

## Loi des mélanges pour les tissages de fils diélectriques

L. BURGNIES<sup>1,2</sup>, C. HUPPÉ<sup>3</sup>, C. COCHRANE<sup>3</sup>, F. RAULT<sup>3</sup>, G. DUCOURNAU<sup>1</sup>, É. LHEURETTE<sup>1</sup>, V. KONCAR<sup>3</sup>,  
D. LIPPENS<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Université du Littoral Côte d'Opale, rue Ferdinand Buisson, 62228 Calais cedex

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

**Résumé** – Les formules de loi des mélanges appliquées initialement à des réseaux de cylindres diélectriques ont été adaptées pour prendre en compte les ondulations de fils produites par tissage. Les formules sont appliquées sur un tissu spécialement fabriqué et caractérisé en espace libre dans la bande de fréquences 325 - 500 GHz. Les résultats montrent un bon accord entre les simulations de la structure tissée et celles d'une plaque d'un matériau diélectrique équivalent. Les résultats de simulations sont aussi comparés à la transmission mesurée expérimentalement à travers le tissu.

### 1. Introduction

Ces dernières années, les objets connectés se sont immiscés dans la vie quotidienne et semblent être devenus des solutions technologiques incontournables pour la mesure et le suivi des performances physiques liées au sport, ou encore pour la télésurveillance médicale (taux de glycémie, électrocardiogramme,...). Parmi les objets connectés, les textiles connectés, ainsi que d'autres textiles dits intelligents comportant des capteurs et modules d'électroniques embarquées, se sont développés en s'orientant vers le marché professionnel (vêtements militaires et de sécurité) et vers le domaine de la santé et du sport. Enfin, les dernières innovations dans le domaine des textiles intelligents cherchent à intégrer l'électronique et les fonctions électromagnétiques au sein même de la fibre et de la structure textile [1], [2]. Pour développer ces technologies, il est nécessaire de connaître les propriétés des fibres seules, et en particulier leurs propriétés électromagnétiques.

Des études expérimentales déterminant les propriétés électromagnétiques équivalentes dans le domaine des microondes de textiles couramment rencontrés (coton, soie, denim, polyester...) sont disponibles dans la littérature [3], [4], [5]. Cependant, ces propriétés dépendent de la structure du textile (tissu, tricot, nontissé, tresse,...) mais aussi, à l'intérieur de celle-ci, de l'armures (toile, satin,...) ou de la contexture (jersey, cote 1x1,...), qui ne sont pas toujours renseignées dans les articles, et il est donc impossible d'en tirer une information au niveau de la fibre. Dans l'objectif de déterminer expérimentalement les propriétés de fils diélectriques monofilaments, nous adaptons une loi des

mélanges afin d'inclure l'ondulation des fils produite par le tissage. Ensuite, nous comparons les résultats expérimentaux aux résultats de simulations électromagnétiques menées pour un tissage et un matériau équivalent.

### 2. Théorie

La structure tissée est représentée sur la Figure 1. Elle a été fabriquée par un tissage en armure toile de monofilaments en polyéthylène téréphtalate de diamètre  $d = 0.1$  mm à l'aide du métier à tisser CCI SL8900S. Une légère inhomogénéité du tissage est observée sur l'ensemble de la surface du tissu. Afin d'évaluer cette inhomogénéité, la valeur moyenne et l'écart type des périodes suivant les directions  $x$  (fils de trame) et  $y$  (fils de chaîne) ont été calculés à partir de 115 périodes mesurées suivant  $x$  et 94 périodes mesurées suivant  $y$  réparties sur la totalité de l'échantillon. Les périodes moyennes sont  $p_x = 521.4$   $\mu\text{m}$ , et  $p_y = 511.2$   $\mu\text{m}$ , et les écarts types  $\sigma_{p_x} = 5.78$   $\mu\text{m}$  et  $\sigma_{p_y} = 10.1$   $\mu\text{m}$ . Les écarts types sont faibles (1 % et 2 %), et le tissu pourra être considéré homogène par la suite.

