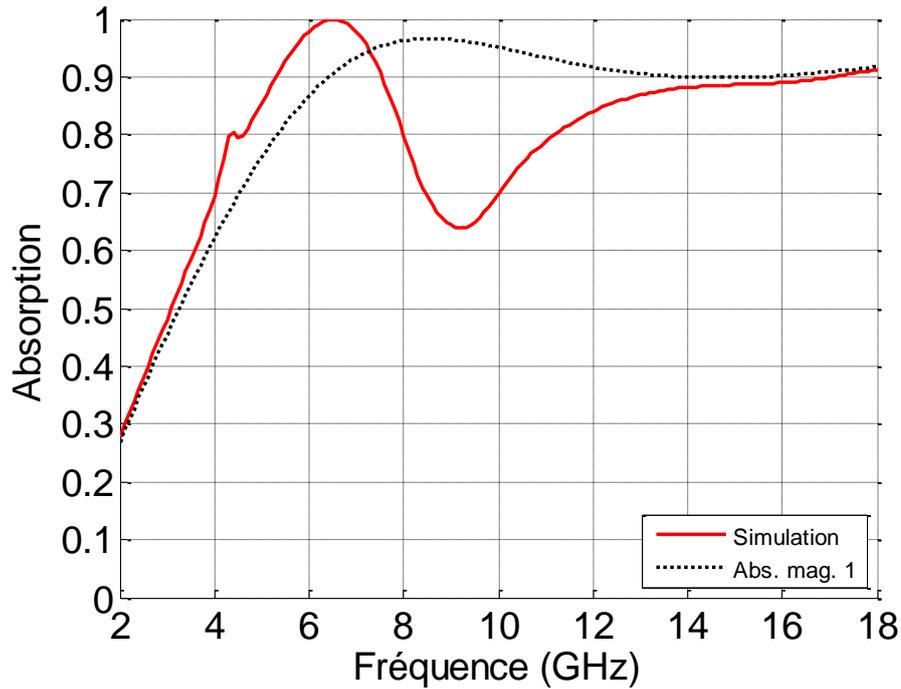


Figure 2.102 - Comparaison de l'absorption de l'empilement CrossRoll Fallahi/absorbant magnétique 1 et de l'absorbant magnétique 1 seul

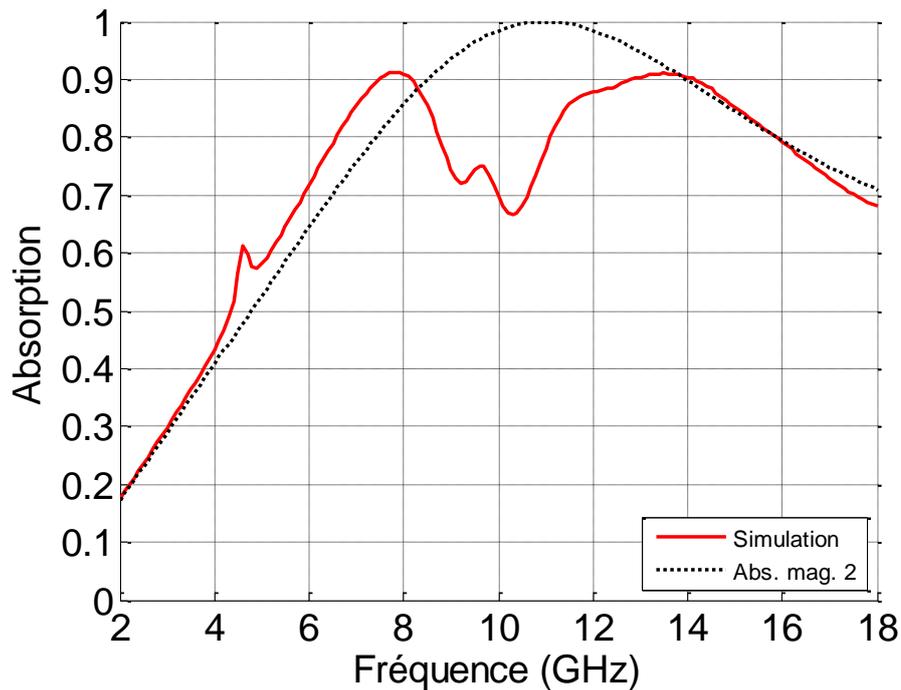


Figure 2.103 - Comparaison de l'absorption de l'empilement CrossRoll Fallahi/absorbant magnétique 2 et de l'absorbant magnétique 2 seul

Dans les deux cas avec cette structure, les matériaux hybride créés changent radicalement le fonctionnement de l'absorbant magnétique avec lesquels la structure est couplée. Ces matériaux sont inédits et peuvent correspondre à de nouvelles applications. Continuons notre étude par la structure MultiCross.

d. MultiCross

L'absorption en simulation de l'empilement de cette structure (figure 2.104), qui présente un premier pic d'absorption suivi d'une bande d'absorption, avec l'absorbant magnétique 1 donne un bon résultat (figure 2.105). On observe le décalage en fréquence de la bande d'absorption. Le premier pic d'absorption se retrouve autour de 5,4 GHz avec une absorption de l'ordre de 99,95 % et la bande d'absorption principale est centrée autour de 7 GHz pour une absorption de 99,64 %. Comme pour la structure CrossRoll Fallahi l'allure finale de l'absorption est très différente de ce que l'on a pour l'absorbant magnétique 1 seul.

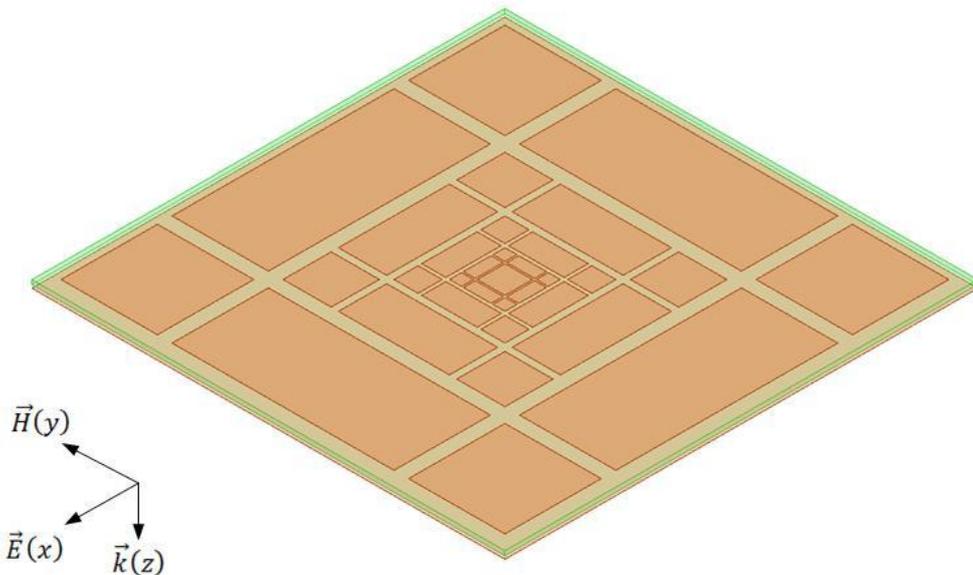


Figure 2.104 - Rappel de la modélisation 3D d'une cellule unité d'un absorbant de type MultiCross

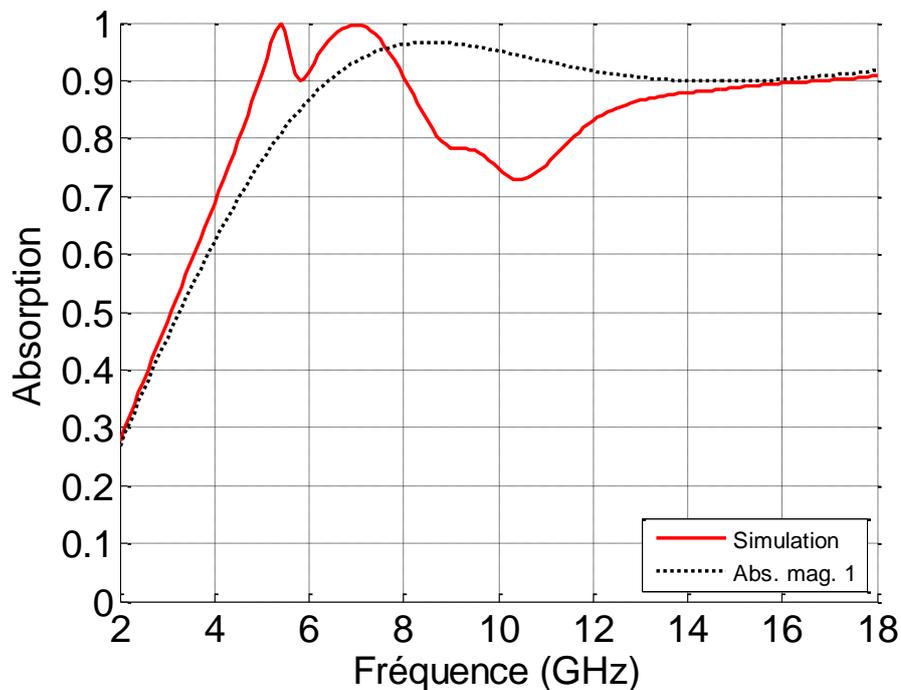


Figure 2.105 - Comparaison de l'absorption de l'empilement MultiCross/absorbant magnétique 1 et de l'absorbant magnétique 1 seul

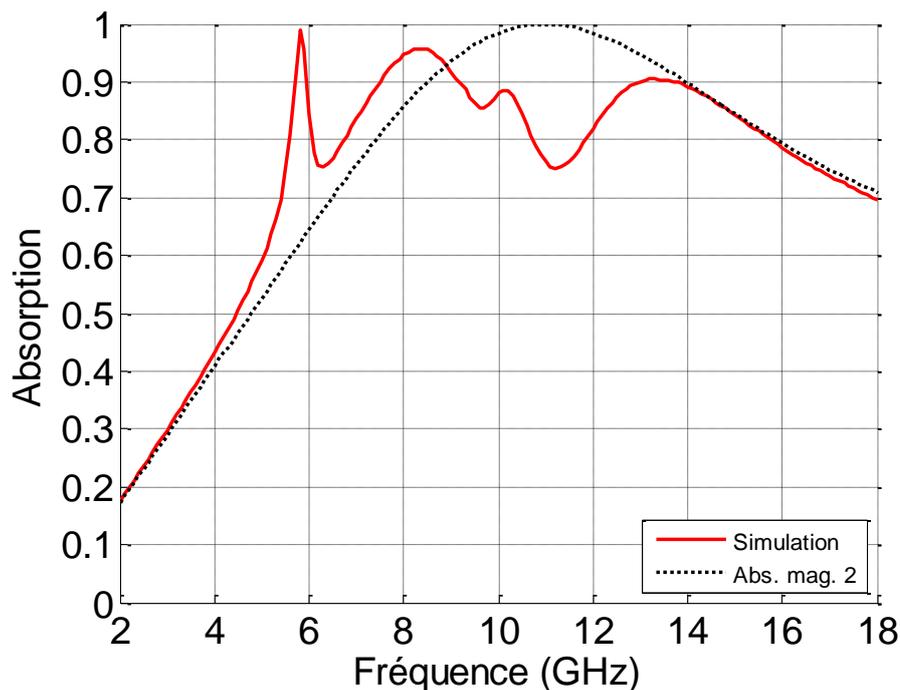


Figure 2.106 - Comparaison de l'absorption de l'empilement MultiCross/absorbant magnétique 2 et de l'absorbant magnétique 2 seul

La simulation qui résulte de l'empilement avec le matériau magnétique 2 donne l'absorption en figure 2.106. Même si l'absorbant à métamatériaux n'a pas été développé pour fonctionner avec cet absorbant magnétique, on voit très clairement l'influence qu'il a sur ce dernier. Ainsi, on obtient un premier pic d'absorption à 5,8 GHz avec 98,8 % d'absorption et une bande d'absorption issue de l'absorbant à métamatériaux centré autour de 8,4 GHz à 95,8 % d'absorption. L'influence de l'absorbant à métamatériaux est fortement marquée dans cette simulation avec le pic suivi de la bande d'absorption. Il n'est pas possible de comparer cet absorbant hybride avec un absorbant magnétique 2 d'épaisseur supérieure. Dans ce cas, on crée un matériau absorbant complètement nouveau.

Pour cette étude sur le couplage des absorbants magnétiques nous avons également réalisé la simulation pour la dernière structure présentée, la structure MultiPatches.

e. MultiPatches

Ce dernier absorbant à métamatériaux (rappelé en figure 2.107), constitué de patches circulaires, imite le fonctionnement de la structure MultiCross. Il est constitué de moins de métal que ce dernier et peut donc présenter une absorption différente quand il est empilé avec les absorbants magnétiques.

Si l'on couple cet absorbant à métamatériaux avec l'absorbant magnétique 1 en simulation, l'absorption est telle que dans la figure 2.108. L'absorption de cet empilement est quasiment identique à ce que l'on a observé avec la structure MultiCross. Le fait que cette structure contienne moins de métal ne modifie pas la contribution de notre métasurface.

Dans le cas pour l'empilement avec l'absorbant magnétique 2 (figure 2.109), on obtient des résultats proches de ce que l'on a avec MultiCross. On observe le pic suivi de la bande d'absorption qui créé un décalage en fréquence de l'absorption. Comme pour les deux cas précédent, il est difficile de quantifier la diminution de masse de la structure vis-à-vis d'un absorbant magnétique car l'allure de l'absorption que nous obtenons est tout à fait inédite.

Les allures d'absorption des structures MultiCross et MultiPatches sont proches. La structure MultiPatches contient moins de métal, c'est ce qui a motivé notre souhait de réaliser des simulations et des mesures dans le chapitre suivant. Cette structure reste intéressante au même titre que les autres car elle permet de créer un nouveau type d'absorbant avec des propriétés originales.

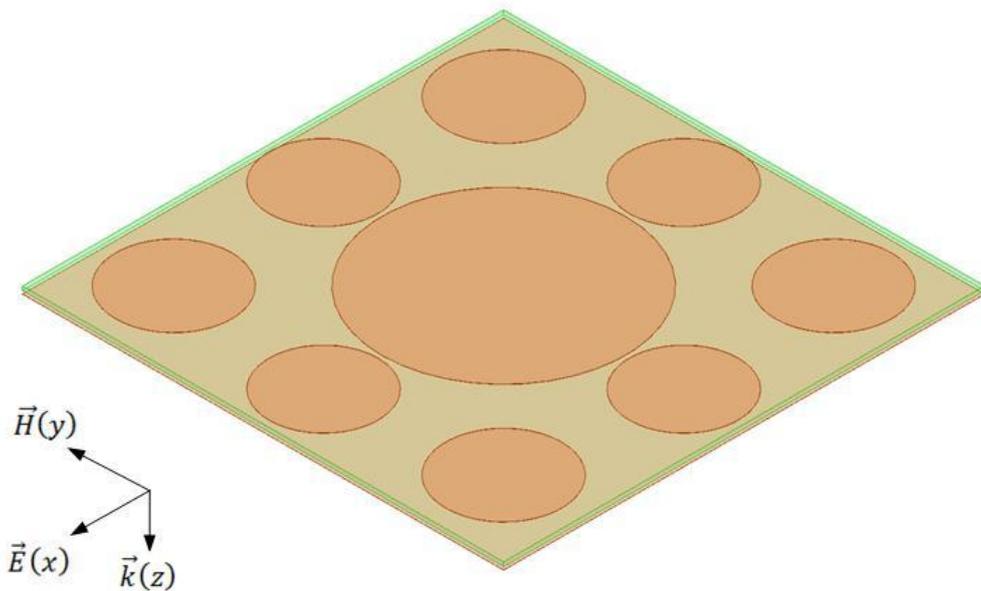


Figure 2.107 - Rappel de la modélisation 3D d'une cellule unité d'un absorbant de type MultiPatches

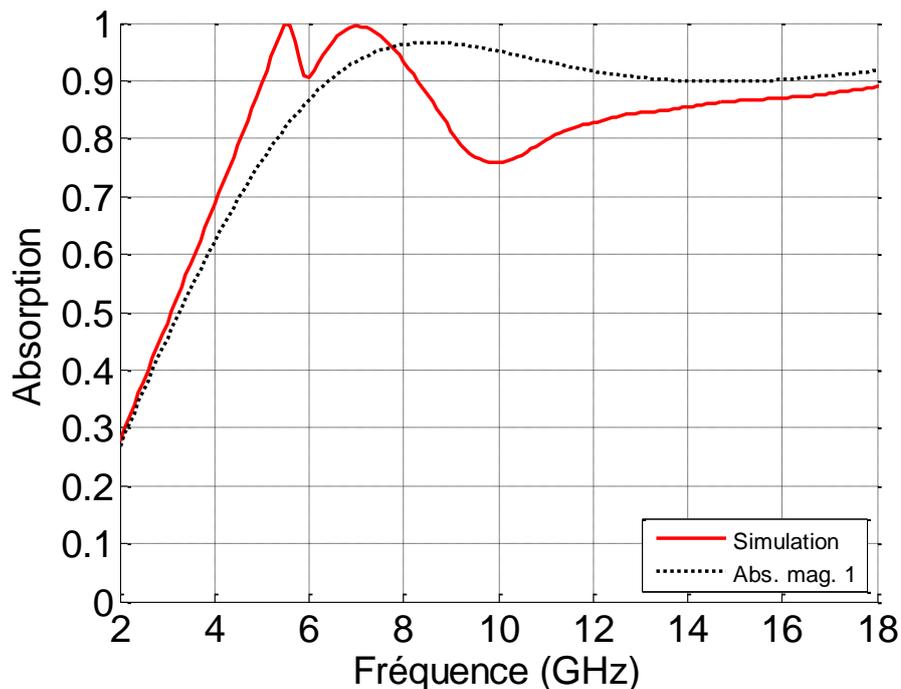


Figure 2.108 - Comparaison de l'absorption de l'empilement MultiPatches/absorbant magnétique 1 et de l'absorbant magnétique 1 seul

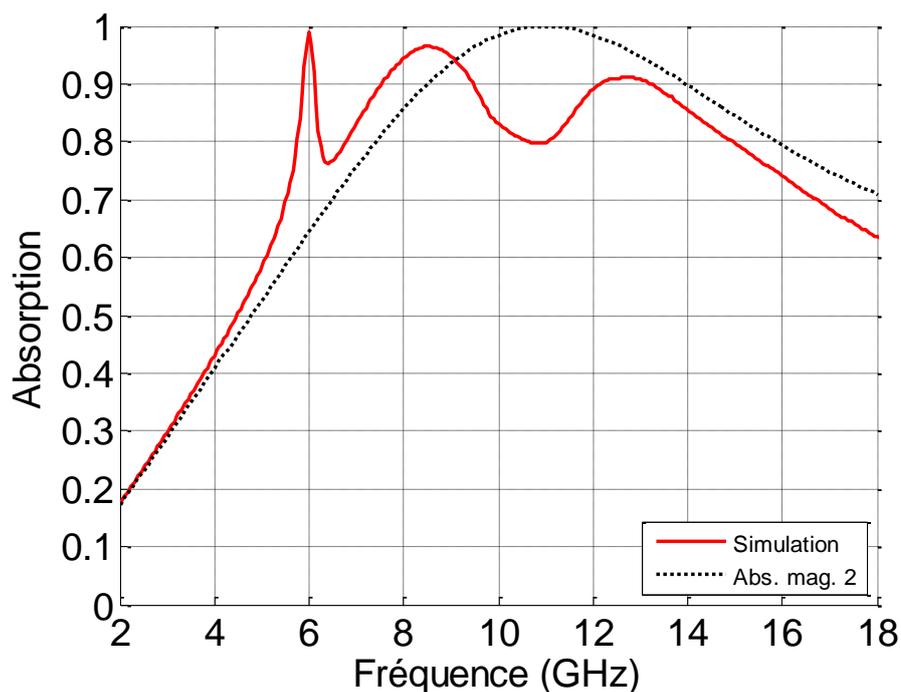


Figure 2.109 - Comparaison de l'absorption de l'empilement MultiPatches/absorbant magnétique 2 et de l'absorbant magnétique 2 seul

5. Conclusion sur le couplage d'absorbants

Mélanger les absorbants à métamatériaux et les absorbants magnétiques est quelque chose de tout à fait nouveau. Ces deux technologies permettent indépendamment d'obtenir des structures petites devant la longueur d'onde mais avec des caractéristiques différentes. Les absorbants magnétiques sont large bande mais très denses alors que les absorbants à métamatériaux peuvent être constitués de matériaux plus légers et ont une bande étroite. Le couplage de ces deux types d'absorbant permet la création d'absorbants inédits pouvant soit être plus légers que les absorbants magnétiques avec une épaisseur légèrement plus importante pour des performances équivalentes (ce que nous avons vu avec les structures Fallahi et BigG) ou soit créer des absorbants avec courbes d'absorption originales (observé avec les structures CrossRoll Fallahi, MultiCross et MultiPatches). Ce type de structure innovante peut donc servir à de nouvelles applications nécessitant plus de légèreté ou des fréquences d'absorption ciblées.

VII. Conclusion sur les simulations et les modèles théoriques

Les résultats de simulations présentés tout au long de ce chapitre montrent seulement une partie des simulations qui ont été réalisées mais sont représentatifs des recherches entreprises dans le but de développer et comprendre le fonctionnement de nouveaux matériaux absorbants.

La voie des métamatériaux pour la réalisation d'absorbants est une idée tout à fait cohérente. Les métamatériaux présentent l'avantage de pouvoir créer des structures très petites devant la longueur d'onde dans la direction de propagation. Dans notre cas, l'aspect métamatériau est à considérer selon l'épaisseur des structures réalisées. Dans les exemples proposés, nous utilisons des substrats d'époxy FR4, qui est un matériau courant et facile à manipuler. Il est possible de réduire encore plus la taille des structures en fonction de la fréquence en utilisant des matériaux avec un indice de réfraction supérieur.

Nous avons réalisé des simulations d'absorbants à métamatériaux. De ces simulations, nous avons mis en évidence une méthode de calcul de la fréquence de fonctionnement et une méthode d'optimisation du niveau d'absorption. Elles s'appliquent aux métamatériaux de type patchs carrés, rectangles et circulaires. Ainsi, nous sommes en mesure de créer un absorbant qui absorbe totalement une onde incidente à une fréquence choisie. L'optimisation de la bande passante de ces absorbants est possible par deux techniques que nous avons présentées et qui consistent à utiliser plusieurs résonances proches en fréquences. Ces optimisations complexifient la conception de métamatériaux absorbants. Nous avons vu que ces absorbants sont sensibles à l'angle d'incidence avec lequel l'onde arrive sur la surface. Il faut donc prêter une attention toute particulière à l'utilisation qui sera faite de ces absorbants si l'on souhaite les exploiter. Quatre structures ont été conçues et simulées en prévision de leur fabrication. Une cinquième structure a été développée pour illustrer notre capacité à créer des structures selon un cahier des charges précis (dupliquer le fonctionnement d'un autre absorbant). Nous avons simulé un empilement d'absorbants à métamatériaux identiques pour mettre en évidence que ce type de structure n'améliore pas forcément les performances en absorption. La modification de l'espacement de la métasurface avec son plan de masse permet de montrer qu'il est possible de faire évoluer la fréquence de fonctionnement et le niveau d'absorption après fabrication d'un prototype. Nous avons montré que les absorbants à métamatériaux fonctionnent quand ils sont conformés. Enfin nous avons étudié nos structures d'absorbant à métamatériaux couplées avec des absorbants magnétiques pour créer un nouveau type d'absorbant capable de couvrir des bandes d'absorption inédites.

Dans le chapitre suivant, nous étudions les différentes mesures qui ont été faites sur les prototypes d'absorbant à métamatériaux et les comparons aux simulations de ce chapitre. Les mesures sont une étape essentielle pour faire évoluer notre compréhension de la conception d'absorbant à métamatériaux.

CHAPITRE III : REALISATIONS ET MESURES

I. Introduction aux réalisations et aux mesures

1. But des mesures

Les différents prototypes que nous avons réalisés, à partir des simulations précédemment présentées, sont étudiés dans ce chapitre. Les comparaisons mesures/simulations ont permis d'ajuster nos protocoles de simulations progressivement pour améliorer les prototypes.

L'ensemble des mesures que nous avons effectuées pour la conception d'absorbants à métamatériaux durant la thèse sont décrites ci-après.

2. Procédure de réalisation et de mesure

Pour l'ensemble des réalisations, la procédure de fabrication est identique. Les couches d'absorbants à métamatériaux sont réalisées par une société extérieure à l'aide d'une graveuse laser. Nous utilisons pour nos réalisations des substrats en époxy FR4 de 0,3 mm d'épaisseur. La faible valeur de l'épaisseur a été sélectionnée pour obtenir un matériau souple. La métallisation se fait avec du cuivre de 17 μm . Les prototypes ont une taille de 300 mm par 300 mm pour s'adapter aux supports dont nous disposons. Pour la réalisation, nous devons fournir les différents plans à fabriquer au format gerber (*.gbr) que nous réalisons à l'aide de l'outil CADSoft EAGLE PCB Design Software⁸¹. Dans le cadre de certaines réalisations, nous avons fourni des plans au format Drawing eXchange Format (*.dxf) réalisés à l'aide de DraftSight⁸². Nous ne faisons pas fabriquer nos prototypes avec un plan de masse intégré. Nous utilisons un plan métallique sur lequel nous venons coller nos réalisations. De cette façon, nous avons plus de flexibilité dans le type de montage que nous souhaitons faire. Ce choix nous impose d'utiliser de la colle ou un adhésif pour fixer la structure sur le plan de masse. Cette épaisseur supplémentaire est prise en compte dans les simulations par l'ajout d'un espace vide de 0,2 mm entre le plan de masse et le substrat.

Les mesures des absorbants à métamatériaux peuvent être réalisées à l'IEF dans la chambre anéchoïque de l'équipe. Nous avons eu recours pour une partie des mesures à une chambre anéchoïque d'Airbus Group. Pour obtenir l'absorption de nos matériaux, nous mesurons le paramètre S11 de la structure (selon le schéma de la figure 3.1). La mesure de nos absorbants à métamatériaux se fait uniquement en réflexion car nos structures sont posées sur un plan de masse. Nous obtenons directement l'absorption du matériau par la relation :

$$Abs. = 1 - |S_{11}|^2 \quad (91)$$

Pour mesurer le S11 de la structure, nous utilisons deux antennes placées au plus proche de la normale de la surface à une distance suffisante. Les antennes sont branchées à un analyseur de

réseau qui permet l'observation du comportement de notre absorbant. L'analyseur de réseau de l'IEF est un Agilent 8722ES. Pour la mesure, il est calibré à l'aide d'un kit de calibrage fourni. Une mesure en réflexion à vide et avec le plan métallique servant de plan de masse est réalisée pour permettre de corriger les mesures en post-traitement et supprimer les bruits parasites. Le protocole de mesure d'Airbus Group leur est propre, il est sensiblement identique mais avec un lissage des courbes en post-traitement. Il est possible de faire des mesures en faisant varier la polarisation, pour cela on fait tourner les antennes autour de l'axe z (variation selon φ_z). Pour la mesure avec changement d'angle d'incidence, on applique une rotation des antennes autour de l'axe x (variation selon θ_x) ou autour de l'axe y (variation selon θ_y). Nous utilisons ce type de mesures pour les absorbants à métamatériaux MultiCross et MultiPatches. Une prise de vue sur la chambre anéchoïque utilisée est présentée sur la figure 3.2.

