

Homogénéité d'un tissu métamatériau caractérisé en bande submillimétrique

L. BURGNIES^{1,2}, C. HUPPÉ³, G. DUCOURNAU¹, C. COCHRANE³, F. RAULT³, É. LHEURETTE¹, V. KONCAR³, D. LIPPENS¹

¹Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, ISEN, Univ. Valenciennes, UMR 8520 - IEMN, F-59000 Lille, France

²Université du Littoral Côte d'Opale, rue Ferdinand Buisson, 62228 Calais cedex

³GEMTEX EA - 2461, ENSAIT, allée Louise et Victor Champier, 59056 Roubaix cedex
ludovic.burgnies@iemn.univ-lille1.fr

Résumé – La fabrication d'une grande surface de métamatériau textile est considérée pour des applications en bande submillimétrique. Au préalable, le design du tissu métamatériau est mené afin d'obtenir une avance de phase autour de 500 GHz. Un large échantillon de tissu métamatériau de surface 30 x 30 cm² a été fabriqué en milieu semi-industriel, puis il a été caractérisé en espace libre dans la bande 325 -700 GHz. L'homogénéité du tissu métamatériau est étudiée expérimentalement via une étude statistique de la fréquence de réjection mesurée en balayant la totalité de l'échantillon.

1. Introduction

Depuis les années 2000, le développement technologique des métamatériaux a permis d'envisager de nouveaux matériaux possédant des comportements électromagnétiques de la matière non rencontrés dans la nature [1]. La possibilité d'obtenir un matériau présentant une réfraction négative est un exemple probant, et de nombreuses études technologiques ont été menées afin de réaliser de tels métamatériaux en agencant différents objets métallo-diélectriques (anneaux fendus, cylindres métalliques, fishnets, réseaux de résonateurs planaires ou diélectriques,...) [2]–[6]. Généralement, la réfraction négative est mise en évidence par l'intermédiaire des paramètres effectifs équivalents complexes $\epsilon(\omega)$ et $\mu(\omega)$. Cependant, si ces paramètres sont correctement définis pour les matériaux massifs, leur utilisation dans des métamatériaux à faible épaisseur ($\delta \ll \lambda$) s'apparentant à des métasurfaces peut être questionnable. Il est alors préférable d'utiliser le déphasage introduit par la métasurface, et le comportement équivalent à la réfraction négative correspond à une avance de phase. Récemment, il a été démontré expérimentalement qu'un tissage de fils métalliques permet d'obtenir une avance de phase dans une bande de fréquence située entre une réjection et une transmission quasi-unitaire [7]. L'agencement des fils métalliques permet alors d'ajuster les différentes fréquences utiles et d'optimiser la bande à avance de phase.

Nous proposons d'étudier l'homogénéité d'un tissu métamatériau fabriqué en milieu semi-industriel fonctionnant dans la bande submillimétrique. Dans un premier temps, nous présentons les dimensions de la structure et les matériaux utilisés, puis les résultats expérimentaux sont présentés avec l'objectif d'étudier l'homogénéité du tissu métamatériau.

2. Structure

La structure tissée est représentée sur la Figure 1. Elle a été fabriquée par un tissage en armure toile de monofilaments de diamètre $d = 0.1$ mm, en polyéthylène téréphtalate pour la chaîne et en cuivre émaillé pour la trame, à l'aide du métier à tisser CCI SL8900S. Une étude préliminaire a permis de paramétrer le métier afin d'obtenir (i) une ondulation des fils de cuivre suffisante pour observer une avance de phase, et (ii) des périodes proches des valeurs $p_x = 0.55$ mm et $p_y = 0.50$ mm déterminées par des simulations électromagnétiques effectuées au préalable.