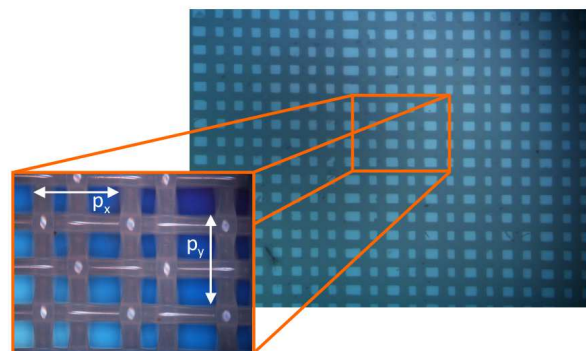


Figure 1. Tissu de fils monofilaments tissés

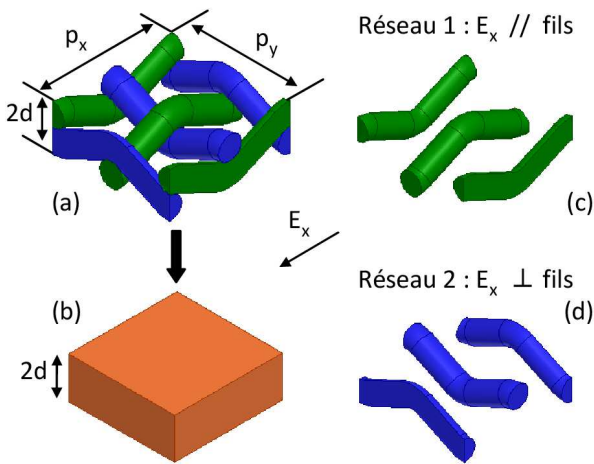
La Figure 2 illustre la cellule élémentaire utilisée pour simuler la réponse électromagnétique du tissu (2a) par le logiciel HFSS de Ansys, ainsi que sa décomposition en couches diélectriques équivalentes (2c et 2d). La permittivité équivalente du tissu est calculée en considérant la superposition de deux réseaux de cylindres diélectriques orthogonaux : un premier réseau orienté suivant  $x$  ( $E_x //$  aux fils), et un second suivant  $y$

( $E_x \perp$  aux fils). Pour chaque réseau, il est possible de déterminer les permittivités équivalentes par les formules [6]

$$\epsilon_{eq,x} = \epsilon_1 + f_x (\epsilon_2 - \epsilon_1) \quad (1)$$

$$\epsilon_{eq,y} = \epsilon_1 \cdot \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2 + f_y (\epsilon_2 - \epsilon_1)}{\epsilon_1 + \epsilon_2 - f_y (\epsilon_2 - \epsilon_1)} \quad (2)$$

avec  $f_x$  et  $f_y$  les fractions volumiques de matériau diélectrique,  $\epsilon_1 = 1$  et  $\epsilon_2$  la permittivité relative des fils.



**Figure 2. Cellule élémentaire du tissage (a) et plaque diélectrique équivalente (b). Décomposition du tissage en deux réseaux de fils (c et d).**

Ces formules ont été initialement établies pour des réseaux de cylindres, et l'ondulation des fils est introduite en considérant le volume de chaque fil ondulé déterminé sur une cellule élémentaire à l'aide du logiciel *HFSS*. Cela revient à transformer chaque réseau de fils ondulés en un réseau de cylindres diélectriques virtuels de même volume. En considérant les valeurs moyennes des périodes déterminées précédemment, le volume total équivalent vaut  $v_T = p_x * p_y * d = 0.0267 \text{ mm}^3$ , et on obtient des fractions volumiques  $f_x = 33.1 \%$  et  $f_y = 32.6 \%$ . Enfin, la superposition des deux réseaux s'apparentant à une mise en parallèle de capacités, la permittivité équivalente du tissu est calculée par

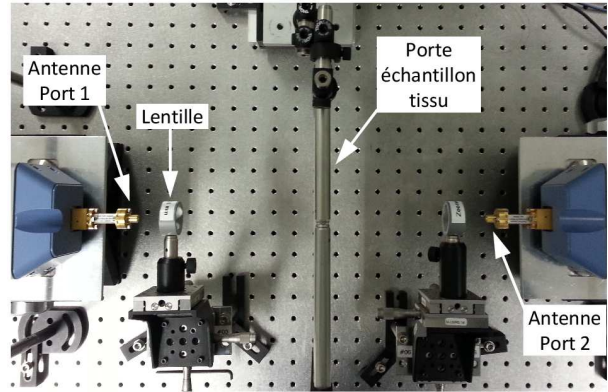
$$\epsilon_{eq} = 0.5 * (\epsilon_{eq,x} + \epsilon_{eq,y}) \quad (3)$$