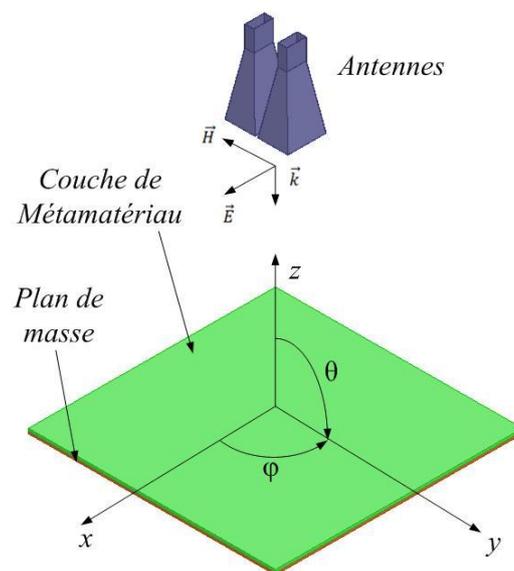


Figure 3.1 - Schéma du montage pour la mesure d'absorbant à métamatériaux

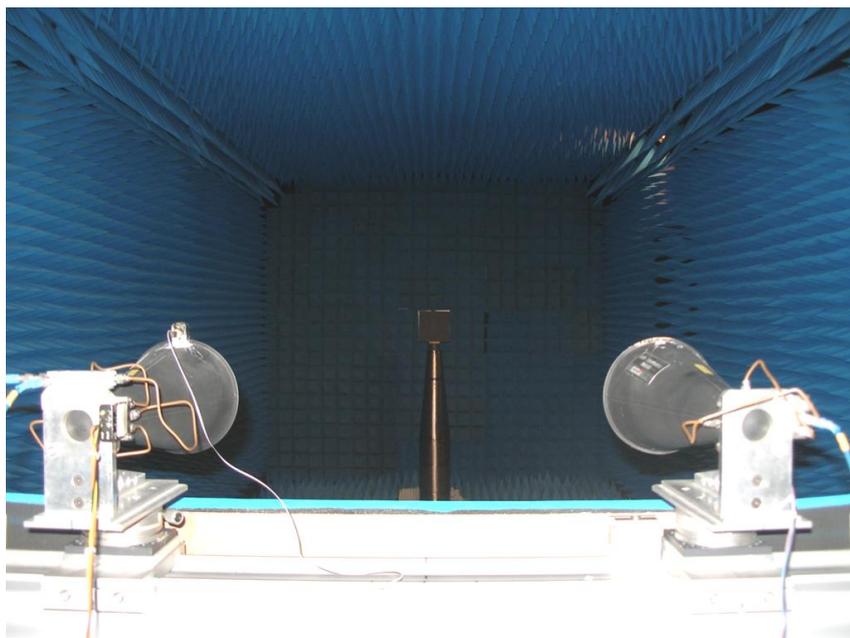


Figure 3.2 - Photo de la chambre anéchoïque utilisée

II. Premières réalisations

1. Introduction

Nous avons fabriqué les premiers prototypes présentés dans le chapitre précédent. Les mesures de ces matériaux ont été faites à la fois à l'IEF et à Airbus Group. Les mesures successives de chacun des matériaux ont permis d'ajuster nos méthodes de simulation et les modèles qui caractérisent ces matériaux. Nous présentons les mesures dans le même ordre que les simulations. Les résultats de simulations sont répétés pour pouvoir comparer si des divergences existent. La première structure qui a été fabriquée est la structure inspirée des travaux d'A. Fallahi.

2. Fallahi

Cette première structure, présentée précédemment (figure 2.63), a une forme particulière issue des travaux sur matériaux absorbants comportant des circuits analogiques de type FSS d'A. Fallahi. Cette structure est proche d'une croix de Jérusalem dont le corps est très large et les branches se touchent en un point. Le prototype, une fois fabriqué, a l'aspect présenté dans la figure 3.3. Une cellule unité seule est comme dans la figure 3.4.

Nous avons pu extraire les paramètres en réflexion de cette structure pour pouvoir tracer l'absorption. La mesure donne les résultats de la figure 3.5.

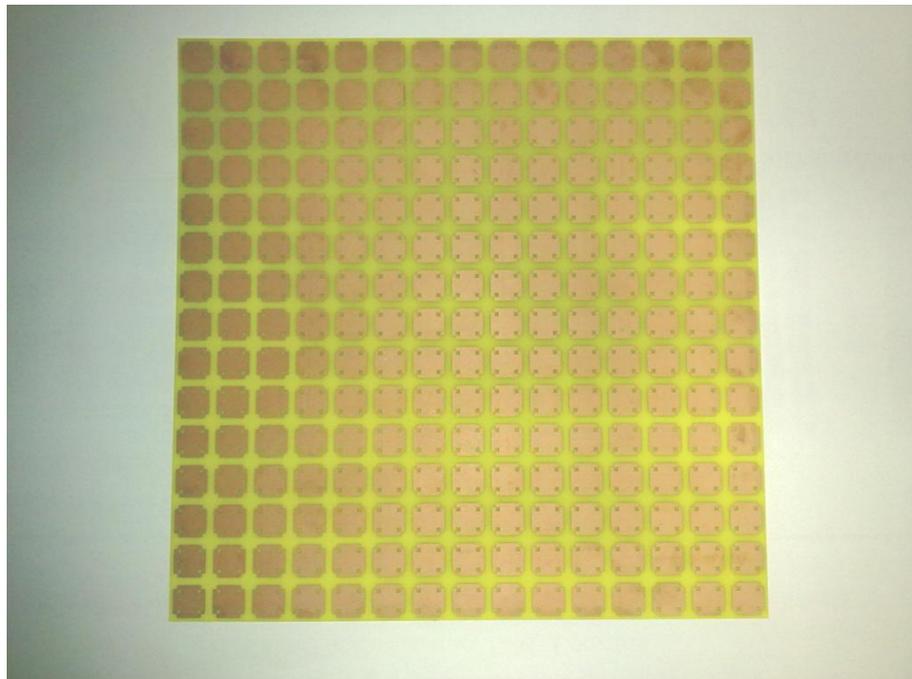


Figure 3.3 - Photo du prototype d'absorbant à métamatériaux de type Fallahi

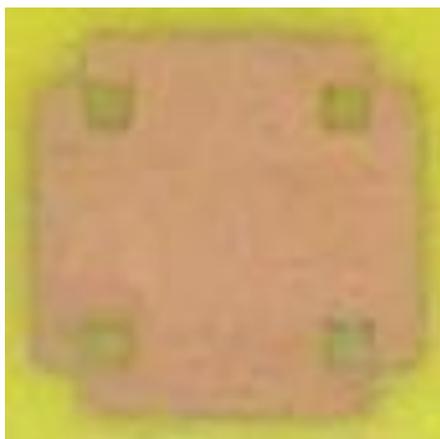


Figure 3.4 - Photo d'une cellule unité du prototype d'absorbant à métamatériaux de type Fallahi

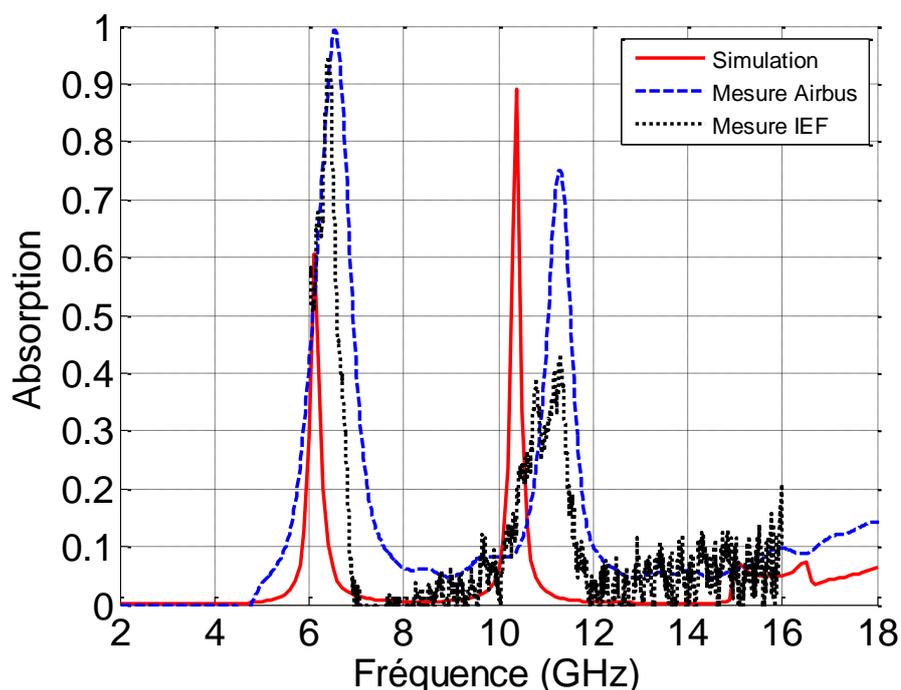


Figure 3.5 - Comparatif de l'absorption simulée, de la mesure à Airbus Group et de la mesure à l'IEF pour l'absorbant à métamatériaux de type Fallahi

Les résultats de simulation et de mesures sont proches, ce qui est un bon point, notre absorbant à métamatériaux fonctionne bien. Nous observons tout de même un léger décalage en fréquence entre la simulation et la mesure. Cela vient de plusieurs facteurs, tout d'abord un écart entre la permittivité simulée et mesurée du FR4 peut exister, l'épaisseur de l'adhésif peut ne pas être régulière et il peut y avoir une légère dérive des côtes à la fabrication. Les performances sont meilleures en mesure qu'en simulation pour le niveau d'absorption à la première résonance. La structure a d'ailleurs une épaisseur de $\lambda/95$ à la première résonance pour une absorption de 99 % en mesure avec la chambre d'Airbus Group et 94 % dans la chambre anéchoïque de l'IEF.

Le but de créer un absorbant à métamatériaux d'épaisseur très petite devant la longueur d'onde est atteint. Les matériaux employés sont courants et la réalisation est facile. A ce moment des réalisations, nous ne maîtrisons pas encore le choix de la fréquence de fonctionnement. Cet absorbant a beaucoup de potentiel. Nous avons cherché à la suite de cette première réalisation une

structure différente afin de confronter les modes de fonctionnements et en déduire des règles de réalisations.

3. BigG

La structure BigG est la seconde structure d'absorbant à métamatériaux que nous avons conçue et fabriquée à l'IEF (figure 2.66). Le design de la cellule unité a été créé à l'IEF et est inspiré de formes issues des FSS. Une fois fabriqué, le prototype est présenté dans la figure 3.6. Une cellule unité seule est donnée dans la figure 3.7.

Nous avons extrait l'absorption de cet absorbant en mesure à Airbus Group ou à l'IEF (figure 3.8). Cette structure présente un nombre important de pics d'absorption contrairement à la structure précédente. Les résultats de simulations et de mesures sont encore une fois assez proches, même si l'on observe un léger décalage en fréquence. Certains pics assez proches en simulation ne forment qu'un seul et unique pic d'absorption en mesure. Le nombre d'arrêtes de tailles différentes sur la structure est directement lié au nombre important de pics d'absorption. C'est ce qui nous a permis d'esquisser le premier rapprochement entre l'aspect géométrique de la structure et la fréquence de fonctionnement. Pour cette structure, les niveaux d'absorption n'atteignent pas l'absorption totale sans pour autant être négligeable. Un artefact sur les mesures d'Airbus Group donne une absorption nulle entre 2,5 et 3 GHz qu'il ne faut pas considérer.

Cette mesure et la précédente étant très différentes, l'une avec une bonne absorption et l'autre avec un nombre de pics d'absorption important, nous avons voulu obtenir un résultat intermédiaire en réalisant la structure suivante.

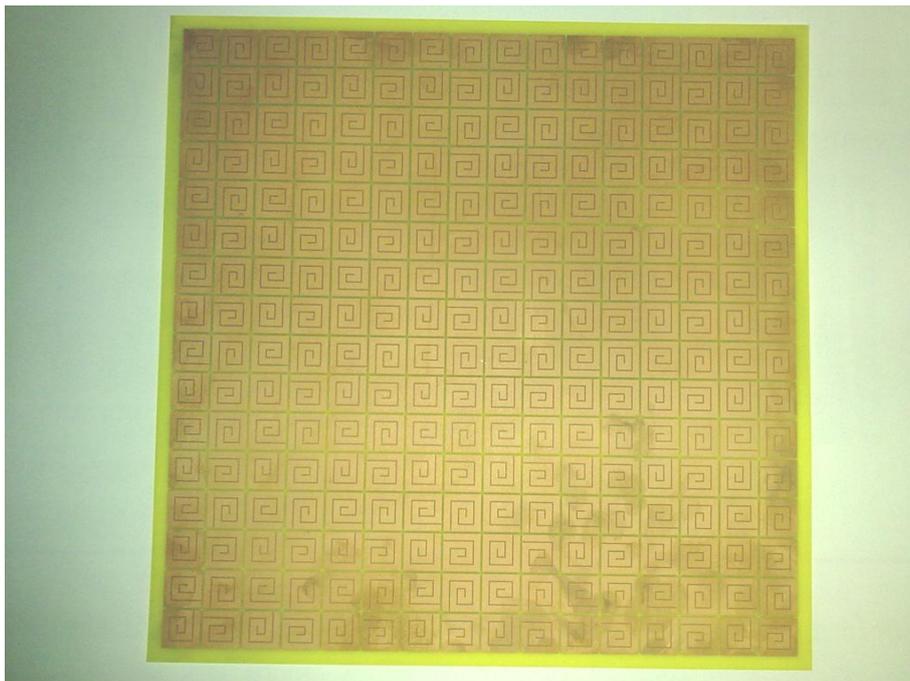


Figure 3.6 - Photo du prototype d'absorbant à métamatériaux de type BigG

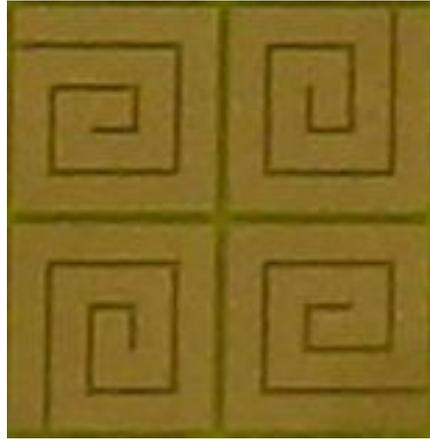


Figure 3.7 - Photo d'une cellule unité du prototype d'absorbant à métamatériaux de type BigG

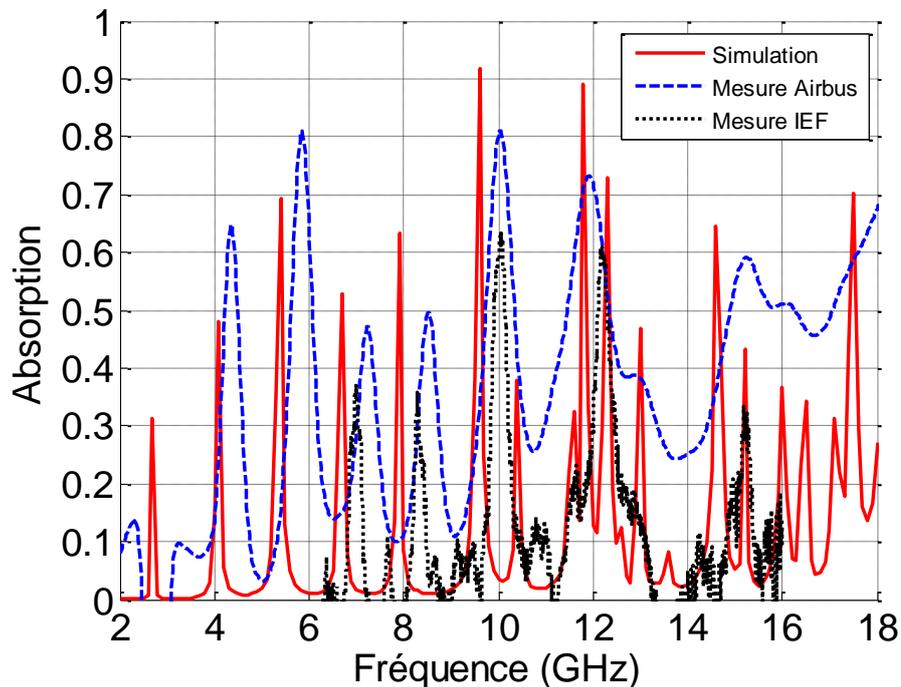


Figure 3.8 - Comparatif de l'absorption simulée, de la mesure à Airbus Group et de la mesure à l'IEF pour l'absorbant à métamatériaux de type BigG

4. CrossRoll Fallahi

Ce prototype (figure 2.69) est un mélange des deux prototypes précédents. Il a été réalisé pour obtenir un résultat intermédiaire entre les deux structures Fallahi et BigG. Une fois réalisé, l'absorbant à métamatériaux est tel que la figure 3.9. Une cellule unité prise seul se présente comme dans la figure 3.10. La structure unité est répétée et tournée de 90° à chaque itération, de façon infinie dans la simulation et 20 fois selon chaque direction pour le prototype.

La figure 3.11 montre l'absorption issue de ce prototype. Dans ce cas, la simulation diverge de la mesure plus que précédemment. Néanmoins, les allures des différentes courbes présentent les pics souhaités. Comme observé pour les précédentes structures, le fonctionnement du prototype est toujours meilleur que prédit par les simulations. On peut observer un artefact sur la mesure d'Airbus

Group entre 2,5 et 3 GHz. Les performances de cet absorbant à métamatériaux sont bonnes et correspondent à nos attentes. Il présente un premier pic à 5,4 GHz peu important et deux pics d'absorption assez proches l'un de l'autre à 11 et 12,85 GHz avec respectivement 96 et 99 % d'absorption sur les mesures d'Airbus Group. A l'IEF, le premier pic à 5,4 GHz est en dessous de la bande mesuré et les deux pics d'absorption très important se situent à 11,26 et 12,93 GHz pour 96 et 96,5 % d'absorption.

Les mesures sur ce prototype montrent que la simulation peut donner une fausse idée de l'absorption que l'on obtiendra en mesure. Dans notre cas, la mesure donne des résultats bien meilleurs que ce que prédisait la simulation. Cette allure de la courbe d'absorption en mesure est intéressante car elle présente un premier pic d'absorption isolé puis un train de pic d'absorption très proche les uns des autres plus haut en fréquence. Ce type de fonctionnement nous a inspiré pour la conception du prototype MultiCross.

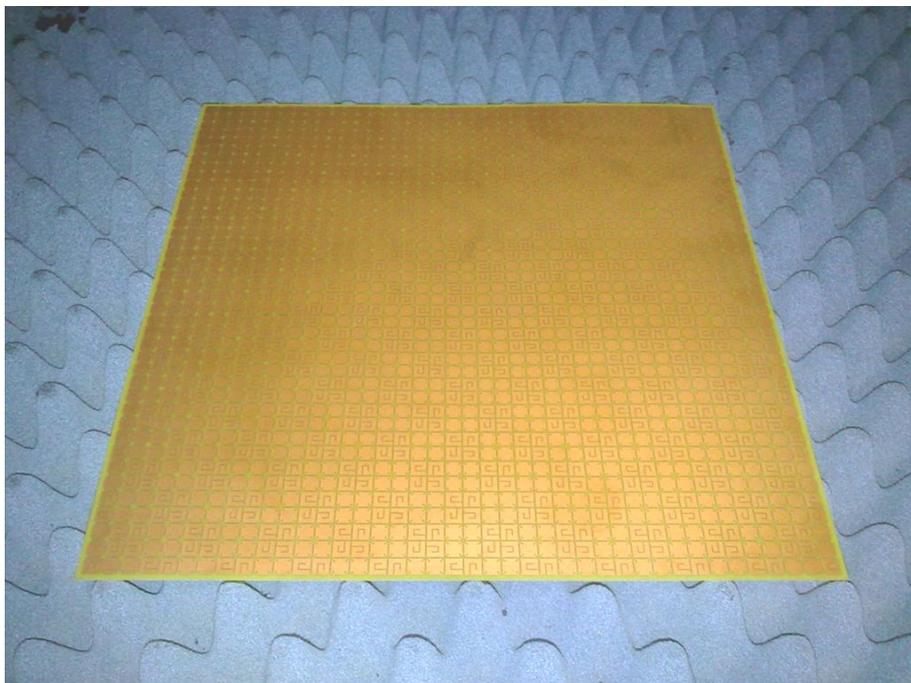


Figure 3.9 - Photo du prototype d'absorbant à métamatériaux de type CrossRoll Fallahi



Figure 3.10 - Photo d'une cellule unité du prototype d'absorbant à métamatériaux de type CrossRoll Fallahi

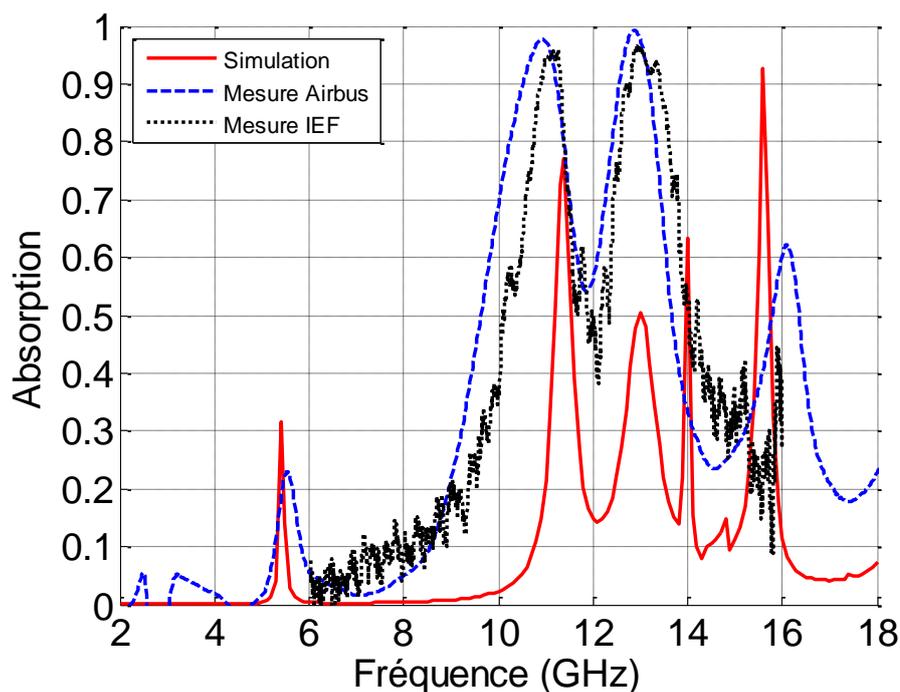


Figure 3.11 - Comparatif de l'absorption simulée, de la mesure à Airbus Group et de la mesure à l'IEF pour l'absorbant à métamatériaux de type CrossRoll Fallahi

5. MultiCross

Pour la conception de ce prototype (figure 2.72), nous avons voulu avoir une absorption très caractéristique avec un pic d'absorption seul suivi d'une bande d'absorption. Ce prototype a été conçu grâce aux modèles que nous avons étudiés dans le chapitre précédent. L'ensemble du processus d'optimisation a été fait en simulation. Avec le prototype fabriqué, on peut comparer si on obtient bien les résultats souhaités. L'absorbant à métamatériaux se présente comme dans la figure 3.12 et une cellule unité seule est exposée dans la figure 3.13. Le prototype correspond géométriquement parfaitement à ce qui a été conçu en simulation.

Nous avons mesuré l'absorption de ce matériau qui donne un résultat de la figure 3.14. La mesure de ce prototype donne un résultat très satisfaisant. On est proche de ce que l'on a en simulation. Malgré un léger décalage en fréquence, on retrouve l'allure de la courbe que nous souhaitons. Le premier pic d'absorption est à 7 GHz sur les deux mesures. L'absorption à ce point est de 98,9 % pour la mesure IEF et de 94,3 % pour la mesure à Airbus Group. La bande d'absorption se retrouve dans les deux cas autour de 13 GHz avec une bande d'absorption large de 3,2 GHz à la mi-hauteur. Pour la bande d'absorption, on atteint 99 % d'absorption dans les deux cas.

Avec cet absorbant, nous atteignons le but souhaité, qui est d'avoir un matériau présentant une large bande d'absorption. De plus, la structure présente un pic d'absorption isolé, c'est à dire que l'absorbant est multi bande. L'allure très caractéristique de l'absorption permet de comparer facilement la mesure et la simulation.

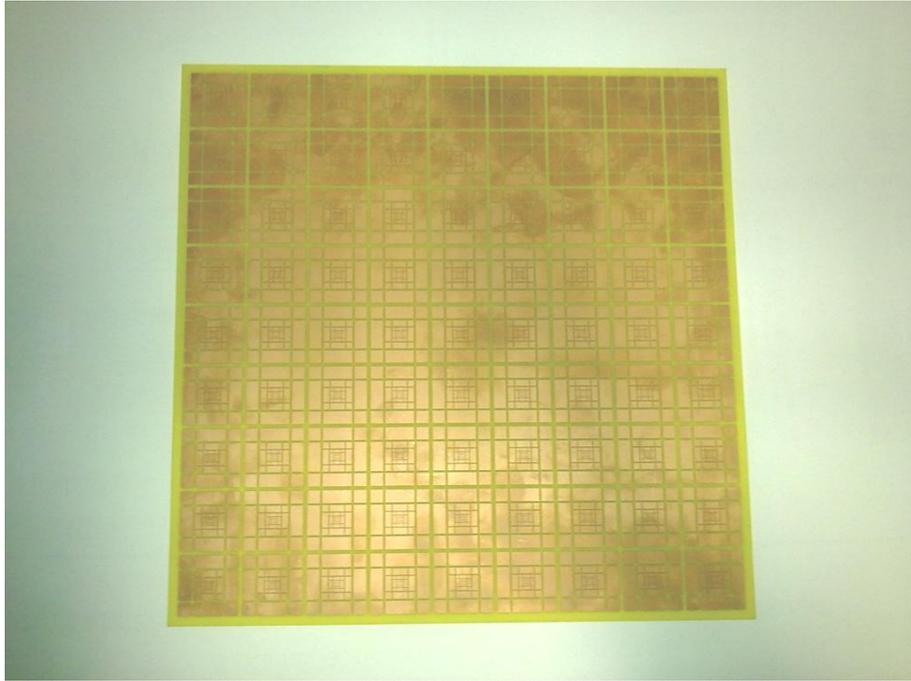


Figure 3.12 - Photo du prototype d'absorbant à métamatériaux de type MultiCross

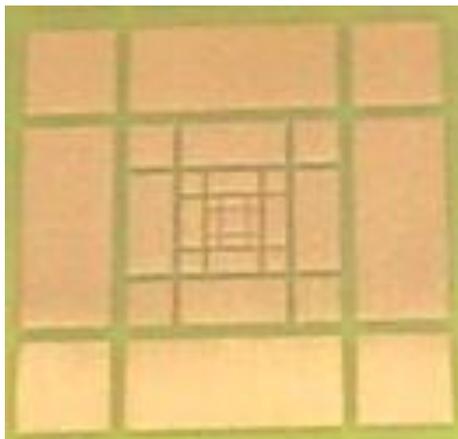


Figure 3.13 - Photo d'une cellule unité du prototype d'absorbant à métamatériaux de type MultiCross

Les performances intéressantes de cet absorbant nous ont poussé à continuer nos investigations sur son fonctionnement. Pour cela, nous avons essayé de faire varier l'angle d'incidence et la polarisation de l'onde incidente afin d'observer le comportement de cette structure. Les mesures sont réalisées à l'IEF.

Les mesures de la variation de l'incidence selon θ_x sont de mauvaise qualité (figure 3.15). Mais elles permettent de mettre en évidence que l'on garde un fonctionnement absorbant de la structure même quand on modifie l'angle d'incidence. On observe tout de même une dégradation des performances à partir du moment où l'on donne de l'angle aux antennes, cela se voit notamment sur le premier pic d'absorption.