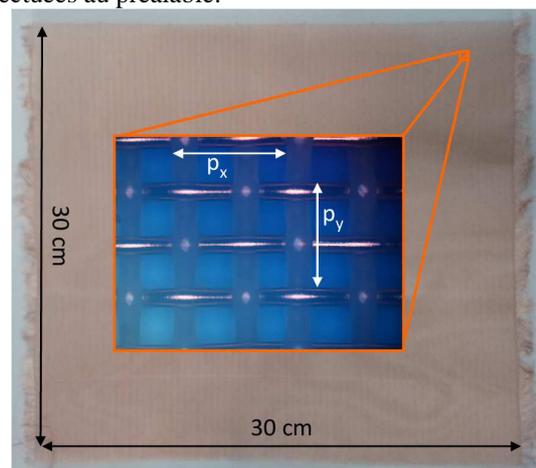


Figure 1. Tissu métamatériau constitué de fils monofilaments métalliques et diélectriques.

L'échantillon a été divisé en zones de 5 x 5 cm², puis il a été photographié au microscope optique (Figure 1) afin de mesurer les périodes p_x et p_y dans chaque zone. Pour les 21 zones caractérisées en espace libre ci-dessous, 304 valeurs ont été mesurées pour p_x et 373

pour p_y . Les valeurs statistiques (valeurs moyenne, minimale, et maximale, ainsi que l'écart type) ont été calculées à partir de ces périodes mesurées et elles sont synthétisées dans le Tableau 1. Le tissu fabriqué présente une bonne homogénéité en termes de période p_x avec un écart type faible ($\sigma_{p_x} \sim 0.5\%$), alors qu'une plus forte dispersion d'environ $\sigma_{p_y} \sim 2\%$ est observée sur la période p_y . On observe aussi cette forte dispersion dans les valeurs limites de p_y qui présentent une variation de 40 μm .

	Moy (mm)	σ (μm)	Min (mm)	Max (mm)
p_x	0.548	2.46	0.542	0.554
p_y	0.512	10.58	0.491	0.531

Tableau 1. Synthèse des périodes mesurées.

La Figure 2 représente les répartitions des valeurs des périodes p_x et p_y mesurées. On peut remarquer que la répartition des valeurs de p_x s'apparente à une gaussienne relativement étroite alors que les valeurs de p_y s'étendent davantage et semblent suivre une répartition uniforme. Cela peut s'expliquer par la technique du tissage pour laquelle les fils de chaîne diélectriques (fils verticaux sur la Figure 1) sont maintenus par un peigne dont la distance entre les dents permet de fixer correctement la période p_x . En revanche, la distance entre les fils de trame métalliques (fils horizontaux sur la Figure 1) est obtenue par le tassement des fils de trame en ramenant mécaniquement le peigne. Cette opération mécanique est moins précise que le maintien des fils de chaîne dans le peigne, et il en résulte une dispersion des valeurs de p_y plus étendue.

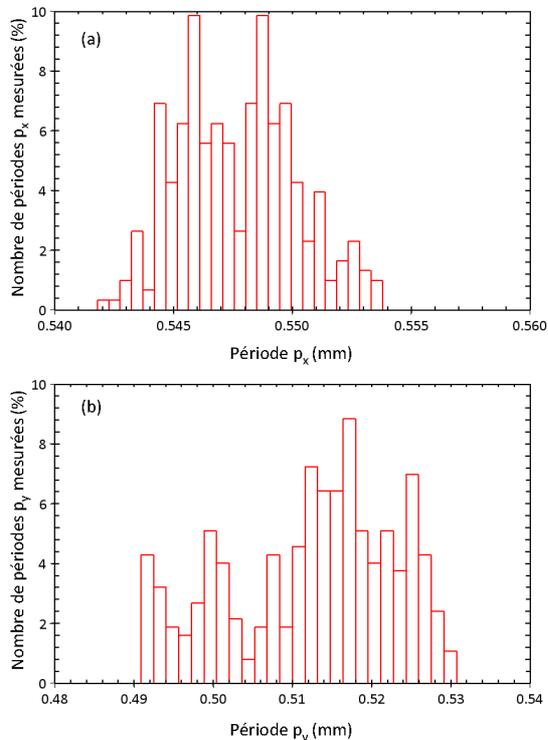


Figure 2. Répartition des périodes p_x (a) et p_y (b) mesurées au microscope optique.