### 3. Résultats

Le tissu de fils diélectriques de la Figure 1 a été caractérisé en espace libre dans la bande de fréquences [325 - 500] GHz. Le banc de caractérisation en espace libre est représenté sur la Figure 3. Le tissu, tendu par un porte-échantillon, est positionné au milieu des dispositifs d'émission et de réception constitués d'une antenne et d'une lentille de collimation. Le porte-échantillon est fixé sur une platine de déplacement XYZ motorisée permettant d'illuminer différentes zones du tissu par un faisceau collimaté d'environ 1 cm de diamètre. Les antennes sont reliées à un analyseur de réseau vectoriel *ROHDE & SCHWARZ ZVA 24*. Les coefficients de transmission ( $t_s$ ) et de réflexion ( $r_s$ , non présenté ici) sont mesurés en balayant l'ensemble de l'échantillon. Le

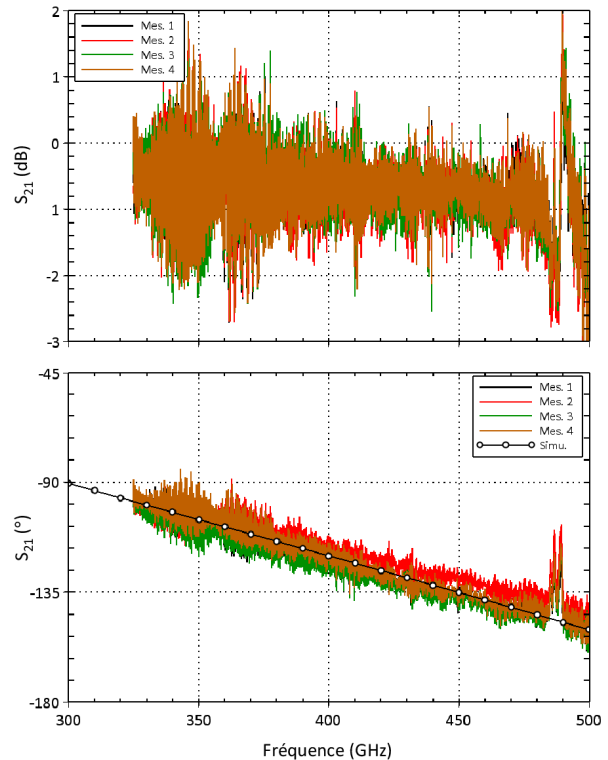
coefficient de transmission  $t_{ref}$  en l'absence de l'échantillon est aussi mesuré et il est utilisé comme référence pour calculer la transmission correspondant à l'épaisseur du tissu  $2d = 0.2 \text{ mm}$  par la relation [2]

$$t = \frac{t_s}{t_{ref}} \cdot \exp\left(-i \cdot \frac{2\omega d}{c}\right) \quad (4)$$



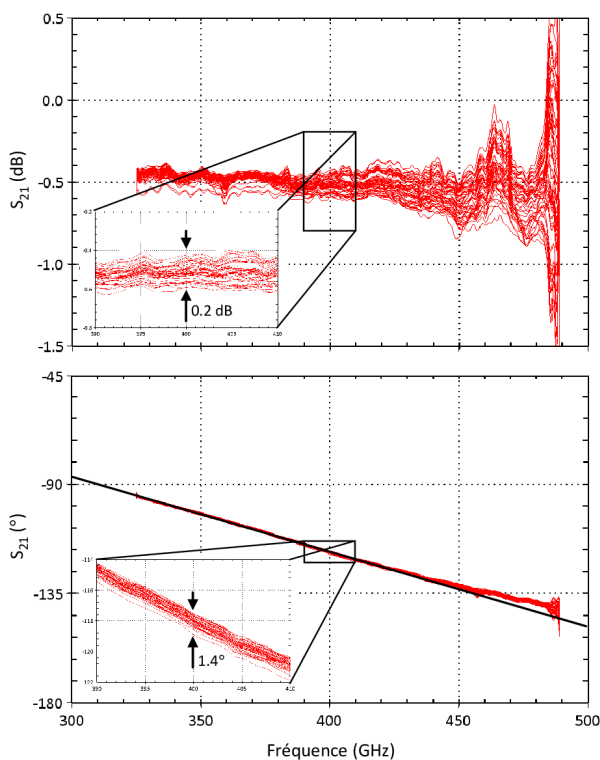
**Figure 3. Banc de caractérisation du tissu en espace libre.**

La Figure 4 représente le module et l'argument du coefficient de transmission mesuré en quatre endroits positionnés aléatoirement sur l'échantillon. L'ensemble des courbes expérimentales présente un bon recouvrement. A partir de ces mesures, la détermination de la pente de la phase ( $5.06 \cdot 10^{-3} \text{ rad/GHz}$ ) par la méthode des moindres carrés permet d'estimer une valeur approximative de la partie réelle de la permittivité équivalente du tissu  $\epsilon_{eq} \sim 1.46$ . Par contre, la présence d'un bruit important de 2 à 3 dB sur le module visible sur la Figure 4 ne permet pas d'estimer simplement la tangente de l'angle de pertes diélectriques.