La variation de l'angle d'incidence selon θ_y est présentée dans la figure 3.16. Cette mesure montre également qu'il y a conservation du fonctionnement absorbant de la structure malgré l'angle

qui est donné aux antennes. La mesure montre qu'il y a l'excitation d'un mode supplémentaire juste avant 16 GHz à partir de 15° que l'on retrouve à 30°. La mesure à 45° est de très mauvaise qualité, il est difficile de dire si elle reflète complètement le fonctionnement de la structure.

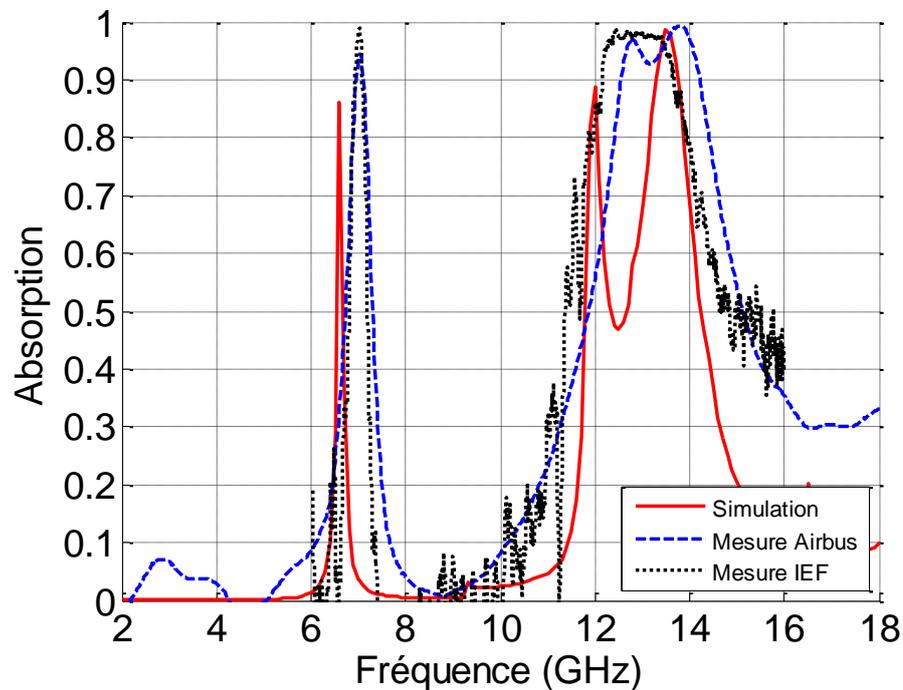


Figure 3.14 - Comparatif de l'absorption simulée, de la mesure à Airbus Group et de la mesure à l'IEF pour l'absorbant à métamatériaux de type MultiCross

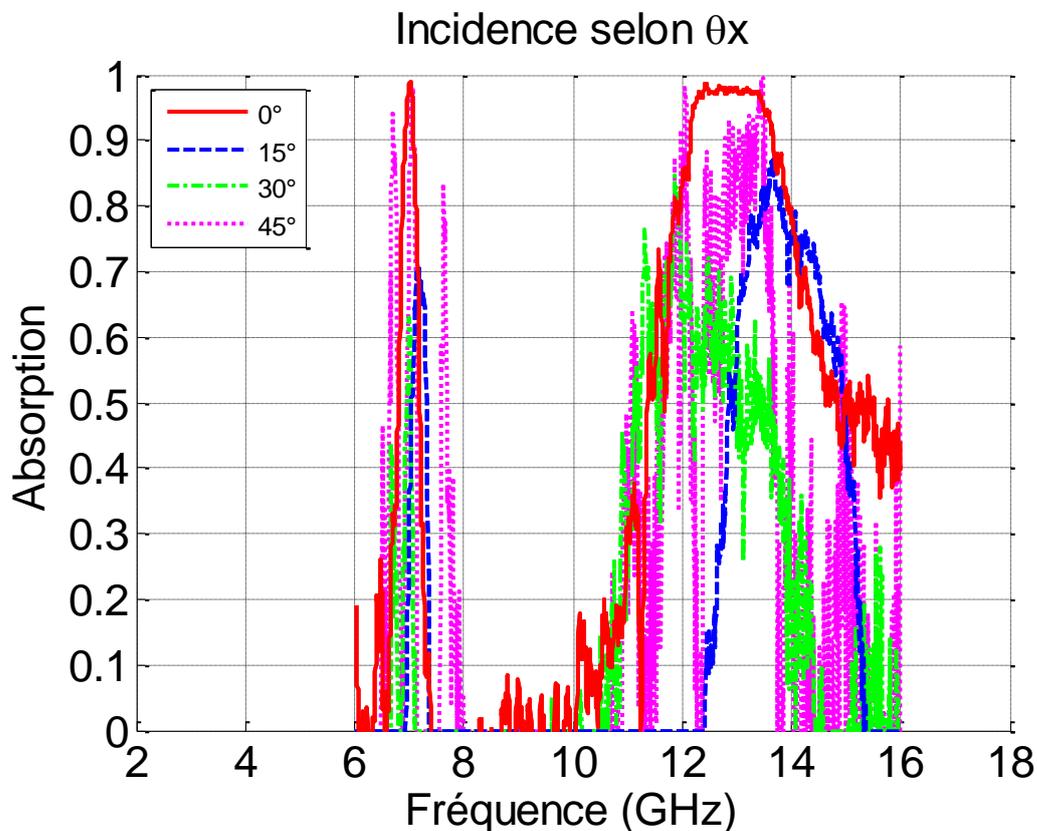


Figure 3.15 - Mesure de l'absorption de MultiCross suivant plusieurs angles d'incidence selon θ_x

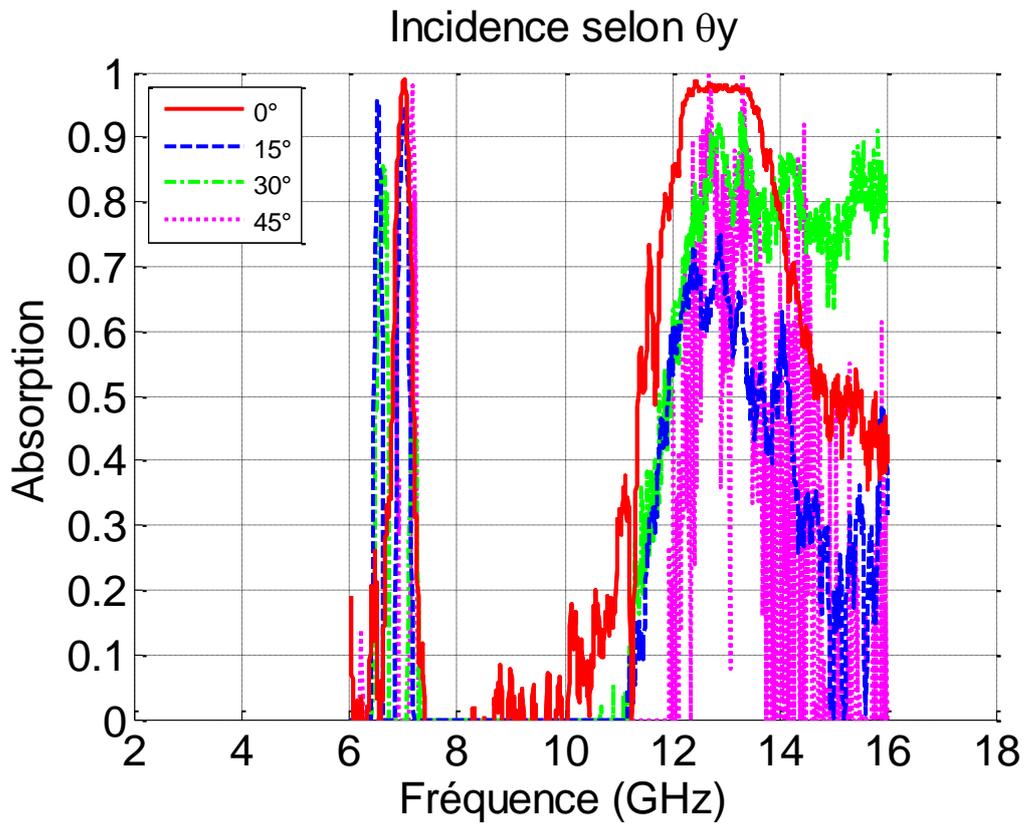


Figure 3.16 - Mesure de l'absorption de MultiCross suivant plusieurs angles d'incidence selon θ_y

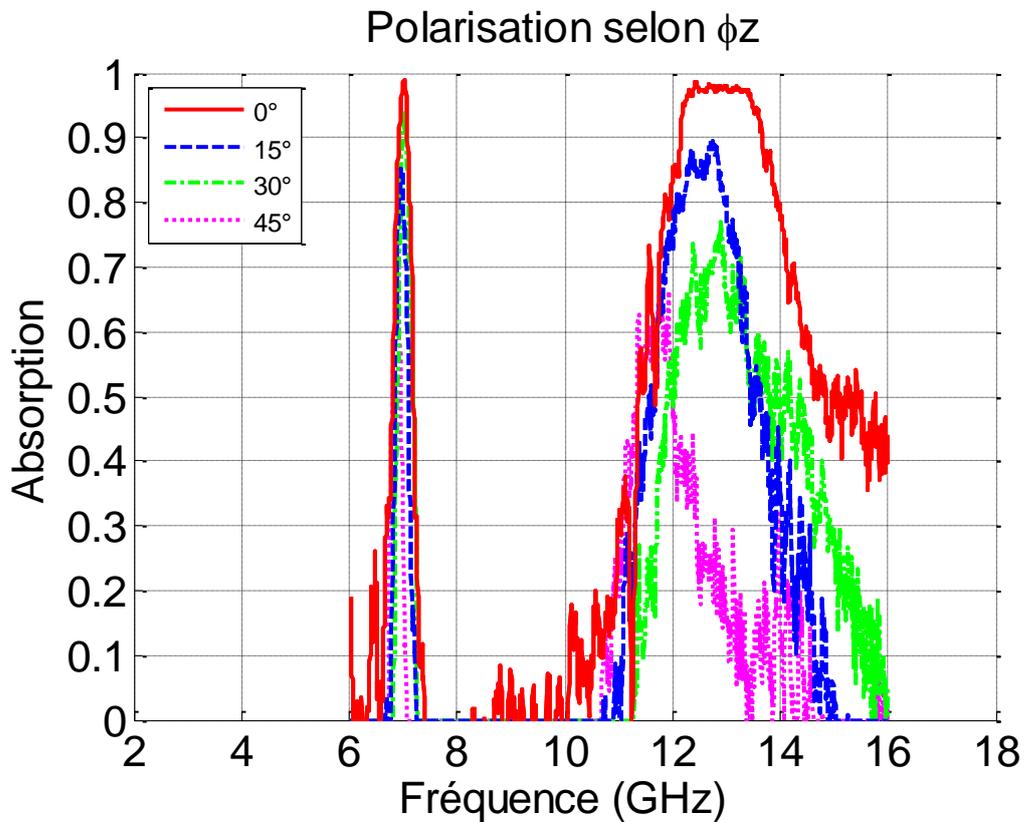


Figure 3.17 - Mesure de l'absorption de MultiCross suivant plusieurs angles de polarisation selon ϕ_z

Pour finir, nous pouvons observer le comportement de l'absorbant à métamatériaux avec un changement de polarisation de l'onde incidente, variation selon ϕ_z (figure 3.17). Cette mesure est de

meilleure qualité que les précédentes et est plus facile à exploiter. On observe que le changement de l'angle de polarisation va opérer une légère variation de fréquence de fonctionnement pour la bande d'absorption qui peut s'expliquer par l'application des champs E et H qui va se faire sur la diagonale des éléments de la structure et non plus sur la longueur ou la largeur, ce qui augmente la taille des éléments. On observe également une diminution des performances sur la bande d'absorption avec la modification de la polarisation qui s'explique par un changement de l'espacement entre patchs qui peut conduire à une désadaptation de l'impédance de la structure.

Les mesures faites sur cet absorbant corroborent les simulations que nous avons faites dans le chapitre précédent. L'absorption multi bande, la bande d'absorption large et les bons résultats de mesure ont déclenché la réalisation de notre brevet sur les absorbants à métamatériaux⁸³. De plus l'étude de son fonctionnement quand l'incidence et la polarisation de l'onde incidente change permet de mettre en évidence que l'absorbant fonctionne quelque soit la situation. Des pertes de performances sont observées mais c'est le cas de la majorité des absorbants. La variation de la polarisation montre également un décalage de la fréquence de fonctionnement, donc une dépendance à l'angle de polarisation. Le prototype MultiPatches développé pour avoir les mêmes performances que la structure MultiCross mais avec des patchs circulaires doit pouvoir résoudre ce problème.

6. Conclusion sur les premières réalisations

Les mesures réalisées sur les premières réalisations sont très encourageantes. Il y a une bonne concordance entre simulations et mesures, sauf pour la structure CrossRoll Fallahi. Chaque mesure a permis d'améliorer notre processus de réalisation de simulation et notre compréhension du phénomène d'absorption. Cela a abouti à la conception et à la réalisation de la structure MultiCross. Cette structure présente beaucoup d'avantages, elle est petite devant la longueur d'onde, fabriquée avec des matériaux courants dans l'industrie du circuit imprimé, composée d'une géométrie simple (patchs carrés et rectangles), multi bande et couvrant une large bande autour de 13 GHz. Nous avons sélectionné cet absorbant comme base pour différentes autres réalisations et mesures de la partie suivante.

III. Mesures abouties particulièrement intéressantes

1. Introduction

Après avoir réalisé et mesuré les premiers prototypes, nous avons fait une deuxième série de mesures sur les prototypes particulièrement intéressants. Nous présentons les résultats dans le même ordre que dans le chapitre précédent.

2. MultiPatches

La structure MultiPatches (figure 2.75) a été développée pour avoir un fonctionnement similaire à la structure MultiCross mais avec des patches circulaires. Nous avons vu qu'en simulation l'allure de l'absorption est proche mais pas tout à fait identique car la bande d'absorption de l'absorbant MultiPatches est plus resserrée que son modèle. Le prototype a été fabriqué de la même façon que ceux précédemment présentés. Une fois réalisée, la structure se présente telle que la figure 3.18 et une cellule unité seule telle que la figure 3.19.

La réalisation de ce prototype est particulièrement soignée et les dimensions des patches correspondent bien à ce que nous avons simulé. La gravure laser permet d'avoir une précision de l'ordre de $10\ \mu\text{m}$.

Les mesures ont été réalisées comme pour les prototypes précédents et donne l'absorption de la figure 3.20.

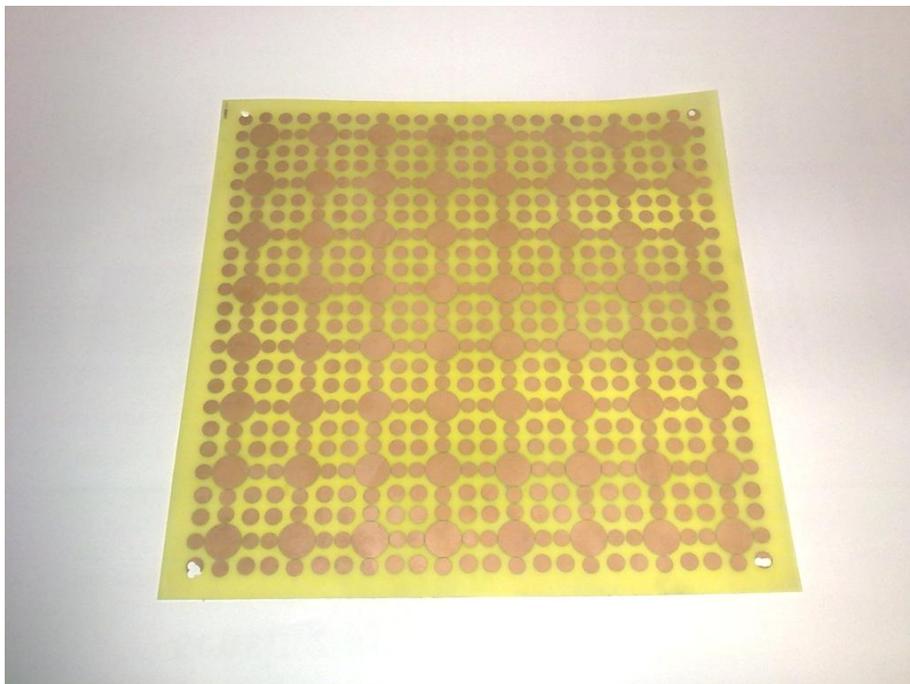


Figure 3.18 - Photo du prototype d'absorbant à métamatériaux de type MultiPatches

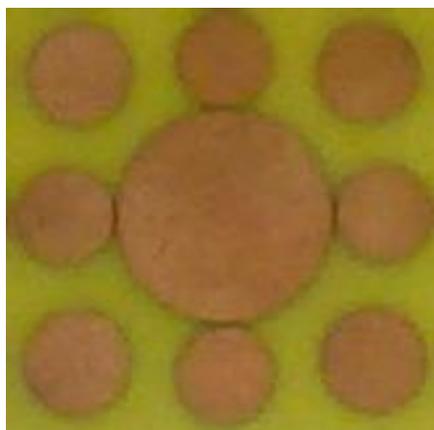


Figure 3.19 - Photo d'une cellule unité du prototype d'absorbant à métamatériaux de type MultiPatches

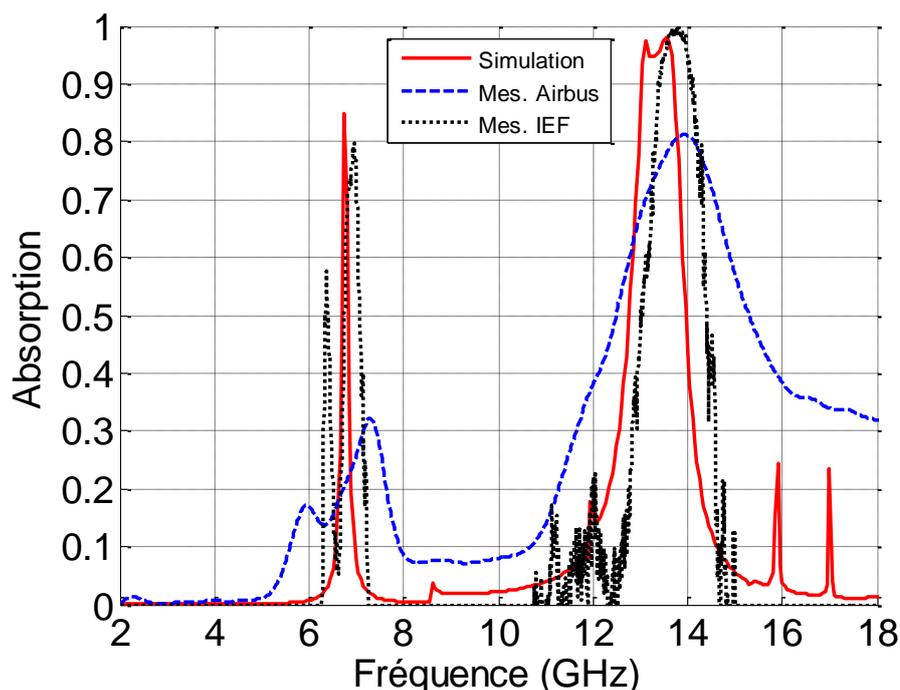


Figure 3.20 - Comparatif de l'absorption simulée, de la mesure à Airbus Group et de la mesure à l'IEF pour l'absorbant à métamatériaux de type MultiPatches

Sur les résultats de mesures, on distingue un premier pic d'absorption autour de 7 GHz suivi d'une bande d'absorption entre 12 et 14 GHz. Pour la mesure Airbus Group, le premier pic d'absorption est scindé en deux et son absorption est diminuée par rapport à la simulation. Des modes dégénérés sont la cause de ce phénomène. Une bande d'absorption est bien présente. Elle est moins franche que dans le cas de la simulation et est décalée vers les hautes fréquences. Un mauvais positionnement de l'échantillon peut être la cause des écarts observés. Et pour la mesure IEF, nous obtenons un double pic d'absorption autour de 7 GHz et une bande d'absorption légèrement décalée en fréquence par rapport à la simulation mais de même niveau. L'absorption mesurée à l'IEF est meilleure que celle mesurée à Airbus Group.

Avec cette structure, nous avons bien réalisé un absorbant avec des performances similaires à l'absorbant à métamatériaux MultiCross, les résultats se vérifient en mesure comme en simulation. Nous allons maintenant voir le comportement de cet absorbant quand on fait varier l'angle d'incidence et la polarisation de l'onde incidente.

Tout d'abord, observons la variation de l'angle d'incidence par rapport à θ_x sur la figure 3.21. La variation des angles des antennes autour de l'axe x n'influence pas beaucoup l'allure générale de la courbe. On garde le premier pic d'absorption et la bande d'absorption est toujours présente malgré un angle important, avec un léger décalage en fréquence. Par contre certains modes sombres doivent être excités juste avant la bande et cela crée des pics isolés peu importants.

Pour la variation par rapport à θ_y (figure 3.22), nous avons également une bonne conservation du fonctionnement de la structure en fonction du changement d'angle autour de l'axe y . Le premier pic d'absorption bouge légèrement en fréquence et la bande d'absorption reste présente. Comme pour la variation selon θ_x , certains modes sombres sont excités et créent quelques

résonances supplémentaires. Observons maintenant le changement de polarisation de l'onde incidente, variation selon φ_z (figure 3.23).

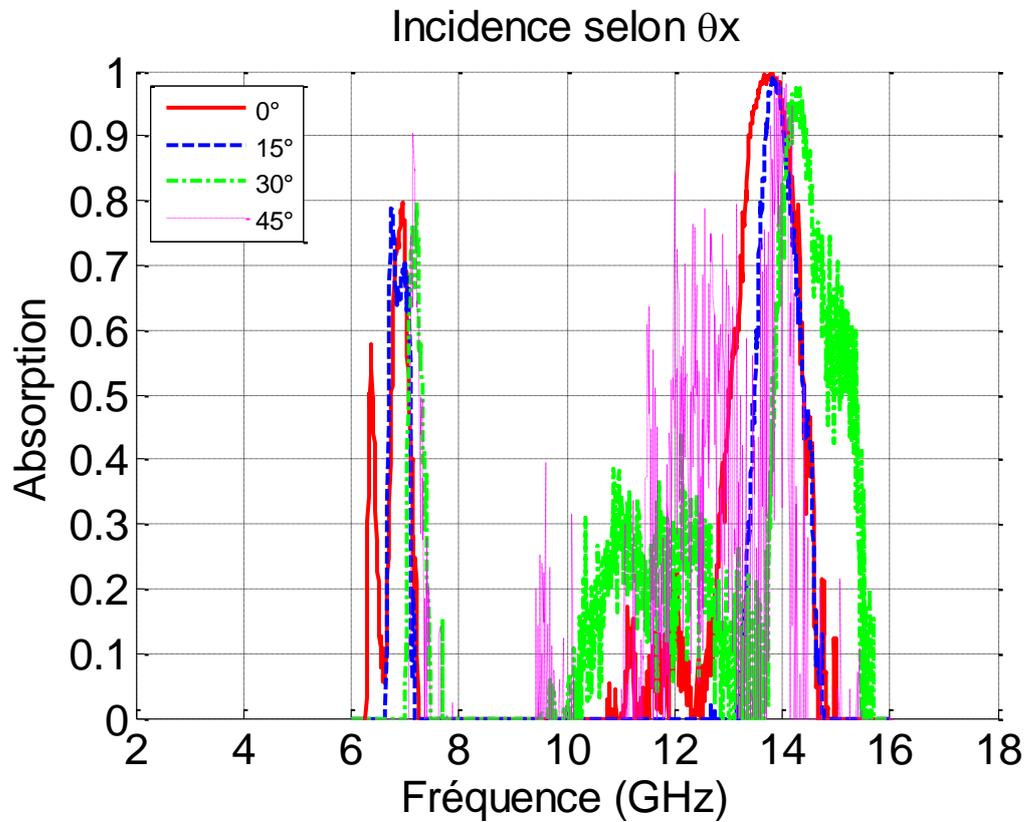


Figure 3.21 - Mesure de l'absorption de MultiPatches suivant plusieurs angles d'incidence selon θ_x

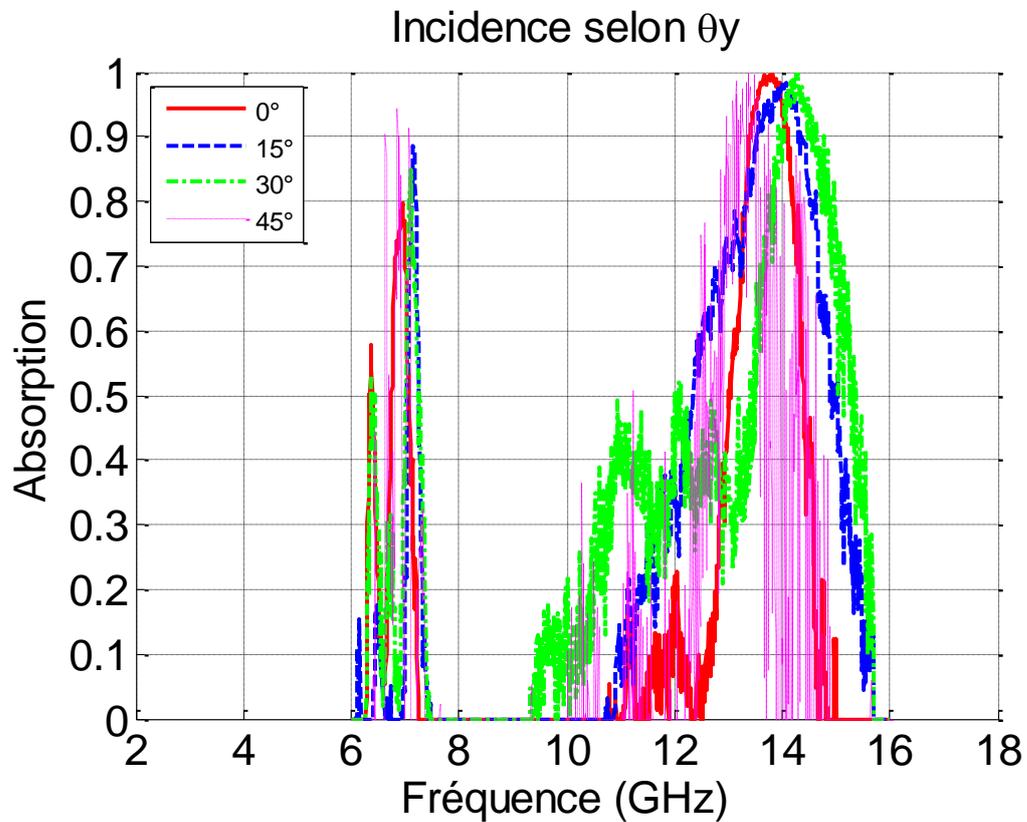


Figure 3.22 - Mesure de l'absorption de MultiPatches suivant plusieurs angles d'incidence selon θ_y

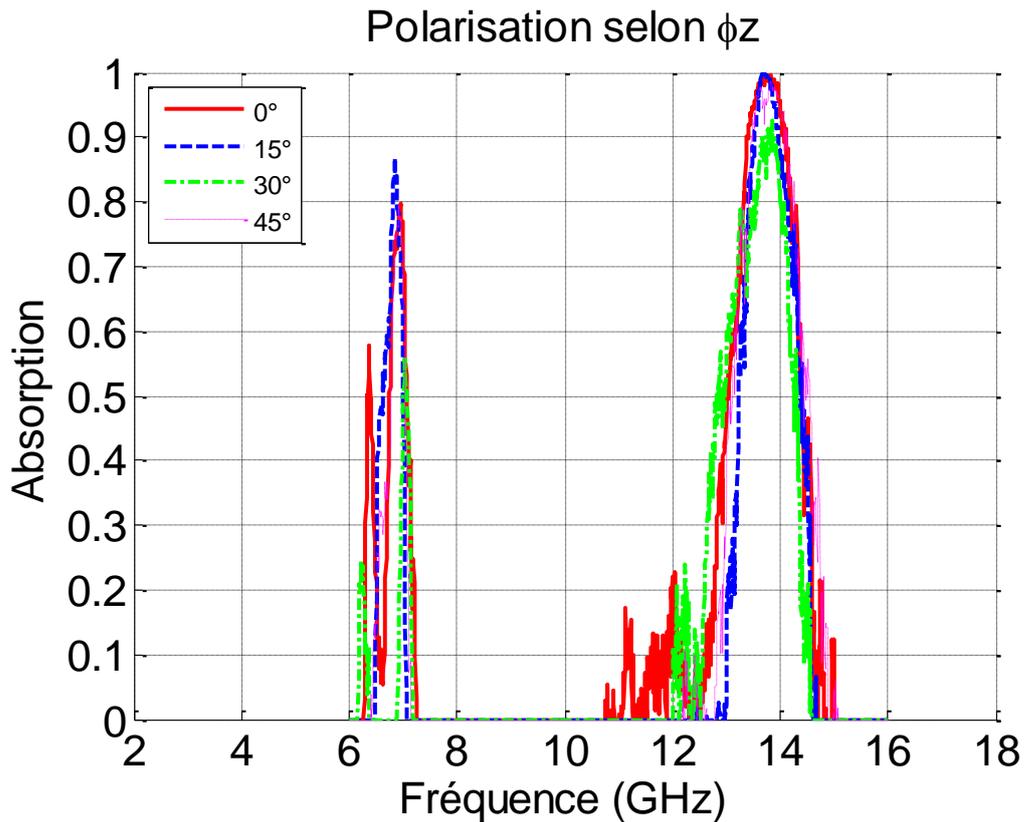


Figure 3.23 - Mesure de l'absorption de MultiPatches suivant plusieurs angles de polarisation selon φ_z

La mesure de la polarisation selon plusieurs angles est très intéressante car elle met en évidence que la fréquence n'est pas dépendante de la polarisation pour les absorbants à métamatériaux composés de patchs circulaires. Par contre, pour ce type de structure, il y a une dépendance du niveau d'absorption à la polarisation car l'espacement entre patchs selon le champ E (ou H) évolue en fonction de l'angle que l'on lui donne. Ce comportement est différent de ce qui a été observé en mesure pour l'absorbant à métamatériaux à base de patchs carrés et rectangles qui présente une dépendance en fréquence et en niveau d'absorption par rapport à la polarisation.