Par ailleurs, sur la photographie de la Figure 1, on peut remarquer que le diamètre des fils de cuivre semble

inchangé par le tissage $d_{Cu} = 81 \mu\text{m}$, alors qu'à chaque croisement de fils, les fils diélectriques présentent un écrasement avec un élargissement mesuré de 131 μm . En considérant que la surface de la section des fils diélectriques est conservée, l'écrasement des fils est estimé à 76 μm en bon accord avec l'épaisseur totale du tissu mesurée $e = 0.18 \text{ mm}$.

3. Design

L'insert de la Figure 3 représente la cellule élémentaire utilisée pour simuler la réponse électromagnétique du tissu métamatériau par le logiciel HFSS de Ansys. La permittivité relative des différents diélectriques (fils diélectriques et vernis d'épaisseur 6 μm des fils de cuivre émaillé) a été fixée à $\epsilon = 3.3 (1 - i 0.02)$ [8], et une polarisation électrique E parallèle aux fils métalliques est considérée. La Figure 3 montre le comportement fréquentiel du coefficient de transmission à travers le tissu pour $p_x = 0.55 \text{ mm}$ lorsque la période p_y varie de 0.46 mm à 0.54 mm. L'avance de phase est observée entre la fréquence de réjection f_R et la fréquence de transmission quasi-unitaire $f_{T-1} \sim 500 \text{ GHz}$. Notons que sans ondulation des fils, la transmission à travers un réseau de cylindres métalliques serait quasi-nulle pour E parallèle aux cylindres.

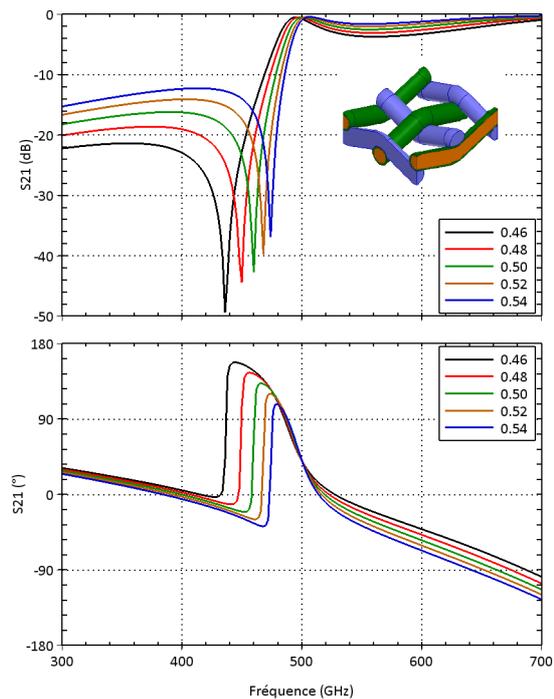


Figure 3. Transmission calculée pour $p_x = 0.55 \text{ mm}$ et pour une période p_y variant de 0.46 à 0.54 mm.

Cette étude paramétrique fait apparaître une forte sensibilité de la fréquence de réjection à une variation de p_y , alors que la fréquence f_{T-1} est moins sensible. Une autre étude paramétrique (non présentée) montre que f_R et f_{T-1} sont toutes les deux sensibles à une variation de la période p_x . L'homogénéité d'un tissu métamatériau en termes de périodes pourra donc être menée en déterminant expérimentalement les fréquences f_R et f_{T-1} .

4. Résultats expérimentaux

L'échantillon a été caractérisé en espace libre dans deux bandes submillimétriques [325 - 500 GHz] et [500 - 700 GHz] par l'intermédiaire d'un analyseur de réseaux vectoriel (VNA) *ROHDE & SCHWARZ ZNA 24*. La Figure 4 représente le banc de caractérisation en espace libre. L'échantillon a été découpé en bandes de 20 x 12.5 cm² afin de pouvoir positionner chaque bande sur le porte échantillon. Ce dernier est fixé sur une platine de déplacements XYZ motorisée et il est positionné au milieu des dispositifs d'émission et de réception constitués d'une antenne et d'une lentille. L'échantillon est ainsi illuminé par un faisceau collimaté d'environ 1 cm de diamètre, et les coefficients de transmission (t_s) et de réflexion (r_s , non présentée ici) sont mesurés en balayant l'ensemble de l'échantillon avec un pas horizontal et vertical de 1 cm.