**Figure 4. Module et argument du coefficient de transmission expérimental et simulé.**

Pour étudier l'influence de la faible inhomogénéité du tissage sur le coefficient de transmission, 52 mesures ont été effectuées en balayant une surface du tissu de  $130 \times 40 \text{ mm}^2$  en utilisant un pas de 10 mm. Pour chaque position, le module et la phase de la transmission mesurée ont été interpolés par des fonctions splines, et une étude statistique portant sur la pente de la phase a été menée. La Figure 5 représente l'ensemble des 52 transmissions obtenues par interpolation. On remarque la très faible dispersion de valeurs sur la phase ( $\pm 0.7^\circ$ ) à fréquence fixe, ainsi que sur sa pente. Bien que l'interpolation du module soit moins régulière, elle permet néanmoins d'estimer un niveau de transmission d'environ -0.5 dB avec une dispersion de  $\pm 0.1 \text{ dB}$  à 400 GHz.



**Figure 5. Interpolation des coefficients de transmission mesurés en 52 positions.**

Les valeurs statistiques de la pente de la phase et du niveau de transmission moyen dans une bande de fréquence limitée à [ 300 - 450 GHz ] ont été calculées à partir des interpolations. Les valeurs sont synthétisées dans le Tableau 1, ainsi que les valeurs de la permittivité équivalente correspondantes.

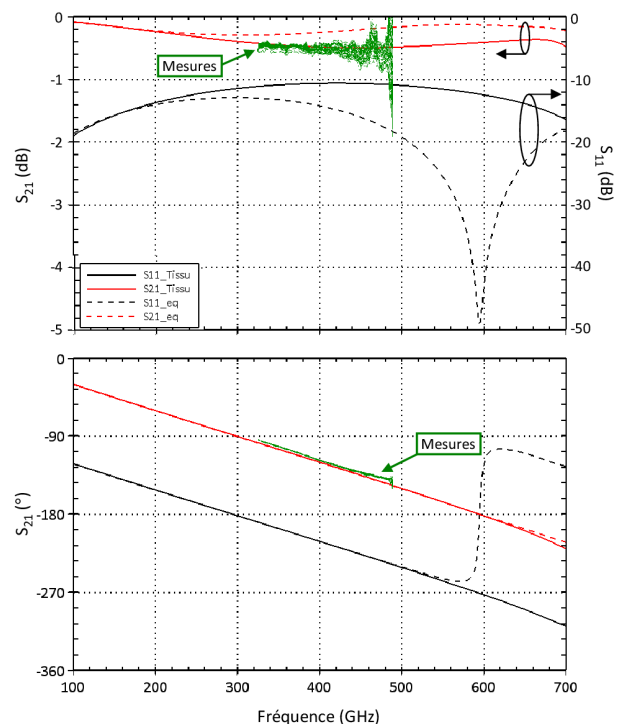
	Moy	$\sigma$	Min	Max
$S_{21} \text{ (dB)}$	-0.504	$35.0 \cdot 10^{-3}$	-0.590	-0.442
<i>pente</i> (rad/GHz)	$-5.30 \cdot 10^{-3}$	$43.3 \cdot 10^{-6}$	$-5.41 \cdot 10^{-3}$	$-5.23 \cdot 10^{-3}$
$\epsilon_{eq}$	1.60	$26.2 \cdot 10^{-3}$	1.56	1.67

**Tableau 1. Synthèse des périodes mesurées.**

On peut remarquer que la permittivité équivalente moyenne calculée à partir de l'interpolation de la phase est légèrement supérieure à la valeur calculée à partir de

la Figure 4. Cette variation de valeur peut s'expliquer par les plages fréquentielles considérées différentes dans les deux cas. Notamment, on peut remarquer la présence d'un pic dans la phase de la Figure 4 autour de 480 GHz qui a pour conséquence de diminuer artificiellement la permittivité équivalente. Néanmoins, les valeurs du Tableau 1 indiquent une dispersion limitée de la permittivité équivalente du tissu avec un écart type de 1.6 % en bon accord avec l'homogénéité du tissu déduite des mesures de périodes. Par contre, le niveau de transmission moyen présente un écart type plus important de 7 % et avec des valeurs extrêmes qui s'étendent à presque  $\pm 15 \%$  autour du niveau moyen de -0.5 dB.