La structure MultiPatches est intéressante. La reproduction de l'absorption obtenue avec une autre structure fonctionne. Ce premier prototype particulièrement intéressant met en évidence le comportement différent qu'il peut y avoir entre une structure faite de patchs circulaires et une structure de patchs carrés et rectangles. L'avantage va à l'absorbant composé de patchs circulaires qui est moins dépendant à l'angle de polarisation de l'onde incidente.

Pour continuer sur les mesures intéressantes, nous présentons ci-après l'étude d'une méthode d'optimisation de l'absorption, l'empilement de couches identiques.

3. Multicouche de MultiCross

Nous avons fait fabriquer plusieurs modèles de l'absorbant à métamatériaux MultiCross afin de réaliser des mesures sur des empilements de plusieurs matériaux identiques. Les simulations du chapitre précédent mettent en évidence une amélioration des performances pour deux épaisseurs

puis une dégradation progressive des résultats. Nous avons voulu vérifier si ce comportement se retrouve en mesure. Nous avons réalisé les mesures sur une et deux couches à l'IEF et à Airbus. Pour les mesures de trois à six couches, nous n'avons mesuré qu'à l'IEF. Nous avons élargi la bande de mesure à l'IEF pour pouvoir observer des phénomènes présents entre 4 et 6 GHz. La structure en coupe est rappelée à la figure 3.24.

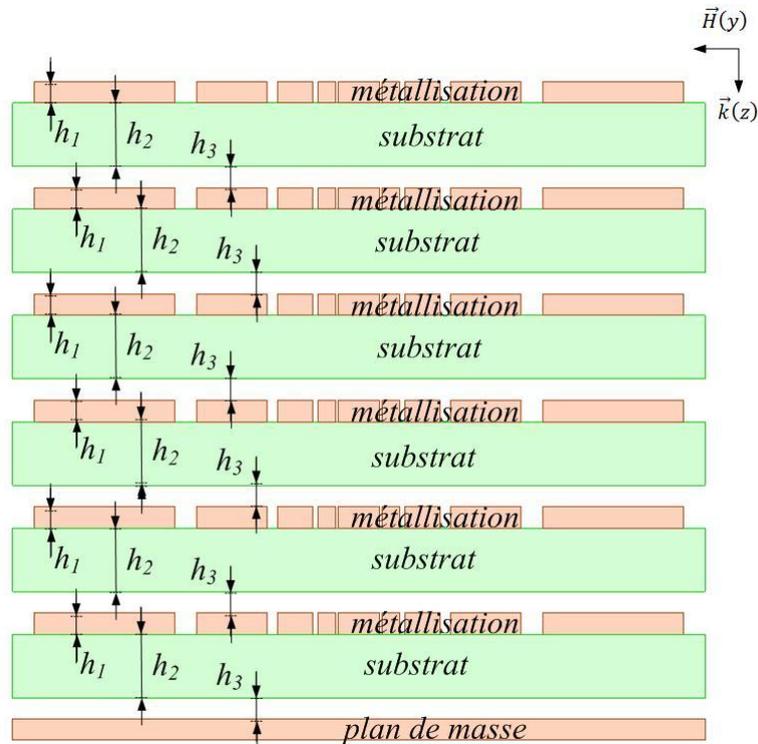


Figure 3.24 - Vue en coupe d'un empilement de six couches d'absorbant de type MultiCross

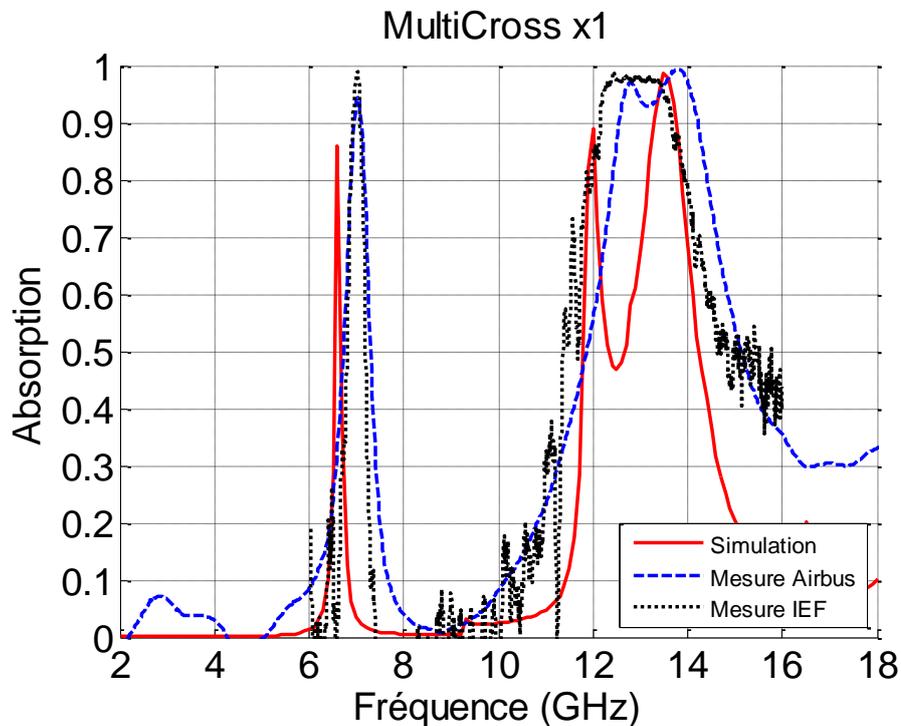


Figure 3.25 - Comparatif de l'absorption simulée, de la mesure à Airbus Group et de la mesure à l'IEF pour l'absorbant à métamatériaux de type MultiCross

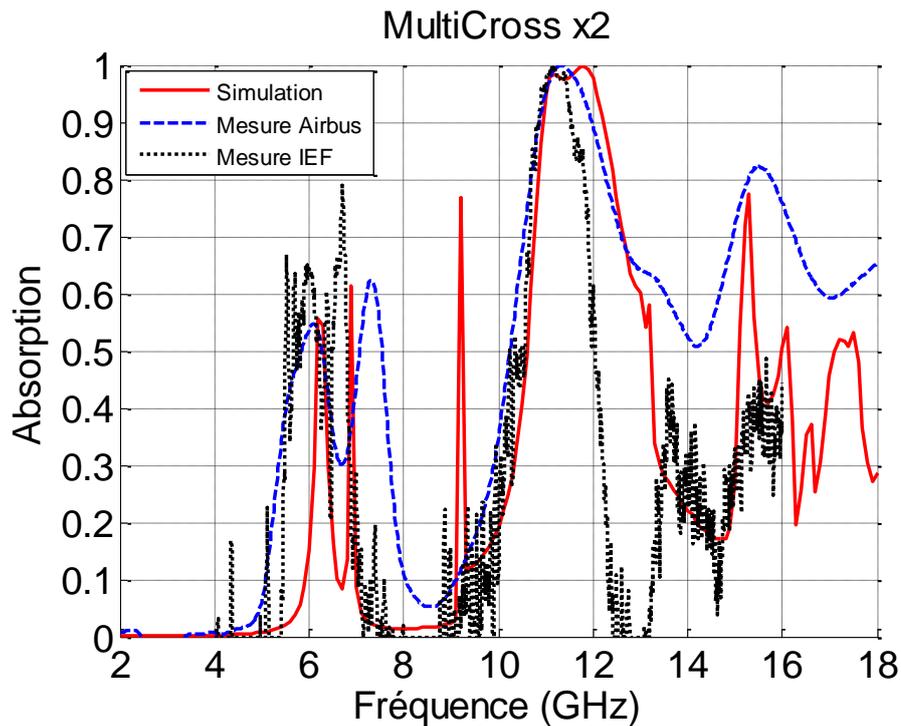


Figure 3.26 - Comparatif de l'absorption simulée, de la mesure à Airbus Group et de la mesure à l'IEF pour 2 couches de MultiCross

Avec comme dimensions pour les épaisseurs :

h_1	17 μm
h_2	0,3 mm
h_3	0,2 mm

La mesure pour une seule épaisseur de MultiCross est connue, elle est donnée en figure 3.25.

Pour les résultats de mesures de MultiCross à deux couches (figure 3.26), on observe comme en simulation que le premier pic d'absorption se scinde en deux pics moins importants et que la bande d'absorption s'est resserrée et offre une absorption très forte. On observe également en mesure un léger décalage vers les basses fréquences. La mesure réalisée à Airbus Group est plus proche de la simulation que celle réalisée à l'IEF

Continuons nos observations par trois structures MultiCross (figure 3.27). A partir de trois épaisseurs, nous avons uniquement mesuré l'absorption à l'IEF. Dans ce cas, la simulation et la mesure divergent un peu plus sur les niveaux d'absorption mais l'on retrouve une allure assez similaire du train de pic d'absorption.

Le phénomène s'amplifie en augmentant le nombre d'épaisseurs à quatre (figure 3.28). Pour ces quatre épaisseurs, l'allure de l'absorption est assez chaotique. La mesure diverge essentiellement de la simulation entre 4 et 6 GHz avec le début d'une bande d'absorption qui est en création.

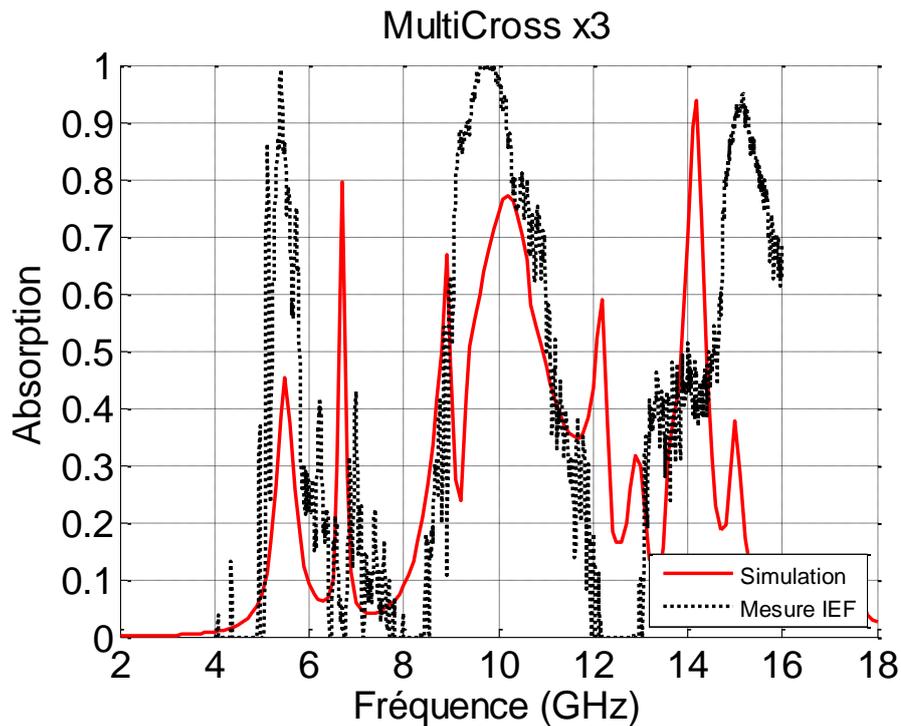


Figure 3.27 - Comparatif de l'absorption simulée et de la mesure à l'IEF pour 3 couches de MultiCross

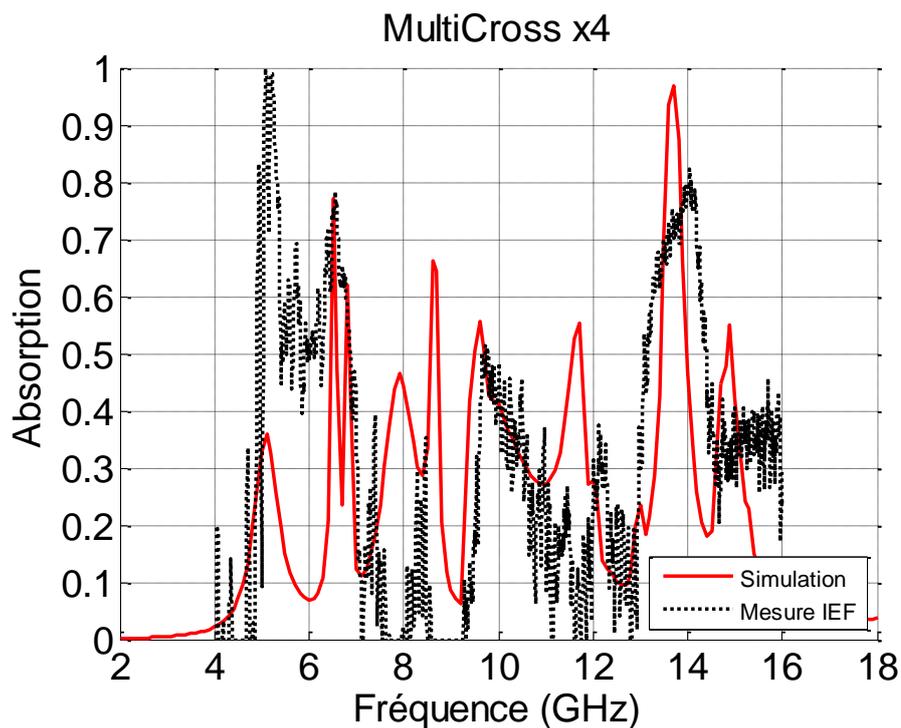


Figure 3.28 - Comparatif de l'absorption simulée et de la mesure à l'IEF pour 4 couches de MultiCross

Pour cinq couches de MultiCross en mesure (figure 3.29), une bande d'absorption apparaît entre 4,5 GHz et 7 GHz, ce qui est très intéressant. Le niveau d'absorption n'est pas encore maximal. La mesure et la simulation ne sont pas concordantes sur ce point.

Enfin avec six couches (figure 3.30), on descend encore en fréquence. On retrouve sur la simulation une allure proche de ce que l'on observe pour la simulation en une seule couche condensée entre 2 et 8 GHz. La mesure diverge de ce que l'on a en simulation notamment la bande

d'absorption entre 4,5 et 7 GHz qui englobe les trois premiers pics d'absorption de la simulation. L'absorption observée en mesure sur cette bande est très impressionnante car on obtient pour la première fois une bande d'absorption large et forte. Malgré l'épaisseur importante de 3,102 mm, l'empilement de couche d'absorbant identique montre un intérêt dans ce cas.

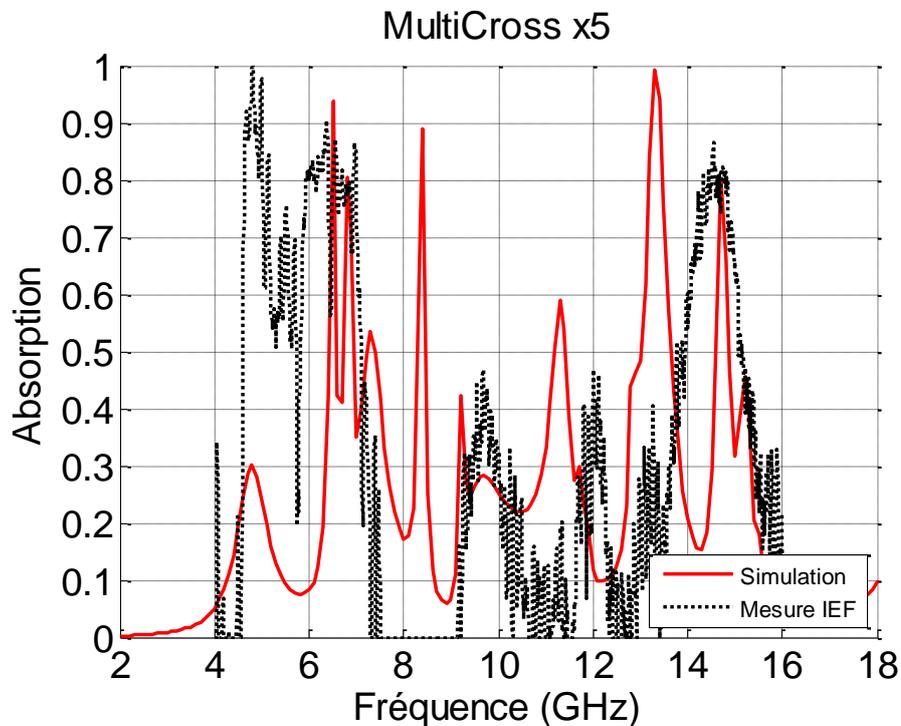


Figure 3.29 - Comparatif de l'absorption simulée et de la mesure à l'IEF pour 5 couches de MultiCross

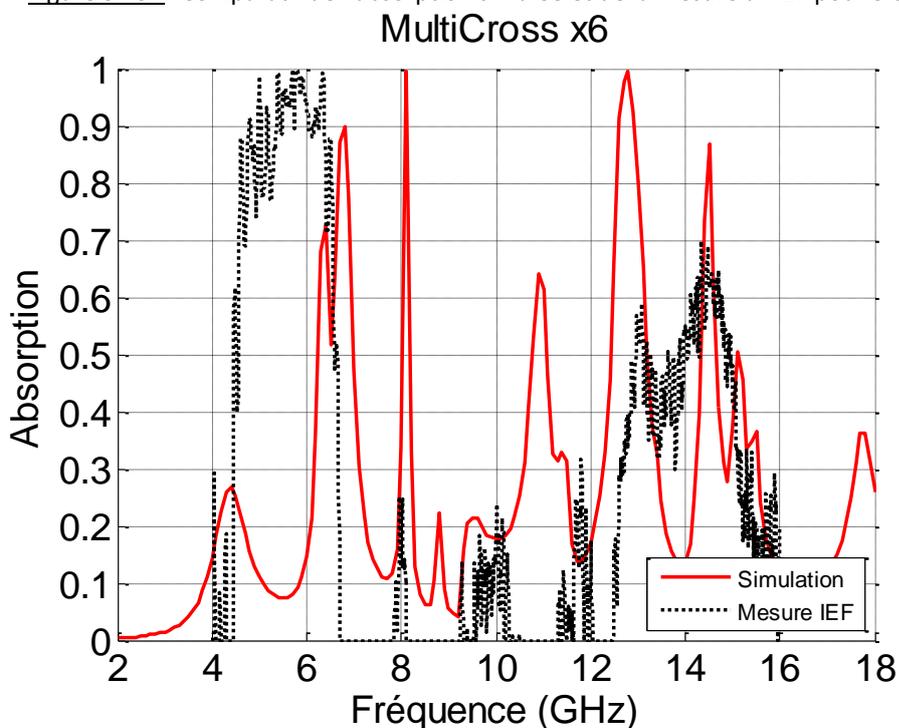


Figure 3.30 - Comparatif de l'absorption simulée et de la mesure à l'IEF pour 6 couches de MultiCross

Les mesures réalisées sur l'empilement de plusieurs absorbants à métamatériaux montrent une divergence entre simulations et mesures. Plus le nombre de couches est important et plus la structure est complexe. La simulation est une modélisation de la réalité et peut comporter des erreurs. La mesure peut également avoir une part d'erreur car le positionnement et les paramètres géométriques peuvent être légèrement différents d'avec la simulation. L'empilement de couches de MultiCross est intéressant pour chaque cas mais surtout pour un empilement de six couches car on obtient une forte absorption sur une bande large. Cette méthode d'amélioration des absorbants à métamatériaux fonctionne bien selon les mesures mais présente l'inconvénient d'augmenter fortement l'épaisseur du matériau final.

L'autre méthode d'amélioration de l'absorption est présentée ci-après.

4. Evolution de l'espacement entre le substrat et le plan de masse

Comme décrit dans le chapitre précédent, modifier l'espacement entre le substrat et le plan de masse fait évoluer la valeur de l'indice du substrat et peut avoir une incidence sur la fréquence de fonctionnement de l'absorbant à métamatériau. L'indice change, mais également le taux de perte dans le substrat équivalent et ainsi l'amortissement dissipatif ($\nu = \frac{R}{2L}$) va changer par rapport à l'amortissement radiatif ($\gamma = \frac{|\beta|^2}{2CZ_0}$). On peut ainsi changer les performances de notre absorbant. En simulation, avec la structure MultiCross, on observe un léger décalage vers les hautes fréquences et des performances qui diminuent pour le premier pic d'absorption. Pour la mesure, on a utilisé des cales en papier pour créer l'espace entre substrat et plan de masse. La mesure a été réalisée à l'IEF. L'espace que nous faisons varier est le h_3 sur la figure 3.31.

Pour les valeurs d'espacement 0,2 mm, 0,4 mm et 0,6 mm, nous obtenons les résultats de la figure 3.32. Les mesures ont une progression différente de ce que l'on observe en simulation. En mesure, il y a bien un décalage vers des fréquences légèrement plus hautes. Par contre, le premier pic d'absorption n'est pas dégradé et c'est la bande d'absorption qui voit ces performances diminuer avec l'augmentation de l'espacement entre substrat et plan de masse.

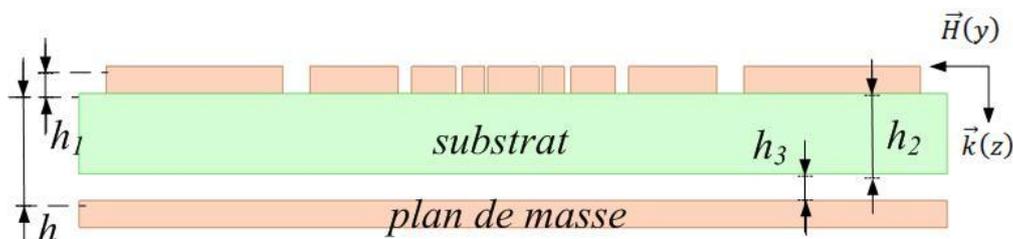


Figure 3.31 - Vue en coupe d'une cellule unité d'un absorbant de type MultiCross

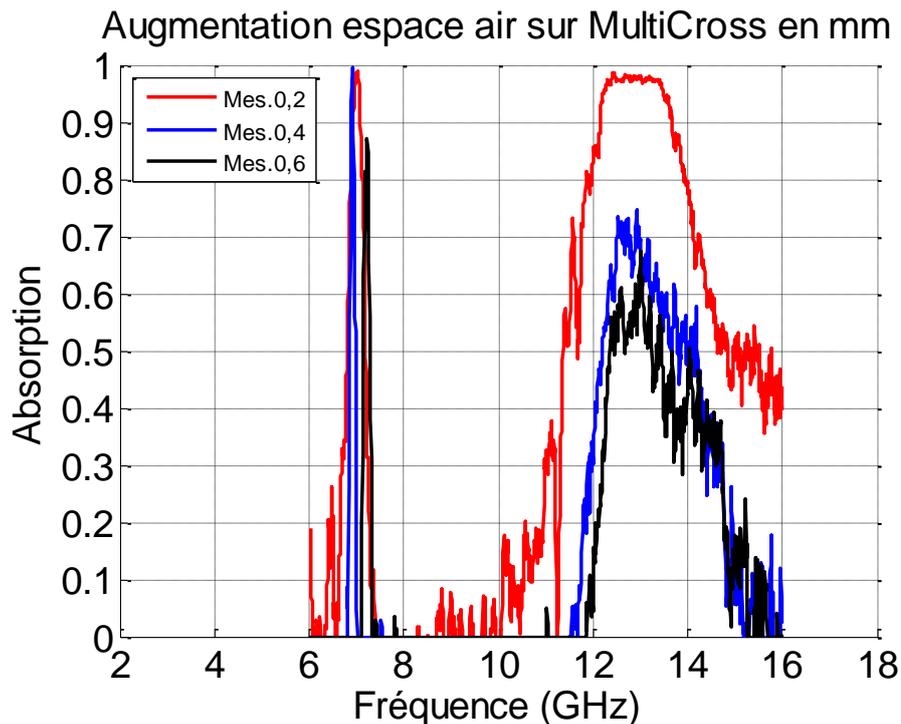


Figure 3.32 - Mesure de l'absorption pour un espacement entre substrat et plan de masse de 0,2 mm, 0,4 mm et 0,6 mm pour l'absorbant de type MultiCross

Avec ce procédé, nous obtenons bien une modification des performances de notre absorbant à métamatériaux comme prédit. Mais, nous avons une divergence sur les résultats obtenus entre simulations et mesures. Cette divergence peut venir d'erreurs de la simulation mais également du procédé de montage (cale en papier) qui ne correspond pas tout à fait à ce qui est simulé. Ainsi, on peut effectivement modifier la courbe d'absorption d'un absorbant à métamatériaux par une modification simple de la géométrie. Cette modification peut être apportée après fabrication pour optimiser le fonctionnement d'un matériau. Une vérification par la mesure de l'optimisation obtenue est toujours souhaitable.

A la suite de ces mesures sur des méthodes d'optimisation des absorbants à métamatériaux, la conformabilité de notre structure MultiCross a été vérifiée.

5. Absorbant sur cylindre

Démontrer que nos absorbants à métamatériaux peuvent fonctionner sur des surfaces non-plane est une condition essentielle pour déterminer les futures applications qui en seront faites. Les simulations de ces matériaux ont été concluantes. Nous avons voulu observer les divergences entre mesures et simulations. Les simulations et les mesures ont été réalisées sur des cylindres de 100 mm et 220 mm de diamètres, dont nous disposons à l'IEF. C'est la structure MultiCross qui a servi une nouvelle fois pour la réalisation du banc de test (figure 3.33).