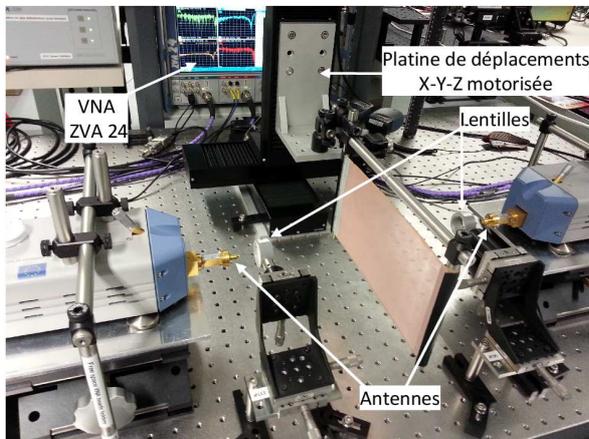


Figure 4. Banc de caractérisation du tissu métamatériau en espace libre.

Le VNA et la platine de déplacement sont pilotés par un code *Labview* permettant d'enregistrer les évolutions fréquentielles de t_s et r_s pour chaque position de l'échantillon. Enfin, le coefficient de transmission t_{ref} en l'absence de l'échantillon est aussi mesuré et utilisé comme référence pour calculer la transmission pour une épaisseur du tissu métamatériau $e = 0.18$ mm par la relation [7] :

$$t = \frac{t_s}{t_{ref}} \cdot \exp\left(-i \cdot \frac{\omega e}{c}\right) \quad (1)$$

L'ensemble des données de mesures est ensuite traité par un code *Scilab* permettant de déterminer la fréquence f_R et la valeur de la transmission à la rejection t_{min} , puis les valeurs à la transmission quasi-unitaire (f_{T-1} , et t_{max}) après interpolations des réponses fréquentielles par des fonctions spline. Le Tableau 2 synthétise les différentes valeurs statistiques calculées à partir d'environ 200 et 370 transmissions mesurées exploitables pour f_R et f_{T-1} respectivement. Malgré la forte dispersion des valeurs de p_y montrée précédemment, il apparait que la fréquence de rejection est relativement stable avec un écart type faible ($\sigma = 0.55$ %) et des valeurs centrées autour 478.8 GHz. Par contre, la valeur de la transmission minimale à la rejection varie fortement dans un rapport 2 (en dB). La

fréquence f_{T-1} semble présenter aussi une forte dispersion de valeurs. Cependant, une analyse des courbes présentant une fréquence f_{T-1} élevée montre que l'évolution fréquentielle mesurée ne s'apparente pas précisément à la réponse attendue (comme celles représentées Figure 3), avec notamment une transmission maximale qui s'éloigne de la condition $t \sim 1$ et qui diminue jusque $t \sim 0.59$ (-4.55 dB). L'origine de ces comportements inattendus n'est pas encore expliquée et doit être plus précisément analysée.

	Moy	σ	Min	Max
f_R (GHz)	478.8	2.61	471.2	485.0
t_{min} (dB)	-29.7	3.37	-41.6	-23.1
f_{T-1} (GHz)	509.8	11.4	494.8	546.0
t_{max} (dB)	-2.85	0.650	-4.55	-1.69

Tableau 2. Valeurs statistiques des fréquences et niveaux de transmission mesurés à la rejection (f_R , t_{min}) et à la transmission quasi-unitaire (f_{T-1} , t_{max}).