Afin de valider la loi des mélanges introduite précédemment, la permittivité équivalente du tissu a été calculée  $\epsilon_{eq} = 1.592 (1 - i 9.01 \cdot 10^{-3})$  pour une permittivité des fils de polyester estimée à  $\epsilon_2 = 3.3 (1 - i 0.02)$ . La Figure 6 représente le module et l'argument du coefficient de transmission calculé pour la structure tissée (Figure 2a) et pour une plaque de diélectrique équivalente de permittivité  $\epsilon_{eq}$  et d'épaisseur  $2d = 0.2 \text{ mm}$  (Figure 2b). Des conditions périodiques Master-Slave ont été utilisées dans les plans transverses (directions  $x$  et  $y$ ), et des ports de Floquet ont été utilisés pour simuler l'injection d'une onde plane incidente.



**Figure 6. Comparaison entre les simulations d'un tissage et d'une plaque diélectrique équivalente. Les résultats expérimentaux sont reportés en vert.**

La superposition des arguments de  $S_{21}$  sur la totalité de la bande de fréquence indique la bonne équivalence entre les structures tissée et équivalente en terme de partie réelle de la permittivité. Par contre au dessus de 250 GHz, le module calculé pour la plaque diélectrique équivalente s'éloigne du module obtenu pour le tissu, et fait apparaître un phénomène de résonance de type

Fabry-Perot absent pour le tissu. Le niveau de transmission étant lié aux pertes diélectriques, il ne sera donc pas possible d'estimer à partir du modèle leurs valeurs au dessus de 250 GHz. L'ensemble des 52 interpolations des transmissions mesurées est reporté sur la Figure 6, et la phase du tissage simulé est reportée sur la Figure 4. Le bon accord observé sur le module et l'argument des transmissions expérimentales et du tissage simulé permet de valider la valeur de la permittivité des fils diélectriques utilisée en simulation, soit  $\epsilon_2 = 3.3 (1 - i 0.02)$ .

Enfin, les valeurs de la permittivité des fils correspondant aux valeurs extrêmes de la permittivité équivalente expérimentale reportées dans le tableau 1 ont été calculées par les formules de la loi des mélanges :  $\epsilon_2 = 3.17$  et  $3.66$  pour  $\epsilon_{eq} = 1.56$  et  $1.67$ , respectivement. Malgré le faible écart de valeurs mesurées sur la permittivité  $\epsilon_{eq}$ , il apparaît une dispersion notable de  $\epsilon_2$  qui varie jusqu'à  $-5.4\%$  et  $+9.3\%$  autour de la valeur moyenne. On notera aussi une dissymétrie sur ces variations, consécutive à la non-linéarité des formules de la loi des mélanges en fonction de  $f_y$ .

#### 4. Conclusion

Des formules de loi des mélanges ont été appliquées pour déterminer la permittivité complexe équivalente d'un tissage de fils diélectriques. Un tissu a été fabriqué et caractérisé dans la bande 325 - 500 GHz. Les résultats montrent un bon accord entre les différentes simulations (tissage et plaque diélectrique équivalente) jusque 250 GHz, ainsi qu'entre la simulation et l'expérience.

#### 5. 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] "<http://www.primold.com/>."
- [2] L. Burgnies *et al.*, "Experimental phase-advance in woven textile metasurface," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 107, no. 20, p. 203505, Nov. 2015.
- [3] D. D. Cerovic, J. R. Dojcilovic, K. A. Asanovic, and T. A. Mihajlidi, "Dielectric investigation of some woven fabrics," *J. Appl. Phys.*, vol. 106, no. 8, p. 084101, Oct. 2009.
- [4] Y. Liu and X. Zhao, "Experimental Studies on the Dielectric Behaviour of Polyester Woven Fabrics," *Fibres Text. East. Eur.*, no. Nr 3 (117), pp. 67--71, 2016.
- [5] S. Sankaralingam and B. Gupta, "Determination of Dielectric Constant of Fabric Materials and Their Use as Substrates for Design and Development of Antennas for Wearable Applications," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 59, no. 12, pp. 3122--3130, Dec. 2010.
- [6] F. Capolino, *Theory and Phenomena of Metamaterials*. CRC Press, 2009.