Figure 3.33 - Photo du prototype d'absorbant à métamatériaux de type MultiCross sur le cylindre de 100 mm de diamètre

Nous avons réalisé ces mesures selon un protocole assez simple. La mesure est comparable à la mesure de la RCS en bi-statisme. Une antenne est placée face à l'échantillon à mesurer et une seconde antenne tourne autour. Cela permet de définir la réflexion directe de la structure quand les deux antennes sont l'une à côté de l'autre et d'observer si la structure ne reflète pas une partie de l'onde incidente dans une autre direction quand la seconde antenne balaye autour de la structure. Ce type de relevé, en bi-statisme, n'a pas été concluant en simulation donc non présenté. Les antennes sont placées comme sur la figure 3.34.

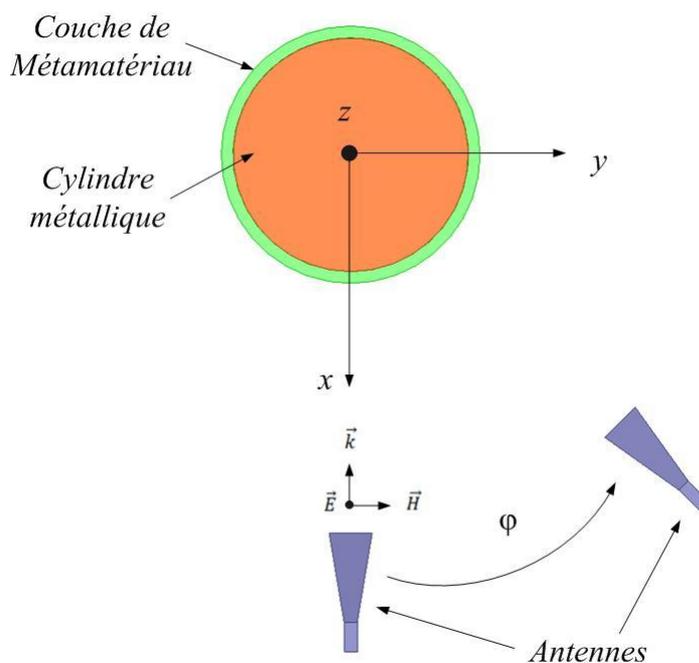


Figure 3.34 - Schéma du montage pour la mesure d'absorbant à métamatériaux sur cylindre en bi-statisme

La mesure en réflexion, quand les deux antennes sont disposées l'une à côté de l'autre donne pour le cylindre métallique de 100 mm de diamètre seul, et recouvert de l'absorbant, le résultat de mesure de la figure 3.35. La mesure est assez bruitée mais on peut facilement distinguer un premier pic d'absorption autour de 6 GHz puis un pic très important autour de 12,5 GHz. Les niveaux de mesures sont différents des niveaux de simulation pour pouvoir les comparer, nous avons normalisé la réflexion de l'absorbant par rapport au cylindre métallique dans les deux cas sur la figure 3.36.

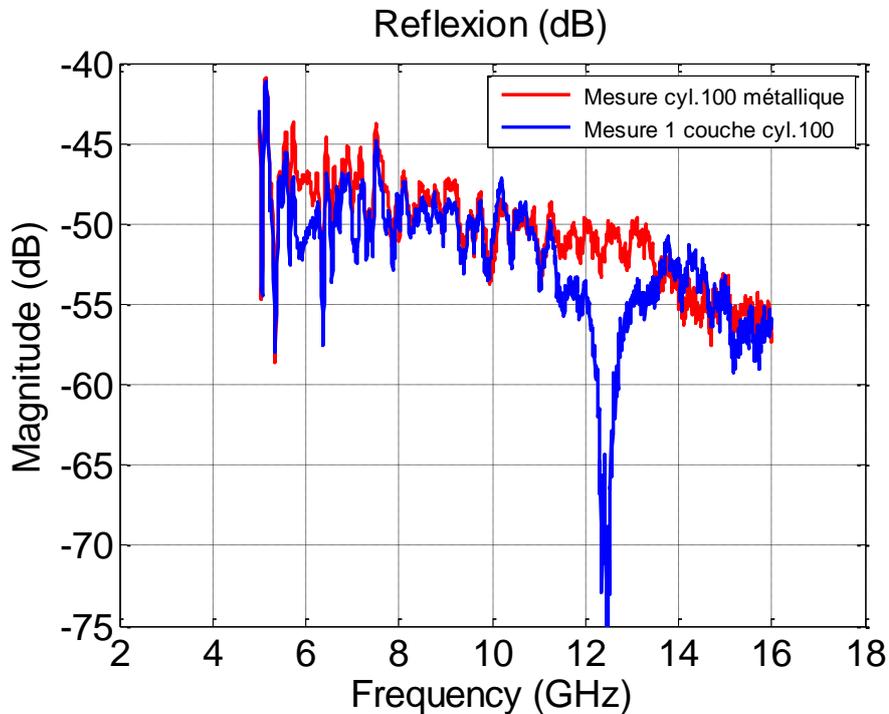


Figure 3.35 - Comparatif des paramètres S11 en mesure du cylindre métallique de diamètre 100 mm seul et du cylindre recouvert d'une couche de l'absorbant de type MultiCross

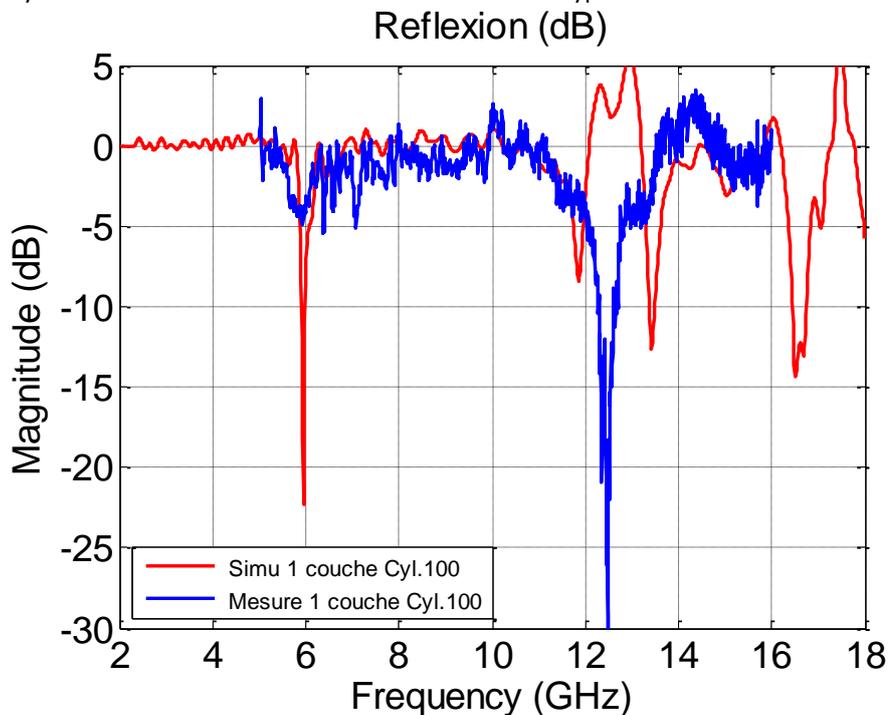


Figure 3.36 - Comparatif de la simulation et de la mesure du cylindre de diamètre 100 mm recouvert d'une couche de l'absorbant de type MultiCross normalisé par rapport au cylindre métallique seul

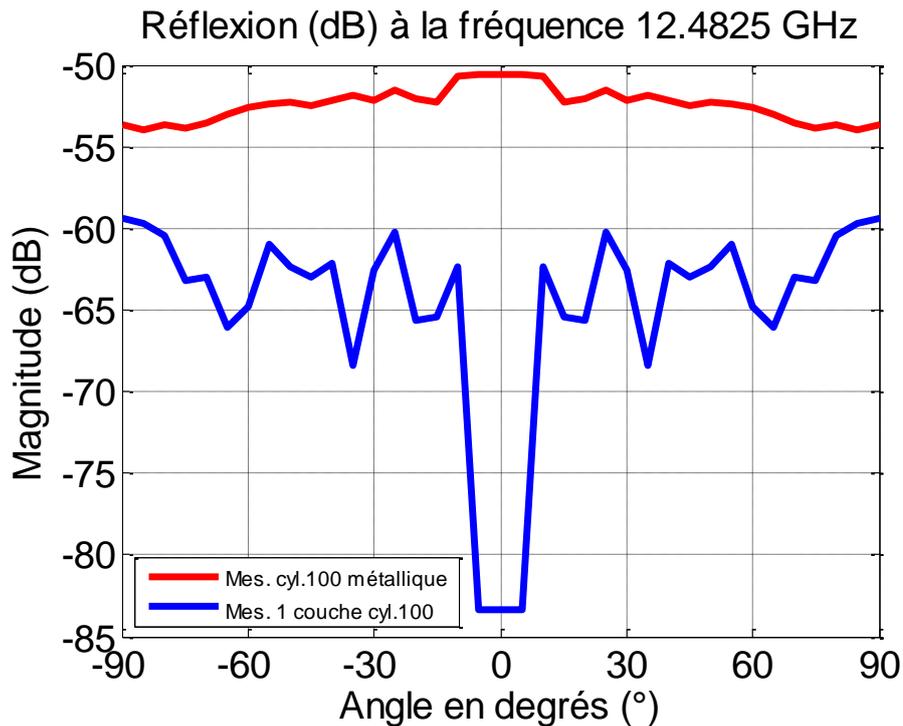


Figure 3.37 - Comparatif de la réflexion en mesure bi-statique du cylindre métallique de diamètre 100 mm seul et du cylindre recouvert d'une couche de l'absorbant de type MultiCross sur 180°

La comparaison des deux coefficients de réflexion, en simulation et en mesure, permet de mettre en évidence un point divergent important. Le premier pic d'absorption autour de 6 GHz est identique dans les deux cas mais le pic d'absorption autour de 12,5 GHz est découpé en deux pics à 11,8 GHz et 13,4 GHz. Afin d'observer le fonctionnement de l'absorbant en fonction de l'incidence de l'onde sur ce cylindre, nous avons sélectionné la fréquence où il fonctionne le mieux en mesure et avons tracé la réflexion sur 180° par pas de 5° sur la figure 3.37.

On observe sur cette courbe une diminution de la réflexion pour l'ensemble des angles étudiés. Cet absorbant remplit donc bien son rôle de diminution de la RCS. L'allure de l'absorption est proche de ce que l'on observe pour le même absorbant sur un plan, un léger décalage en fréquence est observé. Dans ce cas, notre structure peut se conformer sans perdre ces performances.

Nous avons également réalisé les mesures sur un cylindre de diamètre supérieur (220 mm), beaucoup moins conformé, qui se rapproche donc plus d'un plan métallique. Nous obtenons une réflexion (S11) telle que la figure 3.38. La mesure de la réflexion directe de l'absorbant à métamatériaux MultiCross sur le cylindre de 220 mm de diamètre donne un résultat différent de ce qui a été trouvé en mesure pour le cylindre de 100 mm. Cette fois-ci le comportement est proche de ce que l'on a en simulation comme on peut voir sur le graphe comparatif des valeurs normalisées par rapport au cylindre (figure 3.39). Il y a une réelle concordance entre simulation et mesure. On observe un premier pic d'absorption autour de 6 GHz puis deux pics d'absorption autour de 11 GHz et de 13 GHz.

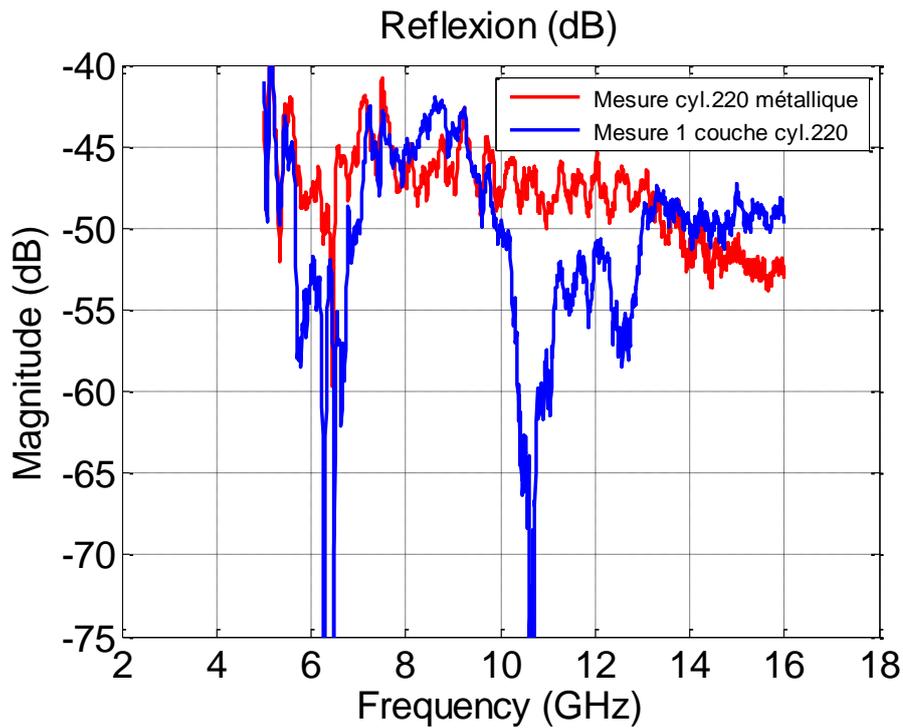


Figure 3.38- Comparatif des paramètres S11 en mesure du cylindre métallique de diamètre 220 mm seul et du cylindre recouvert d'une couche de l'absorbant de type MultiCross

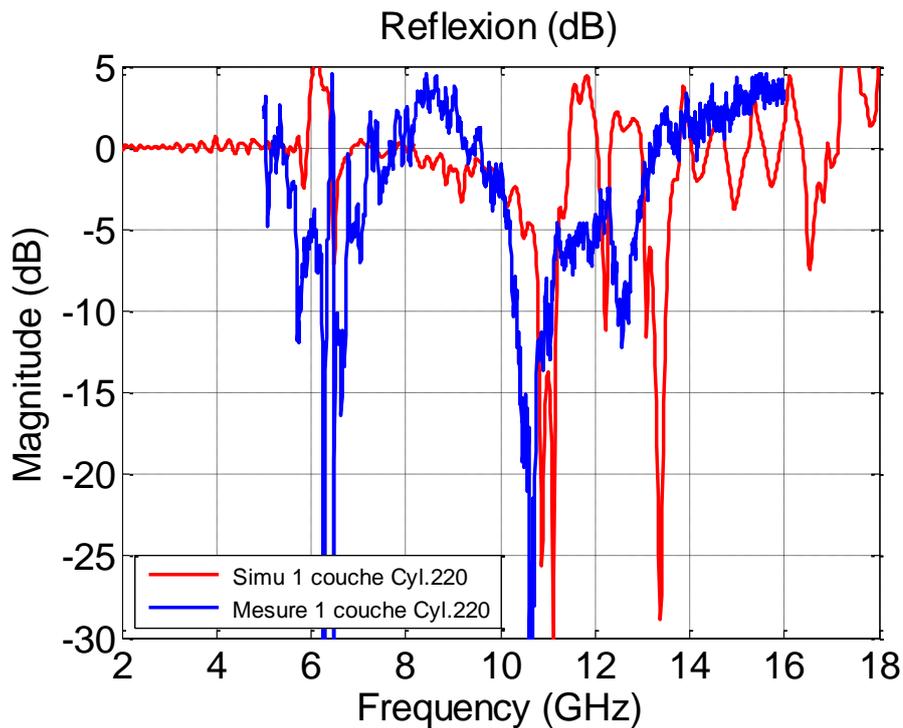


Figure 3.39- Comparatif de la simulation et de la mesure du cylindre de diamètre 220 mm recouvert d'une couche de l'absorbant de type MultiCross normalisé par rapport au cylindre métallique seul

Nous avons sélectionné la meilleure fréquence d'absorption pour observer la réflexion de notre structure sur 180° par pas de 5°. Nous obtenons le graphe de la figure 3.40.

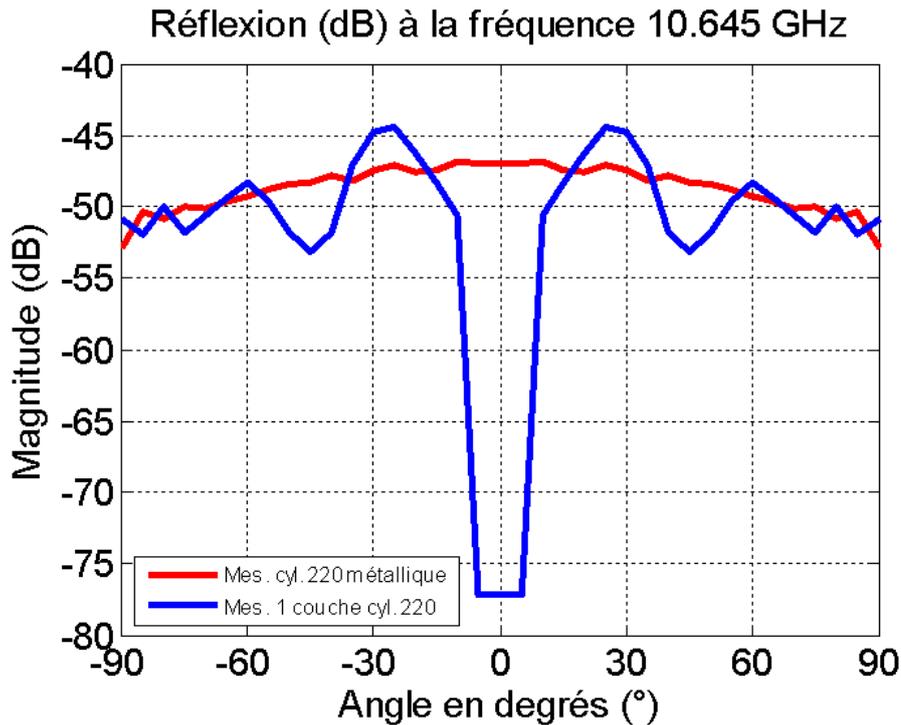


Figure 3.40- Comparatif de la réflexion en mesure bi-statique du cylindre métallique de diamètre 220 mm seul et du cylindre recouvert d'une couche de l'absorbant de type MultiCross sur 180°

Cette fois-ci, l'absorbant réduit bien la RCS quand on est face à la structure mais n'améliore pas le fonctionnement pour des angles supérieurs à plus ou moins 10°. On observe même pour certains angles une dégradation avec une réflexion un peu plus importante dans certaines directions même si cela reste limité. Dans tout les cas, l'allure de l'absorption en fonction de la fréquence montre une certaine divergence par rapport à l'allure de l'absorbant MultiCross sur un plan. Il y a conservation du phénomène d'absorption mais on retrouve encore un décalage en fréquence.

L'étude du comportement de nos matériaux conformés confirme le fonctionnement de nos matériaux même quand ils subissent une contrainte de forme. Dans les deux cas étudiés, on retrouve une forte absorption pour une mesure du module du coefficient de réflexion S11. La mesure en bistatisme est différente dans les deux cas, le premier présente une absorption quelque soit l'angle de mesure et le second présente une dégradation sur certains angles. Cela indique qu'une étude de cas devra être faite pour l'utilisation de nos matériaux pour leur utilisation sur des formes non-plane.

6. Conclusion sur les mesures abouties particulièrement intéressantes

L'ensemble des mesures réalisées dans cette partie montre la relative facilité d'utilisation des absorbants à métamatériaux. Ces mesures sont surtout des préparatifs à l'utilisation de nos matériaux pour des applications industrielles avec la recherche de l'absorbant le moins dépendant au changement de polarisation possible, différentes optimisations et la possibilité de le conformer. Les absorbants à métamatériaux ont un potentiel important de développement. Nous avons vu dans le

chapitre précédent qu'il est possible de les coupler avec des absorbants magnétiques, pour créer des absorbants hybrides. Nous avons mesuré ces empilements, présentés ci-après.

IV. Mesures sur le couplage d'absorbants

1. But

A travers les mesures sur les absorbants hybrides constitués d'absorbants à métamatériaux et d'absorbants magnétiques, nous cherchons à vérifier les résultats encourageants de simulation. Si nous obtenons des absorptions comparables, alors la méthode de prise en compte des superstrats est la bonne et ce type d'absorbant pourrait soit produire des absorbants plus légers soit avec une absorption couvrant des bandes originales.

2. Conditions de mesures

Pour cette série de mesures, nous avons utilisé les mêmes structures d'absorbants à métamatériaux que dans les simulations. C'est à dire les structures Fallahi, BigG, CrossRoll Fallahi, MultiCross et MultiPatches. Les absorbants magnétiques ont été mis à notre disposition par Airbus Group. Lors des mesures, l'absorbant magnétique 1 n'était pas disponible. Nous avons donc uniquement réalisé nos mesures avec l'absorbant magnétique 2. Les mesures ont été réalisées à Airbus Group dans leur chambre anéchoïque. L'empilement a l'allure de la figure 3.41.



Figure 3.41 - Vue en coupe de l'absorbant magnétique 2 couplé avec un absorbant à métamatériaux

Avec le matériau absorbant magnétique 2 de 1,75 mm d'épaisseur qui recouvre l'absorbant à métamatériau constitué d'un substrat d'époxy FR4 de 0,3 mm d'épaisseur et d'une métallisation en cuivre sur une face de 17 μm d'épaisseur, le tout posé sur un plan de masse métallique. Les différentes épaisseurs sont collées les unes aux autres par une colle (0,2 mm) représentée par un espace vide sur le schéma. Chaque prototype mesure 300 mm de longueur par 300 mm de largeur.

L'empilement fait 2,467 mm d'épaisseur quand l'absorbant magnétique seul ne fait que 1,75 mm. La masse de l'empilement fait 7,7 kg/m^2 , avec la couche d'absorbant magnétique qui pèse à elle seule 6,8 kg/m^2 .

3. Mesures

Pour chacune des mesures qui suivent, nous rappelons la forme de la cellule unité de la structure utilisée. Sur la présentation de la mesure, nous rappelons l'allure de l'absorption de l'absorbant magnétique 2 de 1,75 mm d'épaisseur seul et l'absorption en simulation de l'empilement.

a. Fallahi

La structure Fallahi est rappelée dans la figure 3.42. La mesure de l'absorbant hybride obtenu par couplage de cette structure avec l'absorbant magnétique 2 est donnée sur la figure 3.43.

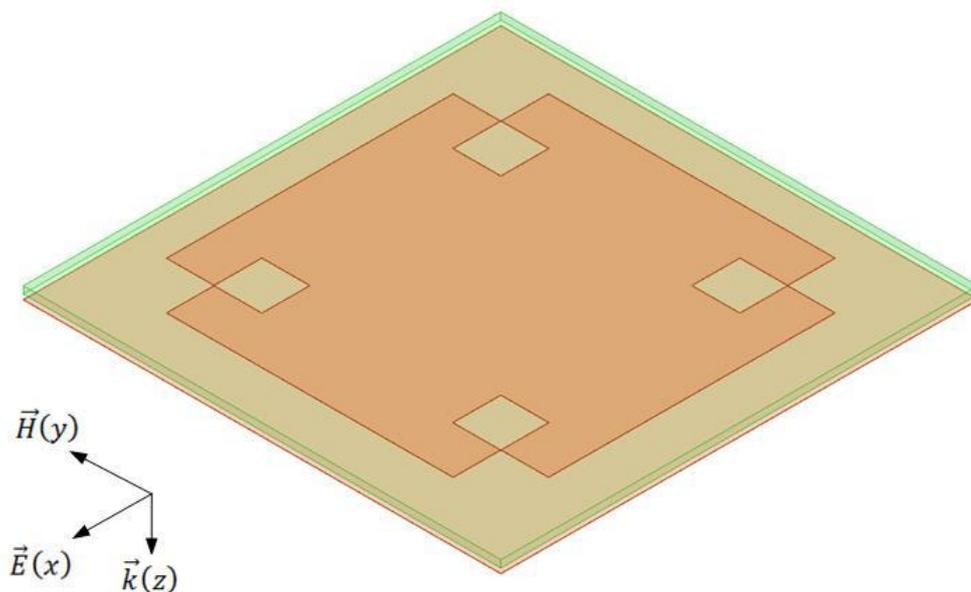


Figure 3.42 - Rappel de la modélisation 3D d'une cellule unité d'un absorbant de type Fallahi

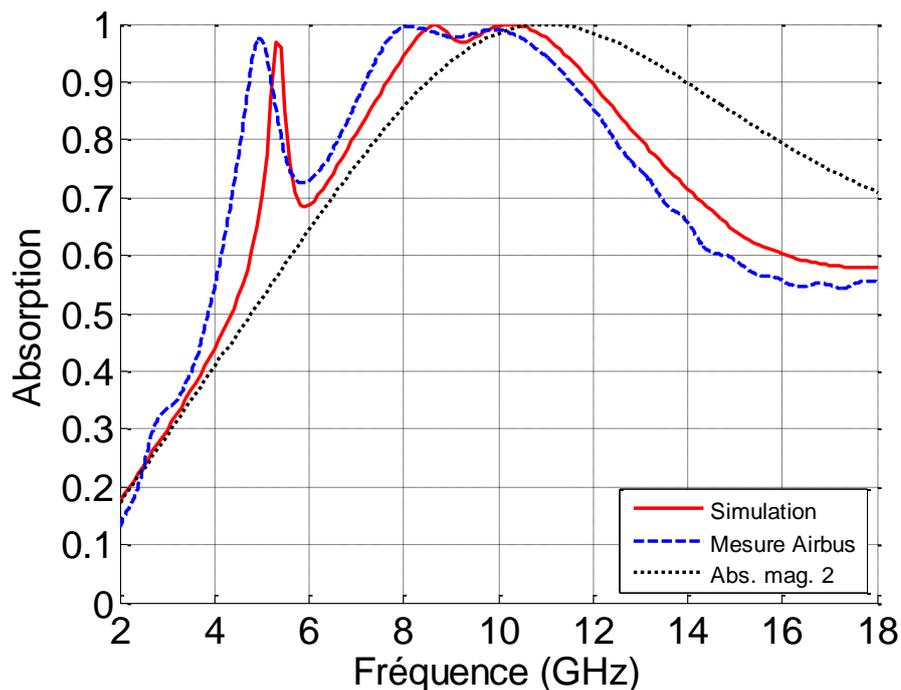


Figure 3.43- Comparaison de la simulation et la mesure de l'absorption de l'empilement Fallahi/absorbant magnétique 2 ainsi que l'absorbant magnétique 2 seul

La mesure et la simulation sont très proches. On observe un décalage de la bande d'absorption vers les basses fréquences et la création d'un pic autour de 5 GHz comme en simulation. L'utilisation d'absorbants à métamatériaux couplés à des matériaux traditionnels permet bien de réaliser de nouveaux types d'absorbants inédits qui peuvent répondre à de nouvelles problématiques. Le pic à 5 GHz a une absorption de 97 % en mesure. La bande d'absorption atteint un maximum de 99,5 % d'absorption.

Les résultats de mesures montrent une meilleure absorption que ceux de simulation. La bande est un peu plus basse en fréquence mais les conclusions sont les mêmes. L'absorption obtenue est très intéressante et peut être comparée à un absorbant magnétique 2 si on augmentait son épaisseur pour atteindre 2 mm. A cette épaisseur, l'absorbant magnétique 2 atteint une masse de 8 kg/m² alors que notre empilement ne fait que 7,7 kg/m². Nous obtenons donc un absorbant plus léger en comparaison d'un absorbant magnétique seul. L'épaisseur est néanmoins plus importante. Passons à la seconde structure.

b. BigG

La structure BigG est rappelée dans la figure 3.44. La mesure de ce prototype est présentée sur la figure 3.45.