La Figure 5 représente les répartitions des valeurs de f_R et f_{T-1} déduites des mêmes réponses fréquentielles mesurées. La répartition des valeurs de f_{T-1} montre à nouveau des valeurs supérieures à 510 GHz incohérentes avec les transmissions obtenues par la simulation. En dessous de 510 GHz, on remarque deux autres pics positionnés autour de 498 GHz et 502 GHz représentant à eux deux 45 % des valeurs de f_{T-1} mesurées. Il semble donc que pour les réponses fréquentielles mesurées cohérentes avec les réponses simulées, la fréquence f_{T-1} varie de moins de ± 0.5 % autour de 500 GHz, et peut donc être considérée stable.

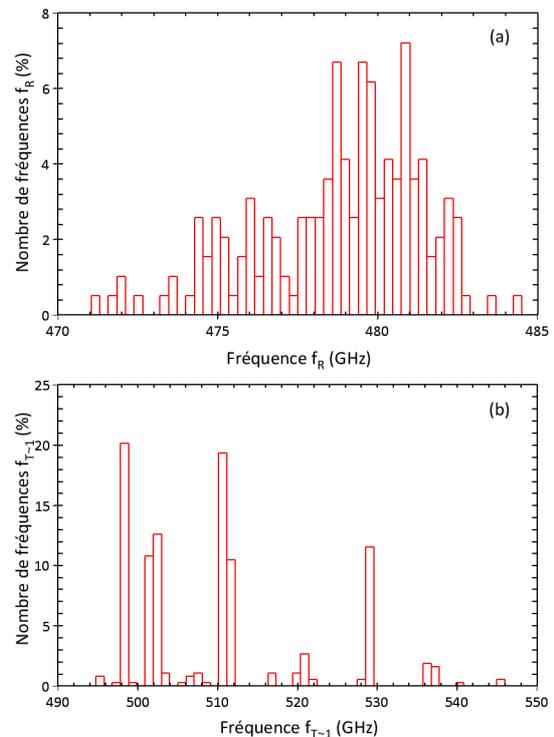


Figure 5. Répartition des fréquences f_R (a) et f_{T-1} (b) mesurées.

Enfin comme pour les valeurs de la période p_x (Figure 2), l'ensemble des valeurs f_R suit une répartition quasiment gaussienne. Les valeurs sont centrées autour de 480 GHz avec cependant un élargissement qui s'étend davantage du côté des basses fréquences.

Pour confirmer les analyses statistiques, la Figure 6 représente les transmissions mesurées pour les deux valeurs extrêmes et la valeur moyenne de f_R indiquées dans le Tableau 2. La sensibilité de la fréquence de rejection f_R est visible et une quasi-insensibilité de la fréquence f_{T-1} et de la valeur de la transmission maximale (située à environ -2 dB) est observée. Ces sensibilités sont observées aussi sur la phase de la transmission qui présente un saut de phase à la rejection précédant une bande de fréquence à avance de phase. On remarque que la faible sensibilité de la fréquence f_{T-1} permet d'obtenir une avance de phase quasiment identique et peu sensible à la position de la mesure sur l'échantillon. Ce comportement est cohérent avec les résultats de simulations de la Figure 3 qui montre des phases de la transmission identiques autour de la transmission maximale.