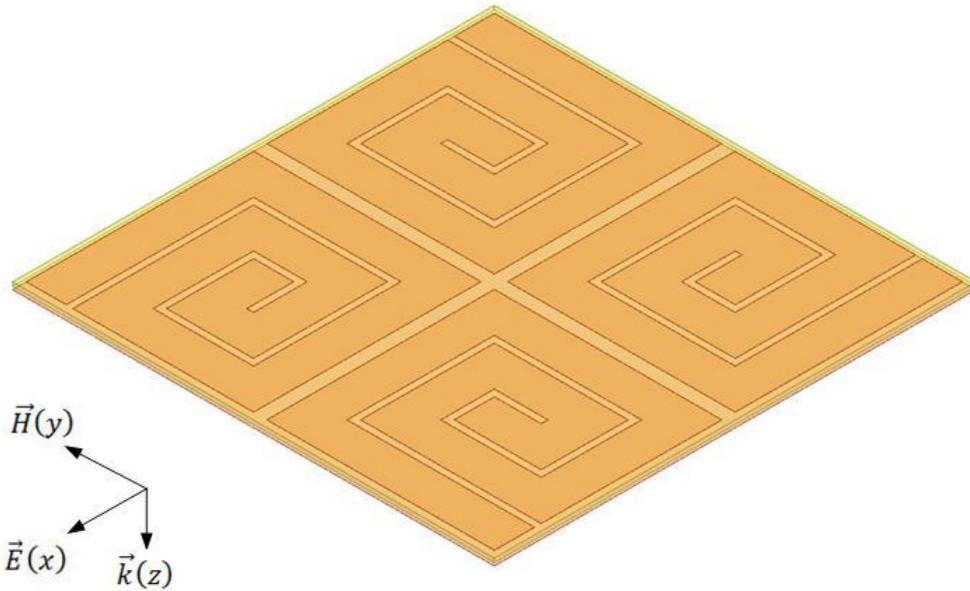


Figure 3.44 - Rappel de la modélisation 3D d'une cellule unité d'un absorbant de type BigG

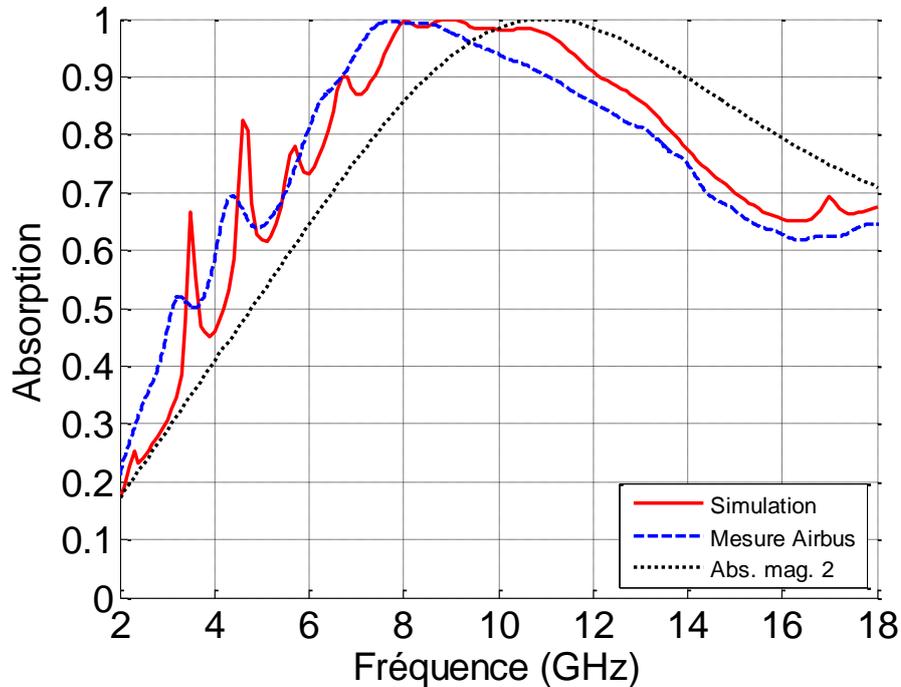


Figure 3.45 - Comparaison de la simulation et la mesure de l'absorption de l'empilement BigG/absorbant magnétique 2 ainsi que l'absorbant magnétique 2 seul

Les résultats de mesures sont légèrement décalés vers les basses fréquences par rapport aux simulations. On observe deux pics d'absorption peu importants à 3,2 GHz et 4,3 GHz en mesure. Cet empilement d'absorbant magnétique et d'absorbant à métamatériaux donne des résultats intéressants à étudier et montre que l'emploi de structures complexes peut permettre un décalage et l'élargissement de la bande de fonctionnement des absorbant à métamatériaux. L'absorbant à métamatériaux a une influence sur l'absorption. Les performances finales de cet empilement sont différentes de ce que l'on observe avec la structure de type Fallahi mais sont également comparable à ce que l'on obtient avec l'absorbant magnétique 2 plus épais, soit 2,3 mm dans ce cas. Donc un gain de masse plus important que ce que l'on avait précédemment. La masse de l'empilement est de 7,7

kg/m², la masse de l'absorbant magnétique 2 avec 2,3 mm d'épaisseur est de 9,2 kg/m². La structure suivante est un mélange des deux dernières.

c. CrossRoll Fallahi

La cellule unité de CrossRoll Fallahi est reproduite dans la figure 3.46.

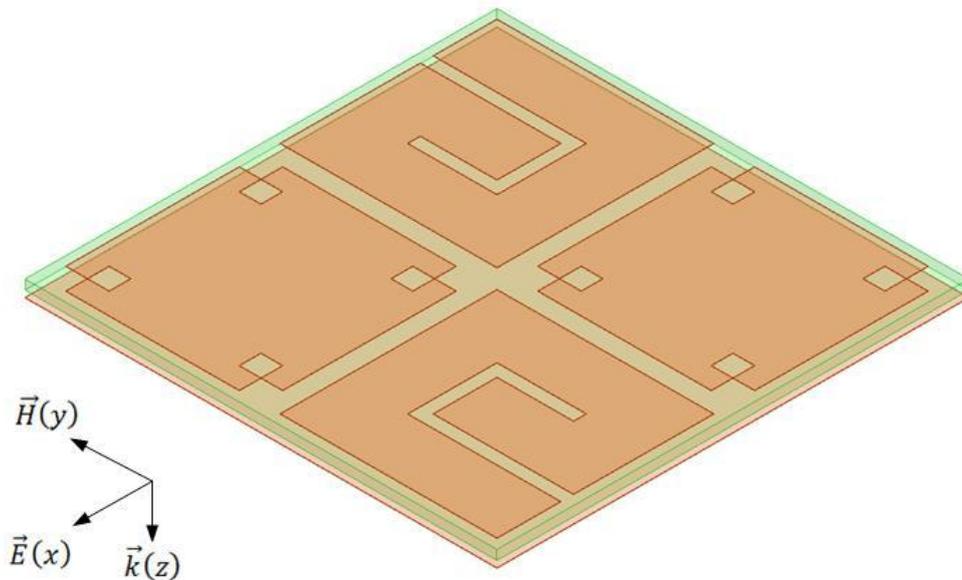


Figure 3.46- Rappel de la modélisation 3D d'une cellule unité d'un absorbant de type CrossRoll Fallahi

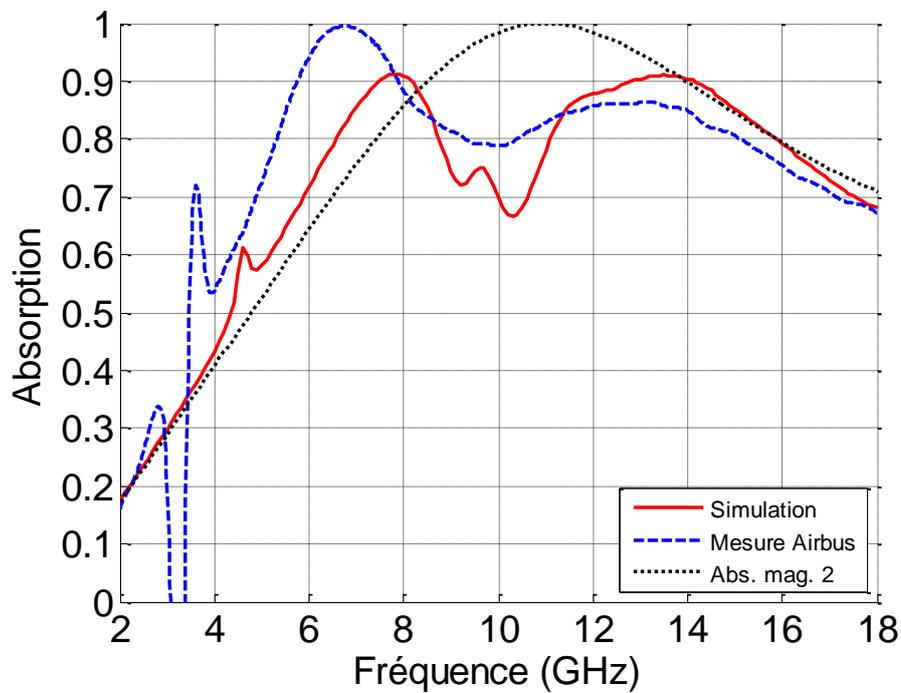


Figure 3.47- Comparaison de la simulation et la mesure de l'absorption de l'empilement CrossRoll Fallahi/absorbant magnétique 2 ainsi que l'absorbant magnétique 2 seul

La mesure et la simulation dans ce cas divergent (figure 3.47). On obtient une allure comparable mais avec un décalage en fréquence du premier pic d'absorption et de la bande qui suit. En mesure, le premier pic d'absorption se situe juste après un artefact autour de 3,6 GHz avec 71 % d'absorption et la bande est centrée autour de 6,7 GHz avec 99,5 % d'absorption. Ces résultats sont bien meilleurs que ceux obtenus en simulation. L'allure de l'absorption obtenue est tout à fait inédite et ne peut être comparé à un absorbant magnétique seul plus épais. Ce résultat est très intéressant car il met en évidence la faisabilité de la réalisation de nouveaux matériaux absorbants. Continuons notre étude par la structure suivante.

d. MultiCross

La structure MultiCross, tant utilisée dans cette thèse, est rappelée en figure 3.48. L'absorption issue de la structure hybride formée par l'absorbant magnétique et l'absorbant à métamatériaux est présentée dans la figure 3.49.

L'accord entre mesure et simulation est meilleur dans ce cas. On obtient de très bons résultats en mesure avec un décalage fort de la bande d'absorption et une allure de l'absorption proche de celle de l'absorbant magnétique 2 s'il faisait 3 mm d'épaisseur. L'absorption au premier pic à 5,6 GHz atteint 96,9 % et au deuxième point le plus absorbant à 7,8 GHz atteint 98,1 %. Ainsi, cette mesure montre un absorbant hybride capable d'avoir un diagramme d'absorption original et qui se rapproche d'un absorbant magnétique très épais tout en gardant une masse inférieure. La masse de l'absorbant magnétique en 3 mm d'épaisseur atteignant 12 kg/m² contre 7,7 kg/m² pour notre empilement. Cette optimisation est très intéressante. Voyons si l'on retrouve ce fonctionnement avec la dernière structure d'absorbant à métamatériaux.

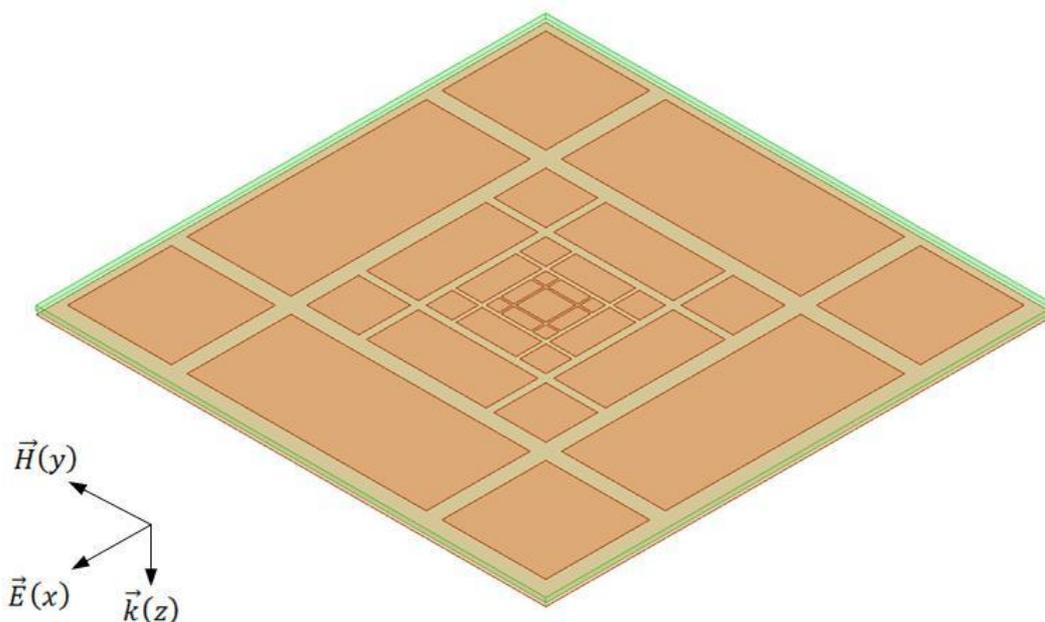


Figure 3.48 - Rappel de la vue 3D d'une cellule unité d'un absorbant de type MultiCross

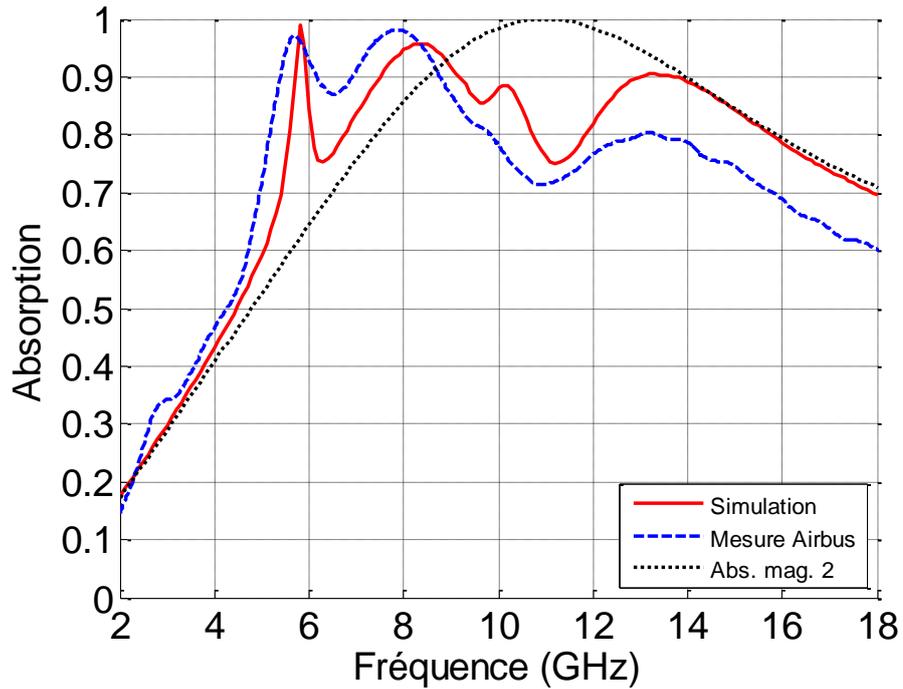


Figure 3.49 - Comparaison de la simulation et la mesure de l'absorption de l'empilement MultiCross/absorbant magnétique 2 ainsi que l'absorbant magnétique 2 seul

e. MultiPatches

Cette structure (figure 3.49) qui reprend l'allure de l'absorption de MultiCross mais en utilisant des patches circulaires donne l'absorption de la figure 3.50.

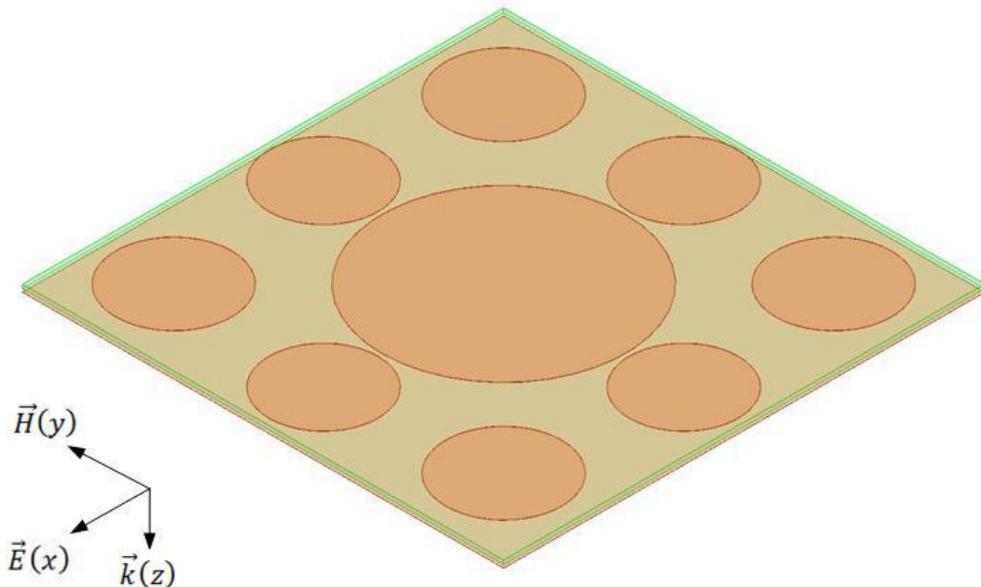


Figure 3.50 - Rappel de la modélisation 3D d'une cellule unité d'un absorbant de type MultiPatches

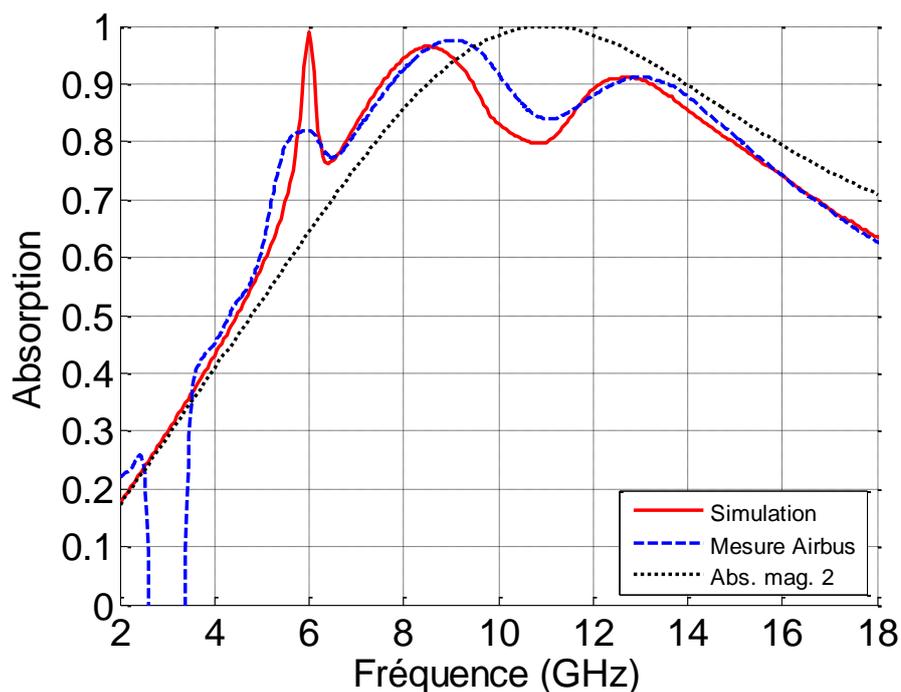


Figure 3.51- Comparaison de la simulation et la mesure de l'absorption de l'empilement MultiPatches/absorbant magnétique 2 ainsi que l'absorbant magnétique 2 seul

Contrairement à la mesure de MultiCross, nous n'obtenons pas une bande d'absorption large. Les pics d'absorptions sont situés aux mêmes fréquences mais le niveau d'absorption est différent. Il n'y a pas de création d'une bande large. Aussi, on peut voir que cette fois-ci la simulation et la mesures sont très proches. On observe une nouvelle fois un artefact entre 2,5 GHz et 3,5 GHz. Le pic d'absorption important autour de 6 GHz en simulation est très atténué en mesure. Le point où l'on observe le plus d'absorption en mesure se situe à 9 GHz avec 97,5 % d'absorption. L'allure de l'absorption est très originale et met en avant le potentiel des matériaux absorbants hybrides pour la conception d'absorbants innovants.

4. Conclusion des mesures sur le couplage d'absorbants

Les différentes mesures réalisées sur les absorbants hybrides sont concluantes. Nous obtenons des résultats proches de ce que l'on a pu observer en simulation. Dans la plupart des cas, les résultats de mesures sont meilleurs. Seule la structure MultiPatches montre une dégradation entre simulation et mesure. Une forte amélioration des performances est observées dans le cas de l'absorbant utilisant la structure MultiCross. On change d'ailleurs de type de fonctionnement en passant de plusieurs pics d'absorption en simulation à la création d'une bande d'absorption en mesure.

Ces résultats sont la confirmation de la possibilité de créer des absorbants hybrides capables d'avoir des performances nouvelles. On peut obtenir soit un élargissement de la bande de fonctionnement en plaçant correctement de nouveaux pics d'absorption, soit la création de pics d'absorption à certaines fréquences ciblées, soit la diminution de la masse d'un absorbant. Ces

matériaux peuvent être utilisés dans de nombreuses applications (CEM, furtivité, ...) et apporter des améliorations sur des systèmes existants.

V. Conclusion sur les réalisations et les mesures

L'ensemble de ces mesures met en avant le potentiel des absorbants à métamatériaux. Les premières réalisations inspirées de FSS sont assez complexes et difficiles à appréhender. Les structures à base de patchs carrés, rectangles ou circulaires sont faciles à développer et à optimiser grâce aux méthodes développées dans le chapitre précédent. Différentes méthodes d'optimisations sont applicables à ces structures. Il est même possible d'optimiser leur fonctionnement après fabrication comme nous l'avons montré avec la variation de l'espacement entre substrat et plan de masse. Nos matériaux sont peu dépendants de l'angle d'incidence, et de la polarisation de l'onde incidente pour les patchs circulaires. Il est possible de conformer ces structures pour les utiliser sur des surfaces courbes. Enfin les absorbants à métamatériaux peuvent être utilisés en complément d'autres absorbants pour créer un nouveau type de matériau. Ils peuvent être utilisés dans un nombre important d'applications, comme la furtivité radar ou la CEM, et apporter des possibilités innovantes d'améliorations de systèmes existants. Les mesures sur les absorbants à métamatériaux mettent en avant le potentiel important de ces nouveaux matériaux pour la création d'absorbants inédits.

Les différentes campagnes de mesures ont été très longues et répétées à de nombreuses reprises afin d'avoir les résultats les plus propres possibles. La réalisation de mesures et l'extraction de l'ensemble des données ont pris une part importante du temps pendant ma thèse. J'ai néanmoins acquis aujourd'hui une certaine dextérité dans la conception de métamatériaux et la réalisation de mesures en chambre anéchoïque.

CONCLUSION GENERALE

Durant mes travaux de thèse, nous nous sommes intéressés aux absorbants à métamatériaux au travers du projet REI Meta Absorbant. Les absorbants à métamatériaux sont une nouvelle piste pour la réalisation d'absorbants innovants. Tout au long de ma thèse, nous avons cherché à développer des absorbants simples à mettre en œuvre. Pour cela, nous employons des matériaux courants et avons défini des méthodes pour les concevoir et les optimiser.

Dans le premier chapitre de ce manuscrit, je rappelle les notions pour appréhender les absorbants à métamatériaux et notamment l'importance de la réduction de la surface équivalente radar. Différentes techniques pour sa diminution ont été présentées dont celle qui nous intéresse, l'utilisation d'absorbants. Les différents types d'absorbants existants ont été présentés ainsi que leurs fonctionnements respectifs. Nous avons abordé les premiers travaux sur les absorbants à métamatériaux qui ont été réalisés avant que je ne débute ma thèse. Il s'agit d'une piste importante pour le développement de nouvelles technologies d'absorbants qui a pris beaucoup d'ampleur durant ma thèse.

Dans le second chapitre, nous abordons les travaux de conception et de simulation qui ont été réalisés. Tout d'abord les différentes structures unitaires simples que nous utilisons dans le cadre du développement d'absorbants à métamatériaux sont présentées. Les structures utilisant des patchs carrés, rectangles et circulaires sont étudiées en détail. Des modèles de calcul de la fréquence de fonctionnement et d'optimisation du niveau d'absorption sont détaillés. Ces modèles sont mis en application dans des simulations pour illustrer les possibilités données par nos absorbants. L'optimisation du niveau d'absorption permet de tendre vers une absorption totale. Deux méthodes d'optimisations de la bande passante sont présentées, l'une tirée des couches de Jaumann et l'autre des absorbants comportant des circuits analogiques. Nous présentons les différentes structures qui ont été conçues lors de ma thèse pour la réalisation de prototypes. Les différentes simulations caractérisant ces matériaux sont données et le comportement de chaque structure est analysé. Grâce à ces structures, nous avons réalisé des simulations de différents cas illustrant les possibilités qu'offrent ces matériaux. La conception d'une structure à patchs circulaires imitant le fonctionnement d'une structure à patchs carrés est la première simulation particulièrement intéressante. Puis deux possibilités d'optimisation du fonctionnement de ces structures sont étudiées. La simulation de nos absorbants à métamatériaux sur support courbé montre la possibilité de les conformer. Et enfin l'étude du couplage de différents types d'absorbants pour la réalisation d'absorbants hybrides permet de présenter le caractère innovants de ces absorbants à métamatériaux.

Le troisième chapitre est consacré aux mesures et aux réalisations que nous avons faites. Nous présentons l'ensemble des prototypes que nous avons réalisés et faisons la comparaison des simulations et des mesures. Nous retrouvons en mesure pour chaque prototype un comportement

assez similaire à ce que l'on a en simulation. Quelques divergences peuvent apparaître mais dans la majorité des cas, le fonctionnement en mesure des prototypes est meilleur qu'en simulation. Nous réalisons les mesures correspondantes aux simulations particulièrement intéressantes. Après la fabrication de la structure MultiPatches, nous avons vérifié son fonctionnement. Les différentes optimisations sur la structure MultiCross sont réalisées et donnent de bons résultats. L'épaisseur fine du substrat de nos absorbants à métamatériaux a permis de les enrouler autour de cylindres. Enfin, nous mesurons l'absorption du couplage des absorbants à métamatériaux avec des absorbants magnétiques. Ce type de couplage permet d'obtenir des absorbants inédits qui permettent d'atteindre les performances de matériaux plus lourds que ceux créés ou des diagrammes d'absorption complètement nouveaux. Les travaux sur les absorbants à métamatériaux ont fait l'objet d'un brevet et d'une publication.

Le but de ma thèse a été de développer et réaliser des absorbants à métamatériaux avec des performances inédites. Nous avons réalisé des absorbants résonants très petits devant la longueur d'onde et pouvant atteindre une absorption totale. Ces absorbants peuvent couvrir de petites bandes d'absorption et sont faciles à concevoir grâce aux modèles que nous avons présentés. Les matériaux les constituants sont couramment utilisés pour la réalisation de circuits imprimés basiques. Les absorbants à métamatériaux présentés répondent bien aux exigences souhaitées et la réalisation d'un brevet et d'une publication montre le caractère innovant de nos travaux.