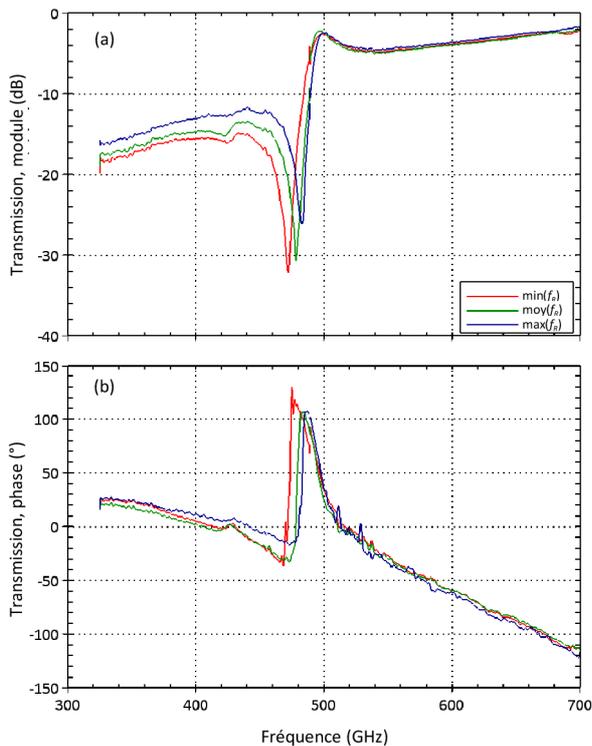


Figure 6. Module (a) et phase (b) des transmissions mesurées pour les valeurs extrêmes et la valeur moyenne de la fréquence de réjection du Tableau 2.

La fréquence f_{T-1} déterminées à partir des caractérisations variant peu, alors que la fréquence de rejection f_R est davantage sensible à la position de la mesure sur l'échantillon, ces résultats semblent confirmer la faible dispersion des périodes mesurées p_x , et la plus forte dispersion sur p_y .

5. Conclusion

L'homogénéité d'une grande surface d'un métamatériau textile fabriqué par tissage dans un environnement semi-industriel a été étudiée expérimentalement à l'aide des réponses fréquentielles en bande submillimétrique. Les résultats de caractérisation montrent une sensibilité à la position sur l'échantillon de la fréquence de rejection, alors que la fréquence à transmission maximale (f_{T-1}) est peu sensible. Cette étude expérimentale sur les fréquences confirme l'homogénéité en termes de périodes p_x et p_y mesurés au microscope optique. La sensibilité de f_R est attribuée aux variations de p_y mesurées, alors que la stabilité de la fréquence f_{T-1} traduit la bonne homogénéité de l'échantillon sur la valeur de p_x . Enfin, il est démontré que l'homogénéité de l'échantillon permet d'obtenir une phase de la transmission, et notamment une avance de phase, peu sensible à la position. Ceci permet d'envisager l'utilisation des tissus métamatériaux pour des applications liées à la manipulation de phase.

6. Remerciements

Ces travaux ont été effectués avec le soutien du Fonds Européen de Développement Régional/ Met steun van het Europees Fonds voor Regionale Ontwikkeling dans le cadre du projet Interreg France-Wallonie-Vlaanderen LUMINOPTX.

Références

- [1] F. Capolino, *Theory and Phenomena of Metamaterials*. CRC Press, 2009.
- [2] N. I. Landy, S. Sajuyigbe, J. J. Mock, D. R. Smith, and W. J. Padilla, "Perfect Metamaterial Absorber," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 100, no. 20, p. 207402, May 2008.
- [3] A. Mary, S. G. Rodrigo, F. J. Garcia-Vidal, and L. Martin-Moreno, "Theory of Negative-Refractive-Index Response of Double-Fishnet Structures," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 101, no. 10, p. 103902, Sep. 2008.
- [4] J. Hao, V. Sadaune, L. Burgnies, and D. Lippens, "Ferroelectrics based absorbing layers," *J. Appl. Phys.*, vol. 116, no. 4, p. 043520, Jul. 2014.
- [5] V. V. Khardikov, S. V. Mizrakhy, V. R. Tuz, and S. L. Prosvirnin, "Resonant all-dielectric planar metamaterials," in *2016 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW)*, 2016, pp. 1–5.
- [6] N. Xu, R. Singh, and W. Zhang, "High-Q lattice mode matched structural resonances in terahertz metasurfaces," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 109, no. 2, p. 021108, Jul. 2016.
- [7] L. Burgnies *et al.*, "Experimental phase-advance in woven textile metasurface," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 107, no. 20, p. 203505, Nov. 2015.
- [8] L. Burgnies *et al.*, "Loi des mélanges pour les tissages de fils diélectriques," in *Proceeding of JNM 2017*, Bordeaux, 2017.