Les absorbants à métamatériaux peuvent avoir de multiples utilisations pour des applications CEM et radar. Ils peuvent être facilement transposés à différentes fréquences et peuvent être introduit dans des matériaux existants. A la fin de ma thèse, je travaille sur deux applications de ces matériaux. La première est la réduction de la SER d'une éolienne à 5,5 GHz, avec plusieurs contraintes techniques comme la compatibilité avec les matériaux constitutifs de l'éolienne et la compatibilité foudre. Le second est l'invisibilité d'une partie de l'empennage d'un aéronef à 125 MHz, avec comme contrainte de garder une épaisseur faible devant la longueur d'onde.

ANNEXE : AUTRES TRAVAUX

I. Introduction

Dans cette annexe, je traite des différentes recherches auxquels j'ai participé à l'IEF. Dans un premier temps, je reviens sur mes travaux de Master 2 sur l'obtention d'un indice négatif avec une structure utilisant des pistes coupées. Puis, je présente une réalisation plus récente d'un démonstrateur pour le changement de direction d'une onde par l'utilisation de la transformation d'espace.

II. Obtention d'un indice négatif avec des pistes coupées

Lors de mon Master 2 en 2007/2008, j'étais en apprentissage à l'IEF. Durant cette période, j'ai développé une technique d'obtention d'un indice négatif qui emploie des pistes coupées. Pour ce faire, au début de mon apprentissage l'équipe d'encadrement m'a orienté sur les travaux de J. Zhou⁸⁴ qui utilise des alignements de petites pistes pour obtenir un indice négatif. La figure 4.1 présente la structure unité et l'allure du prototype, obtenues dans l'article référence.

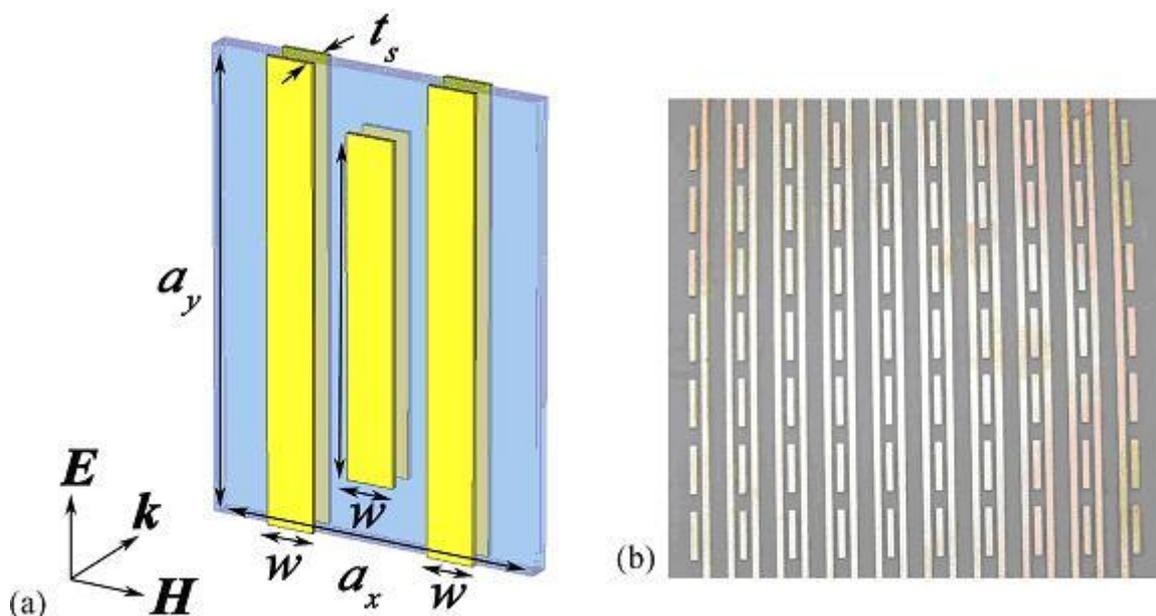


Figure 4.1 - (a) cellule unité, et (b) photo du prototype issues des travaux de J. Zhou

Cette structure est constituée de pistes continues et discontinues en cuivre disposées de façon symétrique sur les deux faces d'un substrat en époxy.

Nous avons commencé par une étude de ce que présente cet article. La réalisation de simulation de chaque élément séparé à permis de mettre en évidence que ce sont les lignes discontinues qui permettent de créer une permittivité et une perméabilité négative. Les lignes

continues permettent de faire correspondre en fréquence cette permittivité et cette perméabilité négative. Il est donc possible de réaliser un indice négatif avec uniquement des lignes discontinues mais il faut trouver une méthode pour que chaque paramètres concordent en fréquence. De plus la suppression des lignes métalliques continues permet d'améliorer le coefficient de transmission de la structure (figure 4.2).

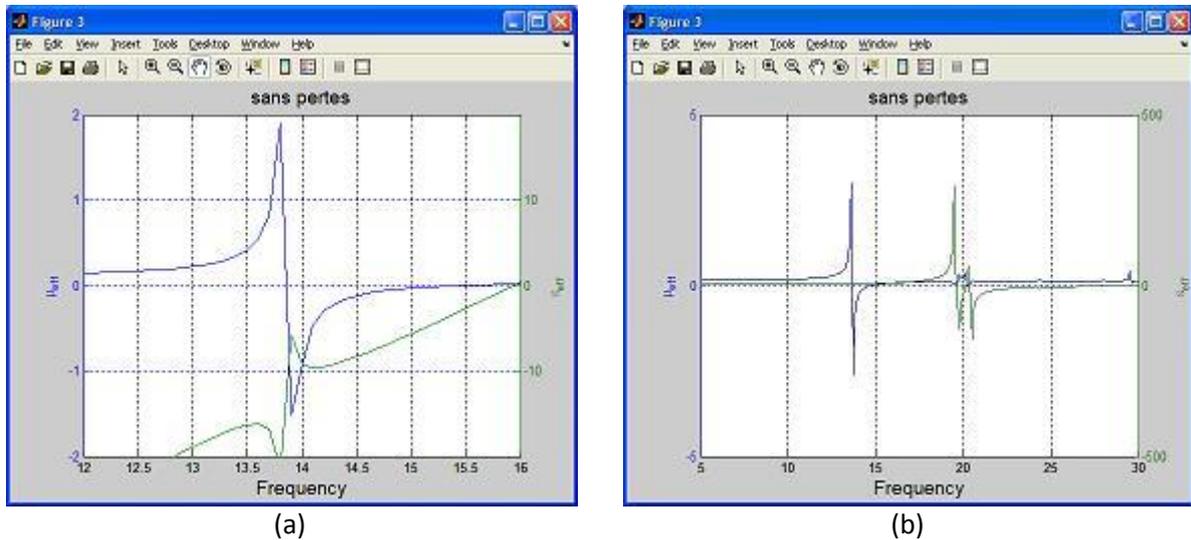


Figure 4.2 - (a) réponse de la structure de l'équipe de J. Zhou, et (b) réponse de la structure de l'équipe de J. Zhou sans les pistes continues

Nous avons réalisé une batterie de simulations qui a mis en évidence qu'il n'était pas possible de réaliser un indice négatif en gardant les pistes discontinues disposées de façon symétrique par rapport au substrat. Ce constat, nous a incité à casser la symétrie entre les lignes discontinues qui se situe de chaque côté du substrat. Nous avons donc défini ces paramètres et avons cherché le plus influent (figure 4.3).

Il est ressorti que le paramètre le plus influent est la variation de symétrie selon dx comme le montre les résultats de simulations de la figure 4.4.

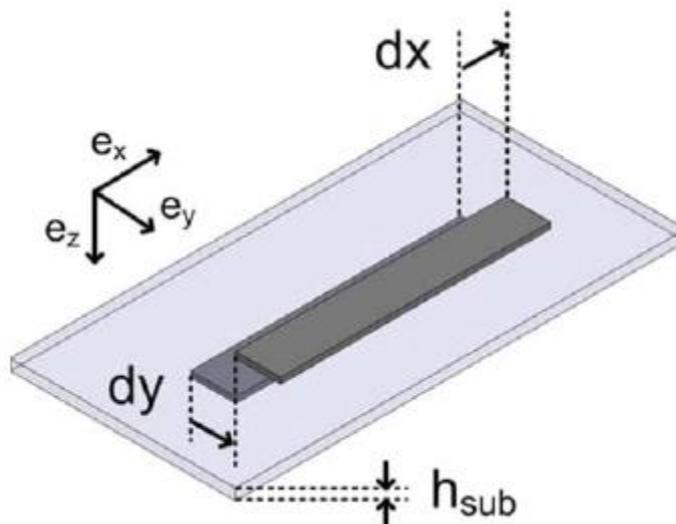


Figure 4.3 - Paramètres géométriques qu'il est possible de faire varier

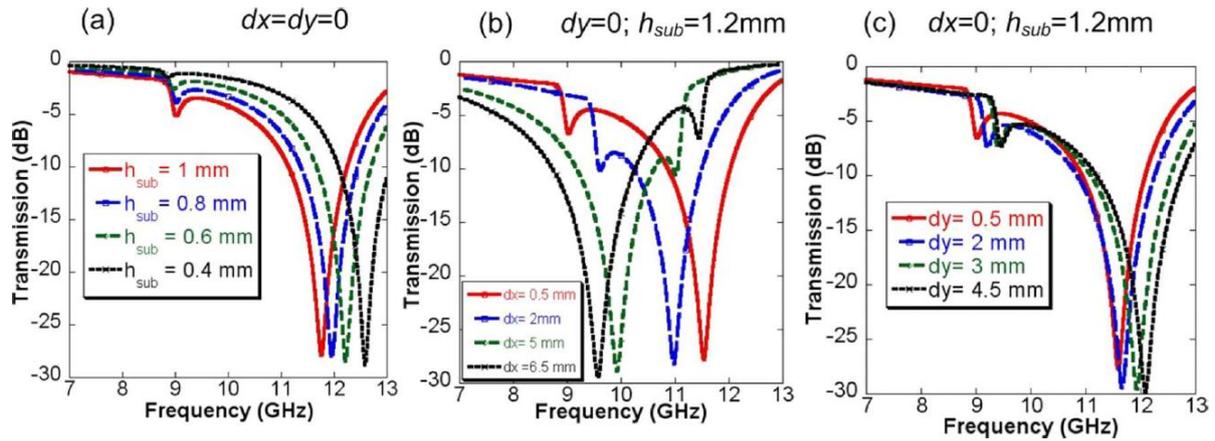


Figure 4.4 - (a) variation de l'épaisseur du substrat, (b) variation du décalage selon x, et (c) variation du décalage selon y

Afin de vérifier ces résultats, nous nous sommes intéressés à la fabrication de prototypes. Nous avons donc réalisé les simulations nécessaires pour définir un décalage dx entre les lignes suffisant pour faire concorder la permittivité et la perméabilité négative à une même fréquence. Les premiers prototypes ont été réalisés sur une fraiseuse à circuit imprimé de marque LPKF disponible à l'IEF. Nous avons utilisé les matériaux disponible à l'IEF c'est à dire un substrat en époxy de 1,2 mm d'épaisseur et de permittivité $\epsilon_r = 3,6 + i.0,072$ qui a une métallisation de 35 μm sur ces deux faces. La cellule unité (figure 4.5) que nous avons utilisée mesure en longueur $ax = 19 \text{ mm}$ et en largeur $ay = 9,5 \text{ mm}$. Les pistes mesurent en longueur $l = 9,5 \text{ mm}$ et en largeur $w = 0,3 \text{ mm}$. Nous avons utilisé deux variations de dx , 2 mm et 4,75 mm.

Nous avons obtenu avec ces prototypes les résultats de la figure 4.6 pour la permittivité et la perméabilité de ce métamatériau. L'indice de réfraction est donné dans la figure 4.7.

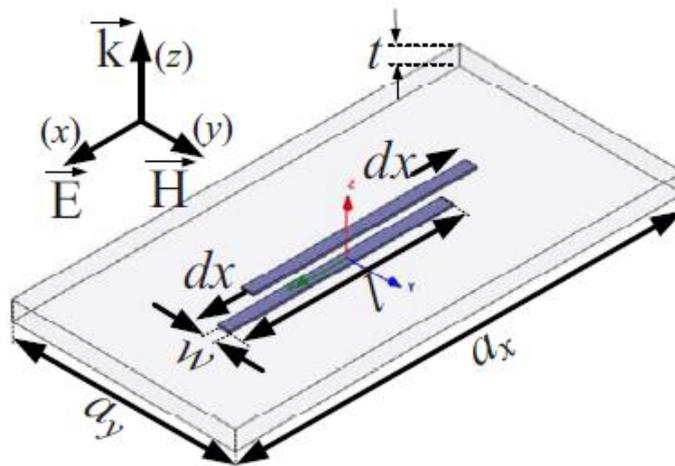


Figure 4.5 - Cellule unité de notre prototype avec les différents paramètres géométriques

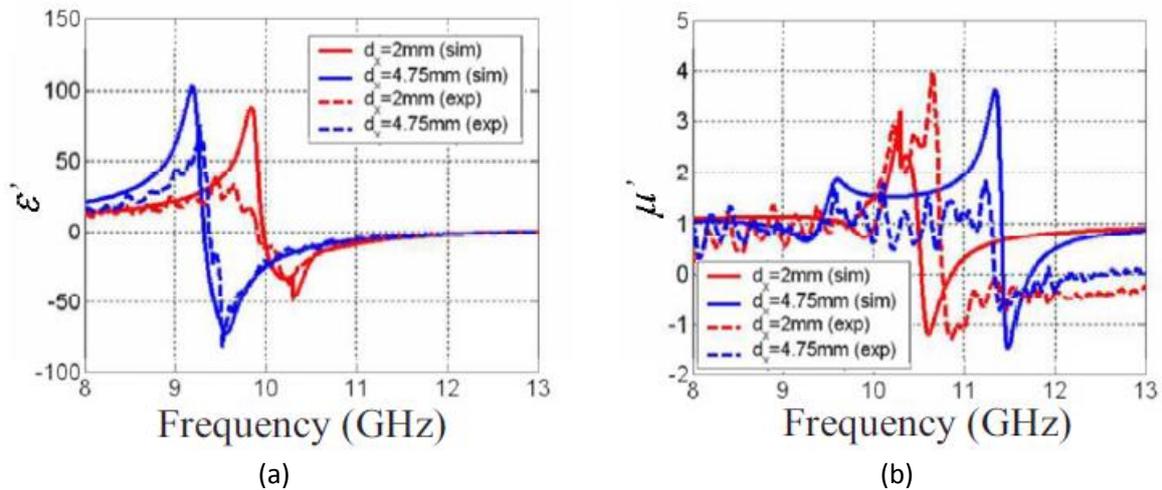


Figure 4.6 - (a) comparaison de la partie réelle de la permittivité relative pour deux valeurs de décalage selon x , et (b) comparaison de la partie réelle de la perméabilité relative pour deux valeurs de décalage selon x

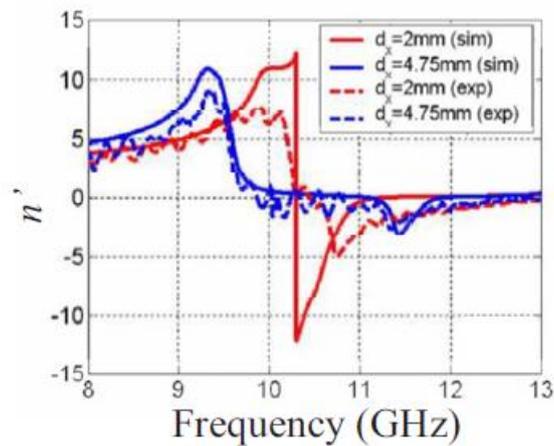


Figure 4.7 - Comparaison de la partie réelle de l'indice pour deux valeurs de décalage selon x

Ces premiers résultats de mesures permettent de confirmer ce que nous observons en simulation et de valider l'hypothèse qu'il est possible de réaliser un indice négatif avec des lignes coupées. Après cette étape, nous avons cherché à optimiser la structure unité de base et à trouver des règles de réalisation pour obtenir facilement un indice négatif maximum. Nous avons remarqué que l'on fait concorder le maximum de la permittivité et de la perméabilité négative dès que l'on crée un décalage régulier entre les patches disposés de chaque côté du substrat. Ainsi, dans les réalisations qui ont suivi, nous avons défini un décalage dx entre le centre de chaque piste égal à la longueur de la cellule unité, soit une cellule unité telle que la figure 4.8.

A partir de cela, nous avons décidé de réaliser de nouveaux prototypes. Sur ceux qui ont été fabriqués le plus intéressant a permis de réaliser des mesures en multicouche. Ce prototype a des dimensions identiques pour la longueur de la cellule unité et pour la longueur des pistes, soit : $ax = 19 \text{ mm}$, $ay = 9,5 \text{ mm}$, $l = 19 \text{ mm}$ et $w = 0,3 \text{ mm}$. Le substrat en époxy a une épaisseur de $h = 1,2 \text{ mm}$ et une permittivité de $\epsilon_r = 3,9 + i.0,078$. La structure comporte peut de métal ce qui permet d'avoir un bon coefficient de transmission. Cette réalisation a été faite en plusieurs exemplaires par un prestataire extérieur. Il se présente comme dans la figure 4.9.

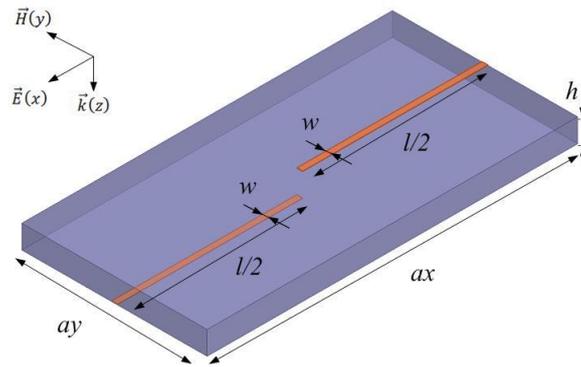


Figure 4.8 - Cellule unité de notre prototype optimisé avec les différents paramètres géométriques



Figure 4.9 - Notre prototype optimisé

Sur la figure 4.10 est présentée l'indice obtenu par la simulation et la mesure pour une couche de ce métamatériau, puis la comparaison des différentes simulations pour une à quatre couches avec un espacement de 1 mm entre chaque couche.

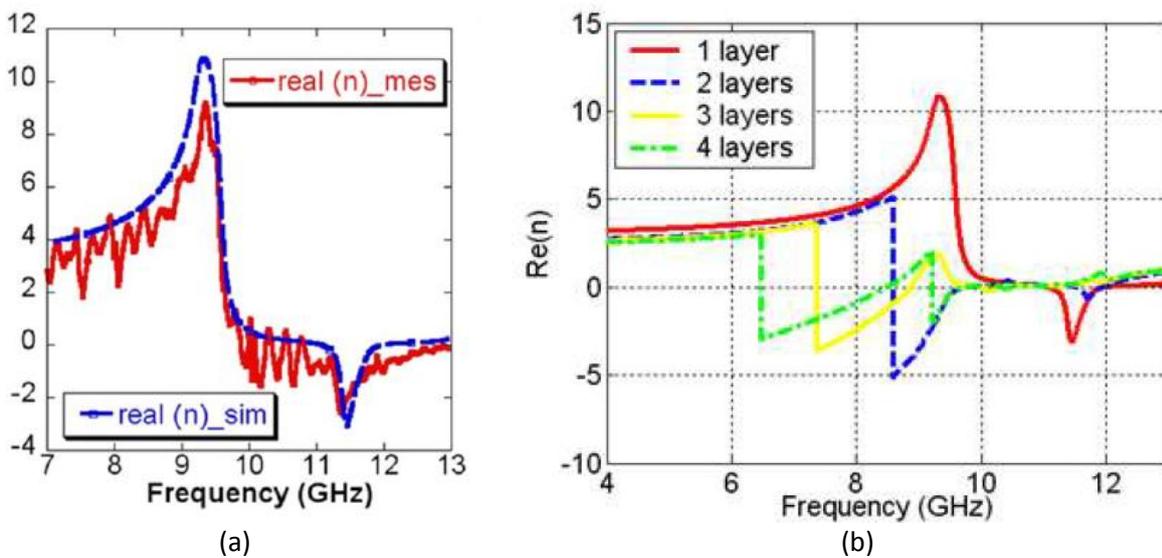


Figure 4.10- (a) comparaison de la partie réelle de l'indice en simulation et en mesure, et (b) partie réelle de l'indice pour 1 à 4 couches

On peut voir que malgré l'augmentation du nombre de couche, on garde un indice négatif. Cette plage d'indice négatif à tendance à descendre en fréquence avec l'augmentation du nombre de couche. Néanmoins, nous avons voulu vérifier de façon expérimentale si l'on avait bien un indice négatif. Pour cela, nous avons réalisé un prisme à partir des dimensions du prototype précédent qui permet de mettre en évidence un indice négatif par la mesure de l'angle de l'onde en sortie du prisme. On peut, avec le prisme, déduire directement l'indice grâce à la loi de Snell-Descartes sur la réfraction qui dit :

$$n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2 \quad (92)$$

Avec n_1 indice de réfraction du milieu où se propage l'onde incidente, n_2 indice de réfraction du milieu où l'onde est réfractée, θ_1 angle de l'onde incidente et θ_2 angle de l'onde réfractée.

Nous nous sommes appuyés sur une publication de M. Kang⁸⁵ pour la réalisation de ce prisme. Avant la réalisation du prototype, le prisme a été simulé sous Ansys HFSS 10.1 et a montré qu'un indice négatif peut être obtenu autour de 10,2 GHz (figure 4.11).

Après la validation du fonctionnement par la simulation, nous avons réalisé les différentes couches qui constituent le prisme et l'avons assemblé pour le mesurer dans la chambre anéchoïque de l'IEF. Nous avons pu déduire les valeurs d'indice de nos mesures et les avons tracés (figure 4.12).

Les résultats obtenus confirment qu'il est possible d'obtenir un indice négatif avec des pistes coupées et décalées. Des écarts entre mesure et simulation apparaissent mais restent modérés. Que ce soit en extrayant l'indice à partir de la réflexion et la transmission ou par l'utilisation d'un prisme, nous obtenons dans les deux cas un indice négatif, en simulation et en mesure.

Les travaux réalisés durant mon Master 2 ont permis la réalisation de trois publications^{86 87 88}, chacune sur un aspect distinct des pistes coupées. Ces recherches m'ont permis d'intégrer de nombreuses notions et de me servir de façon approfondie de Ansys HFSS et Matlab. Ces compétences m'ont aidé à débiter la thèse et à mener à bien mon étude sur les absorbants à métamatériaux.

La partie suivante aborde une réalisation annexe faite durant ma thèse.

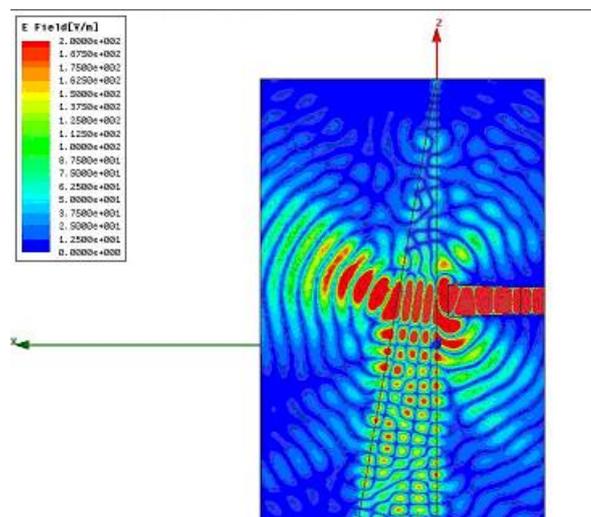


Figure 4.11 - Simulation à 10,2 GHz du prisme à pistes coupées

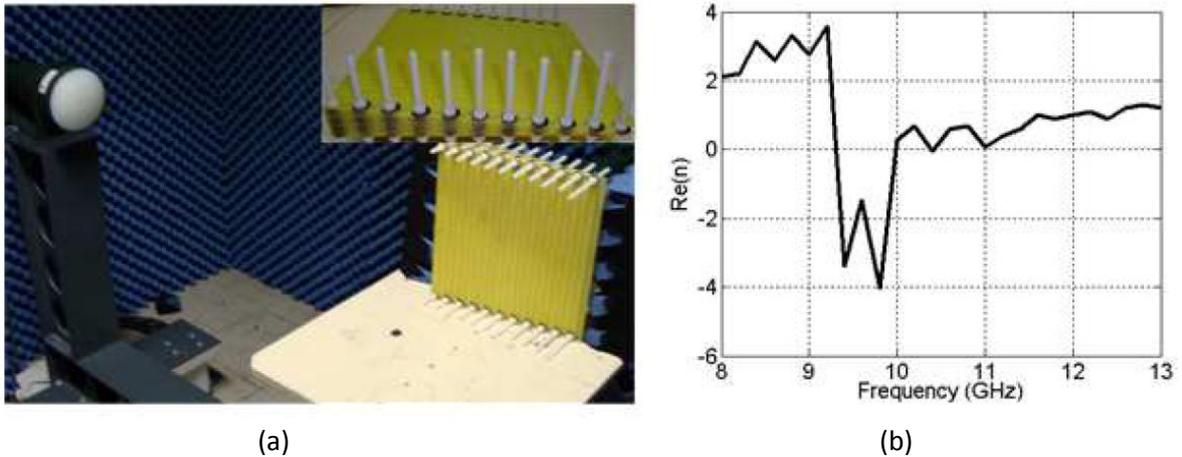


Figure 4.12 - (a) photo du prototype de prisme et du banc de mesure, et (b) valeur de l'indice déduite des mesures

III. Démonstrateur pour la transformation d'espace

Cette activité annexe à ma thèse a consisté à la réalisation et à la mesure d'un démonstrateur de l'application de la transformation d'espace. La conception de ce démonstrateur a été faite par un autre membre de l'équipe. Pour la fabrication et les mesures, j'ai utilisé les compétences acquises lors de mes recherches sur les absorbants à métamatériaux. Le fonctionnement de ce démonstrateur est simple. Nous cherchons à changer la direction d'émission d'une antenne en la couplant à un métamatériau. Ce métamatériau va modifier l'espace qui entoure l'antenne par la modification de la permittivité et de la perméabilité en différents points dans ce dernier. Le matériau créé a la forme de la figure 4.13.

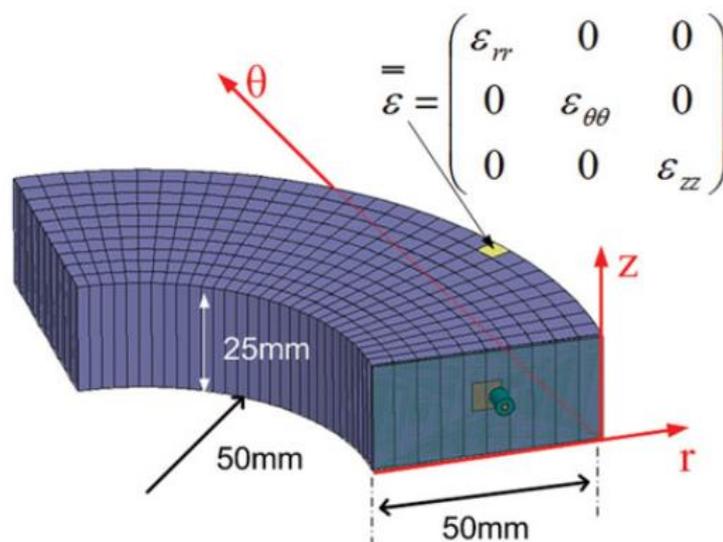


Figure 4.13 - Modélisation 3D de la structure pour changer la direction d'émission par transformation d'espace

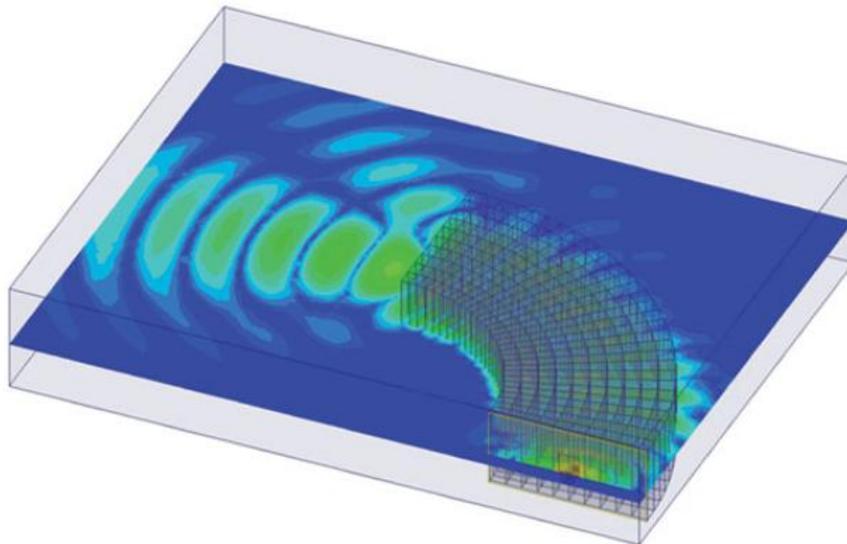


Figure 4.14 - Distribution de l'énergie dans la structure à transformation d'espace

Différentes zones ont été définies dans cette structure et chaque permittivité et perméabilité dans ces zones ont été calculées pour produire une courbure de l'onde et ainsi amener une déviation de l'onde émise par l'antenne de 90°. La visualisation de la distribution d'énergie dans la structure en simulation permet de voir ce que nous avons cherché à réaliser (figure 4.14).

Le découpage en différentes zones du matériau a permis de calculer un résonateur pour chacune de ces zones qui a la caractéristique souhaitée. Chacun de ces résonateurs ont été placés sur des lames de RO3003⁸⁹ afin de créer une structure régulière. Mon intervention a commencé à ce moment quand il a fallu commander et assembler les différentes lames. Nous avons réalisé avec l'atelier mécanique de l'IEF un moule démontable de maintien des lames pour réaliser leur enrésinement. Ce moule a été détruit quand nous en avons sorti le prototype (figure 4.15).

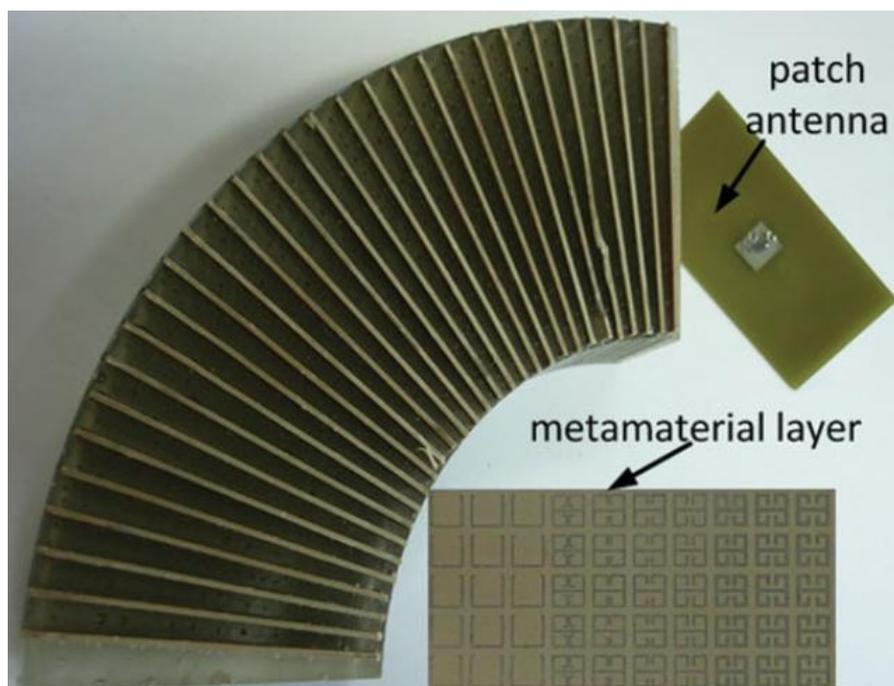


Figure 4.15 - Prototype final de la structure à transformation d'espace

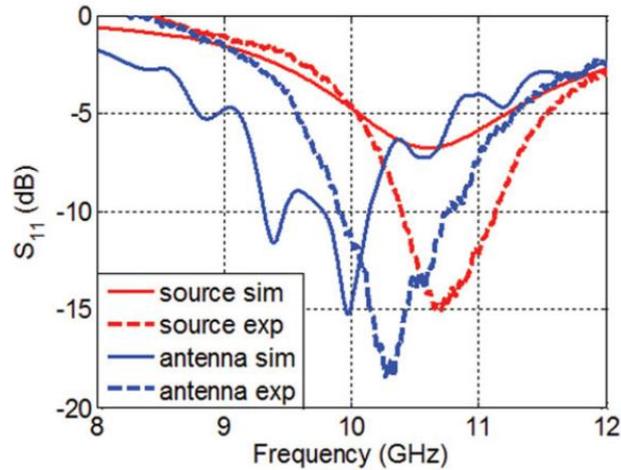
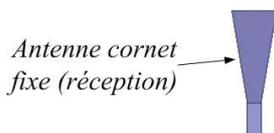
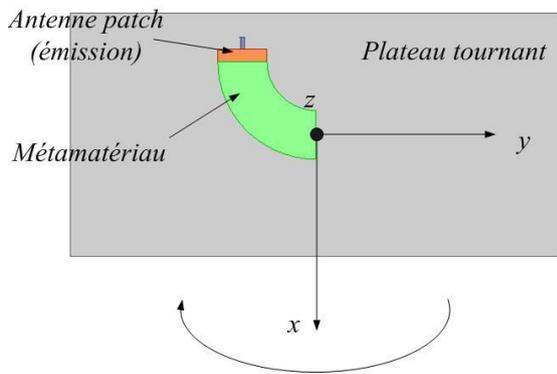


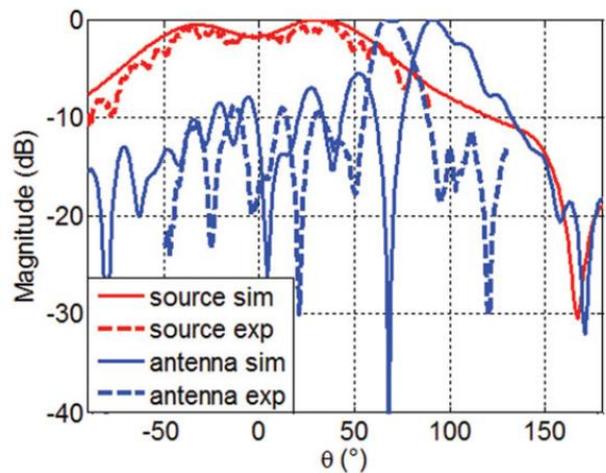
Figure 4.16 - Adaptation en mesure comparée à la simulation et à l'antenne patch seule (nommée "source")

Nous avons ainsi pu mesurer l'adaptation de ce montage que nous avons comparé à l'adaptation trouvée en simulation et l'adaptation de l'antenne patch seule (figure 4.16).

L'antenne patch seule et la structure créée ont des performances meilleures qu'en simulation. On observe que l'ajout du métamatériau créé un décalage en fréquence du fonctionnement de l'antenne patch. A partir de cette mesure, nous avons utilisé la fréquence où l'adaptation est la meilleure pour mesurer le rayonnement angulaire de l'ensemble de la structure. J'ai réalisé le montage permettant cette mesure sur la structure. Pour cela j'ai utilisé le plateau tournant de la chambre anéchoïque de l'IEF et une antenne fixe afin de mesurer la direction du rayonnement de notre structure. En faisant tourner le plateau, il est possible de définir l'angle auquel le rayonnement est le plus fort (figure 4.17).



(a)



(b)

Figure 4.17 - (a) schéma du fonctionnement du banc de mesure, et (b) mesure du rayonnement en fonction de l'angle

Pour l'antenne patch seule, le maximum de rayonnement se situe autour de 0° , quand le patch est face à l'antenne cornet. Pour la structure que nous avons créée, le maximum de rayonnement se situe autour de 66° . L'angle recherché est de 90° , c'est ce qui a été développé en simulation. La différence entre simulation et mesure peut s'expliquer par une fabrication qui ne correspond pas tout à fait à la simulation avec des écarts minimes dans le positionnement des lames de résonateurs et une résine qui n'est pas tout à fait homogène.

La fabrication du prototype que j'ai réalisé en partie valide la possibilité du changement de direction d'une onde par l'utilisation de la transformation d'espace. Nous avons réalisé une publication⁹⁰ sur ces travaux.

IV. Conclusion sur les autres travaux

Les travaux réalisés durant mon Master 2 ont permis de me préparer aux travaux que j'allais réaliser durant la thèse. Cet apprentissage m'a permis de connaître le laboratoire, de connaître les équipes, de travailler avec les logiciels utilisés à l'IEF et de réaliser des mesures en chambre anéchoïque. Cette première collaboration fructueuse a permis de réaliser trois publications.

Les travaux réalisés en parallèle avec ma thèse ont été une source d'échange important. J'ai pu apporter mon savoir-faire aux personnes avec lesquelles j'ai collaboré. Aussi, j'ai pu approcher la transformation d'espace qui ne rentre pas dans le cadre des recherches lors de ma thèse. Une publication a été réalisée sur ces travaux.

REFERENCES

-
- ¹ Engheta, N., "Thin absorbing screens using metamaterial surfaces", *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2002, IEEE*, vol.2, no., pp. 392- 395 vol.2, **2002**
- ² Knott, E. F.; Shaeffer, J. & Tuley, M., "Radar cross section", *SciTech Publishing*, **2004**
- ³ Jenn, D. C., "Radar and laser cross section engineering", Washington, DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, 1995., **1995**
- ⁴ Image issue du domaine publique
- ⁵ Image issue du domaine publique
- ⁶ Knott, E. F.; Shaeffer, J. & Tuley, M., "Radar cross section", *SciTech Publishing*, **2004**
- ⁷ Capaccioli, S., Lucchesi, M., Rolla, P. A., *et al.*, "Dielectric response analysis of a conducting polymer dominated by the hopping charge transport", *Journal of Physics: Condensed Matter*, **1998**, vol. 10, no 25, p. 5595
- ⁸ Tanner, H. A., US Patent 2977591. **1961**
- ⁹ Dallenbach, W.; Kleinstember, W., *Hochfreq. u Elektroak*, **1938**, 51, 152.
- ¹⁰ Salisbury, W. W., US Patent 2599944. **1952**
- ¹¹ Neher, L. K., US Patent 2656535. **1953**
- ¹² Chen, C. *Southeastcon '92, Proceedings, IEEE*, **1992**, 1, 71.
- ¹³ Naishadham, K., Kadaba, P.K., *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **1991**, 39, 1158
- ¹⁴ Wright, P. V.; Wong, T. C. P.; Chambers, B. & Anderson, A. P., "Electrical characteristics of polypyrrole composites at microwave frequencies", *Advanced Materials for Optics and Electronics, John Wiley & Sons Ltd.*, **1994**, 4, 253-263
- ¹⁵ Wong, T. C. P.; Chambers, B.; Anderson, A. P.; Wright, P. V., *Elect. Lett.*, **1992**, 28, 1651
- ¹⁶ Du Toit, L.J.; Cloete, Jh, "Advances in the design of Jaumann absorbers", *Antennas and Propagation Society International Symposium, 1990. AP-S. Merging Technologies for the 90's. Digest.* , vol., no., pp.1212,1215 vol.3, 7-11 May **1990**
- ¹⁷ Du Toit, L.J.; Cloete, J.H., "Optimal equiripple solution to the Jaumann absorber problem", *Antennas and Propagation Society International Symposium, 1992. AP-S. 1992 Digest. Held in Conjunction with: URSI Radio Science Meeting and Nuclear EMP Meeting.*, IEEE , vol., no., pp.703,706 vol.2, 18-25 Jul **1992**

-
- ¹⁸ Wright, P. V., Wong, T.C.P., Chambers, B., Anderson, A.P., *Advanced Materials for Optics and Electronics* **1994**, 4, 253
- ¹⁹ Kuehl, S. A., Grove, S.S., Kuehl, E., Bingle, M., Cloete, J.H., "Manufacture of Microwave Chiral Materials and Their Electromagnetic Properties", *Advances in Complex Electromagnetic Materials*; Kluwer Academic Publishers: Netherlands, **1997**
- ²⁰ Munk, B. A., "Frequency Selective Surfaces: Theory and Design", *John Wiley & Sons, Inc.*, New York, **2000**
- ²¹ Munk, B. A., "Frequency Selective Surfaces: Theory and Design", *John Wiley & Sons, Inc.*, New York, **2000**
- ²² Saville, P., RESEARCH, D. & (CANADA), D. A. D. (Ed.), "Review of Radar Absorbing Materials", DEFENCE RESEARCH AND DEVELOPMENT ATLANTIC DARTMOUTH (CANADA), **2005**
- ²³ Costa, F. & Monorchio, A., "Multiband electromagnetic wave absorber based on reactive impedance ground planes", *Microwaves, Antennas Propagation, IET*, **2010**, 4, 1720-1727
- ²⁴ Costa, F.; Monorchio, A. & Manara, G., "Analysis and Design of Ultra Thin Electromagnetic Absorbers Comprising Resistively Loaded High Impedance Surfaces", *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, **2010**, 58, 1551-1558
- ²⁵ Fusco, V.; Cahill, R.; Hu, W. & Simms, S., "Ultra-thin tunable microwave absorber using liquid crystals", *Electronics Letters, IEE*, **2008**, 44, 37-38
- ²⁶ Ding, Y. & Fusco, V., "Loading artificial magnetic conductor and artificial magnetic conductor absorber with negative impedance convertor elements", *Microwave and Optical Technology Letters, Wiley Subscription Services, Inc., A Wiley Company*, **2012**, 54, 2111-2114
- ²⁷ Jacobs, I., *Bell System Technical Journal*, **1958**, 37, 913
- ²⁸ Kuhnhold, R., US Patent 2771602. **1956**
- ²⁹ Wright, R. W.; Wright, J. W., US Patent 3887920. **1975**
- ³⁰ Kasevich, R. S.; Kocsik, M.; Heafey, M., US Patent 5214432. **1993**
- ³¹ Fallahi, A.; Member, A.; Yahaghi, A.; Benedickter, H.-r.; Abiri, H.; Shahabadi, M. & Hafner, C., "Thin Wideband Radar Absorbers", *Analysis*, **2010**, 58, 4051-4058
- ³² Bushbeck, M.D.; Chan, C.H., "A tuneable, switchable dielectric grating", *Microwave and Guided Wave Letters, IEEE* , vol.3, no.9, pp.296,298, Sept. **1993**
- ³³ Pozar, David M., "A magnetically switchable ferrite radome for printed antennas", *Microwave and Guided Wave Letters, IEEE* , vol.3, no.3, pp.67,69, March **1993**
- ³⁴ Deri, R. J. & Spoonhower, J. P., "Microwave photodielectric effect in AgCl", *Phys. Rev. B, American Physical Society*, **1982**, 25, 2821-2827

-
- ³⁵ Platte, Walter, "Periodic-structure photoexcitation of a silicon coplanar waveguide for selective optoelectronic microwave control", *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on* , vol.38, no.5, pp.638,646, May **1990**
- ³⁶ Sadow, Stephen E.; Thedrez, B.J.; Lee, Chi H., "An optoelectronic attenuator for the control of microwave circuits", *Microwave and Guided Wave Letters, IEEE* , vol.3, no.10, pp.361,362, Oct. **1993**
- ³⁷ Kost, Alan; West, Linda; Hasenberg, T.C.; White, Jeffrey O.; Matloubian, M.; Valley, G.C., "Optical control of microwaves with semiconductor n-i-p-i structures", *Applied Physics Letters* , vol.63, no.25, pp.3494,3496, Dec **1993**
- ³⁸ Lam, W.W.; Jou, C.F.; Chen, H.Z.; Stolt, K.S.; Luhmann, N.C.; Rutledge, D.B., "Millimeter-wave diode-grid phase shifters", *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on* , vol.36, no.5, pp.902,907, May **1988**
- ³⁹ Pitman, K. C., Lindley, M.W., Simkin, D., Cooper, J.F. *Radar and Signal Processing, IEEE Proceedings-F* **1991**, 138, 223
- ⁴⁰ Sugimoto, S., Kondo, S., Okayama, K., Nakamura, H., Book, D., Kagotani, T., Homma, M., Ota, H., Kimura, M., Sato, R. *IEEE Transactions on Magnetics* **1999**, 35, 3154
- ⁴¹ Mayer, F., US Patent 5872534. **1999**
- ⁴² Teperik, T. V.; García de Abajo, F. J.; Popov, V. V. & Shur, M. S., "Strong terahertz absorption bands in a scaled plasmonic crystal", *Applied Physics Letters*, **2007**, 90, -
- ⁴³ Tao, H.; Landy, N. I.; Bingham, C. M.; Zhang, X.; Averitt, R. D. & Padilla, W. J., "A metamaterial absorber for the terahertz regime: design, fabrication and characterization", *Opt. Express, OSA*, **2008**, 16, 7181-7188
- ⁴⁴ Shchegolkov, D. Y.; Azad, A. K.; O'Hara, J. F. & Simakov, E. I., "Perfect subwavelength fishnetlike metamaterial-based film terahertz absorbers", *Phys. Rev. B, American Physical Society*, **2010**, 82, 205117
- ⁴⁵ Huang, L.; Chowdhury, D. R.; Ramani, S.; Reiten, M. T.; Luo, S.-N.; Taylor, A. J. & Chen, H.-T., "Experimental demonstration of terahertz metamaterial absorbers with a broad and flat high absorption band", *Opt. Lett., OSA*, **2012**, 37, 154-156
- ⁴⁶ Collin, S.; Pardo, F.; Teissier, R. & Pelouard, J.-L., "Efficient light absorption in metal semiconductor metal nanostructures", *Applied Physics Letters*, **2004**, 85, 194-196
- ⁴⁷ Hao, J.; Wang, J.; Liu, X.; Padilla, W. J.; Zhou, L. & Qiu, M., "High performance optical absorber based on a plasmonic metamaterial", *Applied Physics Letters*, **2010**, 96, 251104
- ⁴⁸ Liu, N.; Mesch, M.; Weiss, T.; Hentschel, M. & Giessen, H., "Infrared Perfect Absorber and Its Application As Plasmonic Sensor", *Nano Letters*, **2010**, 10, 2342-2348

-
- ⁴⁹ Alici, K. B.; Turhan, A. B.; Soukoulis, C. M. & Ozbay, E., "Optically thin composite resonant absorber at the near-infrared band: a polarization independent and spectrally broadband configuration", *Opt. Express, OSA*, **2011**, *19*, 14260-14267
- ⁵⁰ Diem, M.; Koschny, T. & Soukoulis, C. M., "Wide-angle perfect absorber/thermal emitter in the terahertz regime", *Phys. Rev. B, American Physical Society*, **2009**, *79*, 033101
- ⁵¹ Liu, X.; Starr, T.; Starr, A. F. & Padilla, W. J., "Infrared Spatial and Frequency Selective Metamaterial with Near-Unity Absorbance", *Phys. Rev. Lett., American Physical Society*, **2010**, *104*, 207403
- ⁵² Maier, T. & Brueckl, H., "Multispectral microbolometers for the midinfrared", *Opt. Lett., OSA*, **2010**, *35*, 3766-3768
- ⁵³ Dayal, G. & Ramakrishna, S. A., "Metamaterial saturable absorber mirror", *Opt. Lett., OSA*, **2013**, *38*, 272-274
- ⁵⁴ Teperik, T. V.; García De Abajo, F. J.; Borisov, A. G.; Abdelsalam, M.; Bartlett, P. N.; Sugawara, Y. & Baumberg, J. J., "Omnidirectional absorption in nanostructured metal surfaces", *Nature Photonics, Nature Publishing Group*, **2008**, *2*, 299-301
- ⁵⁵ Hibbins, A. P.; Murray, W. A.; Tyler, J.; Wedge, S.; Barnes, W. L. & Sambles, J. R., "Resonant absorption of electromagnetic fields by surface plasmons buried in a multilayered plasmonic nanostructure", *Physical Review B, American Physical Society*, **2008**, *74*, 1-4
- ⁵⁶ Ding, P.; Liang, E.; Cai, G.; Hu, W.; Fan, C. & Xue, Q., "Dual-band perfect absorption and field enhancement by interaction between localized and propagating surface plasmons in optical metamaterials", *Journal of Optics*, **2011**, *13*, 075005
- ⁵⁷ Aydin, K.; Ferry, V. E.; Briggs, R. M. & Atwater, H. A., "Broadband polarization-independent resonant light absorption using ultrathin plasmonic super absorbers", *Nature communications, Nature Publishing Group*, **2011**, *2*, 517
- ⁵⁸ Landy, N. I.; Sajuyigbe, S.; Mock, J. J.; Smith, D. R. & Padilla, W. J., "Perfect metamaterial absorber", *Physical Review Letters, APS*, **2008**, *100*, 207402
- ⁵⁹ Wang, B.; Koschny, T. & Soukoulis, C. M., "Wide-angle and polarization-independent chiral metamaterial absorber", *Phys. Rev. B, American Physical Society*, **2009**, *80*, 033108
- ⁶⁰ Cheng, Y.; Yang, H.; Cheng, Z. & Xiao, B., "A planar polarization-insensitive metamaterial absorber", *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, **2011**, *9*, 8 - 14
- ⁶¹ Shen, X.; Cui, T. J.; Zhao, J.; Ma, H. F.; Jiang, W. X. & Li, H., "Polarization-independent wide-angle triple-band metamaterial absorber", *Opt. Express, OSA*, **2011**, *19*, 9401-9407
- ⁶² Luo, H.; Cheng, Y. & Gong, R., "Numerical study of metamaterial absorber and extending absorbance bandwidth based on multi-square patches", *The European Physical Journal B - Condensed Matter and Complex Systems, Springer Berlin / Heidelberg*, **2011**, *81*, 387-392

-
- ⁶³ Ding, F.; Cui, Y.; Ge, X.; Jin, Y. & He, S., "Ultra-broadband microwave metamaterial absorber", *Applied Physics Letters, AIP*, **2012**, *100*, 103506
- ⁶⁴ Pang, Y.; Cheng, H.; Zhou, Y. & Wang, J., "Analysis and design of wire-based metamaterial absorbers using equivalent circuit approach", *Journal of Applied Physics, AIP*, **2013**, *113*, 114902
- ⁶⁵ Ansys HFSS : http://www.ansys.com/fr_fr/Produits/Flagship+Technology/ANSYS+HFSS
- ⁶⁶ CST Microwave Studio : <http://www.cst.com/Content/Products/MWS/Overview.aspx>
- ⁶⁷ CST Microstripes : <http://www.cst.com/Content/Products/MST/Overview.aspx>
- ⁶⁸ COMSOL Multiphysics : <http://www.comsol.com>
- ⁶⁹ Smith, D. R.; Vier, D. C.; Koschny, T. & Soukoulis, C. M., "Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials", *Physical Review E - Statistical, Nonlinear and Soft Matter Physics, American Physical Society*, **2005**, *71*, 036617
- ⁷⁰ Hammerstad, E. O., "Equations for Microstrip Circuit Design", Microwave Conference, 1975. 5th European, **1975**, 268 -272
- ⁷¹ Collin, Robert E., "Foundations for microwave engineering 2nd edition", *Electrical Engineering Series*, **2000**
- ⁷² Collin, Robert E., "Foundations for microwave engineering 2nd edition", *Electrical Engineering Series*, **2000**
- ⁷³ Montgomery, C.; Dicke, R. & Purcell, E., "Principles of Microwave Circuits", *Institution of Engineering & Technology*, **1948**
- ⁷⁴ Sellier, A.; Teperik, T. V. & de Lustrac, A., "Resonant circuit model for efficient metamaterial absorber", *Opt. Express, OSA*, **2013**, *21*, A997-A1006
- ⁷⁵ Teperik, T. V.; Popov, V. V. & Garcia de Abajo, F. J., "Void plasmons and total absorption of light in nanoporous metallic films", *Phys. Rev. B, American Physical Society*, **2005**, *71*, 085408
- ⁷⁶ Shen, L.; Long, S.; Allarding, M. & Walton, M., "Resonant frequency of a circular disc, printed-circuit antenna", *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, **1977**, *25*, 595 - 596
- ⁷⁷ Fallahi, A.; Mishrikey, M.; Hafner, C. & Vahldieck, R., "Radar Absorbers Based on Frequency Selective Surfaces on Perforated Substrates", *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, **2008**, *5*, 704-710
- ⁷⁸ Sellier A. & de Lustrac A., "Absorbant électromagnétique", Dépôt n° FR1258849 du 20 septembre **2012**
- ⁷⁹ Bernhard, J. & Tousignant, C., "Resonant frequencies of rectangular microstrip antennas with flush and spaced dielectric superstrates", *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, **1999**, *47*, 302-308

-
- ⁸⁰ Ali, W. & Al-Charchafchi, S., "Using equivalent dielectric constant to simplify the analysis of patch microstrip antenna with multi-layer substrates", *Antennas and Propagation Society International Symposium*, 1998, IEEE, **1998**, 2, 676-679 vol.2
- ⁸¹ <http://www.cadsoftusa.com/>
- ⁸² <http://www.3ds.com/products-services/draftsight/>
- ⁸³ Sellier A. & de Lustrac A., "Absorbant électromagnétique", Dépôt n° FR1258849 du 20 septembre **2012**
- ⁸⁴ Zhou, J.; Zhang, L.; Tuttle, G.; Koschny, T. & Soukoulis, C. M., "Negative index materials using simple short wire pairs", *Phys. Rev. B, American Physical Society*, **2006**, 73, 041101
- ⁸⁵ Kang, M.; Shen, N.-H.; Chen, J.; Chen, J.; Fan, Y.-X.; Ding, J.; Wang, H.-T. & Wu, P., "A new planar left-handed metamaterial composed of metal-dielectric-metal structure", *Opt. Express, OSA*, **2008**, 16, 8617-8622
- ⁸⁶ Burokur, S. N.; Sellier, A.; Kanté, B. & de Lustrac, A., "Symmetry breaking in metallic cut wire pairs metamaterials for negative refractive index", *Applied Physics Letters*, **2009**, 94, 201111
- ⁸⁷ Kanté, B.; Burokur, S. N.; Sellier, A.; de Lustrac, A. & Lourtioz, J.-M., "Controlling plasmon hybridization for negative refraction metamaterials", *Phys. Rev. B, American Physical Society*, **2009**, 79, 075121
- ⁸⁸ Sellier, A.; Burokur, S. N.; Kanté, B. & de Lustrac, A., "Negative refractive index metamaterials using only metallic cut wires", *Optics Express, OSA*, **2009**, 17, 6301-6310
- ⁸⁹ <http://www.rogerscorp.com/acm/products/42/RO3003-Laminates.aspx>
- ⁹⁰ Wu, X.; Tichit, P.-H.; Burokur, S. N.; Kirouane, S.; Sellier, A. & de Lustrac, A., "Numerical and experimental demonstration of a coordinate transformation-based azimuthal directive emission", *Microwave and Optical Technology Letters, Wiley Subscription Services, Inc., A Wiley Company*, **2012**, 54, 2536-2540