

Caractérisations expérimentale et numérique de composites minces tramés utilisés dans les circuits imprimés pour des applications hyperfréquences

G. Girard^a, M. Jrad^a, S. Bahi^a, M. Martiny^a, S. Mercier^a, L. Bodin^b,
D. Nevo^c, S. Dareys^d

a. LEM3 Laboratoire d'Etude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux, UMR CNRS 7239,
Université de Lorraine, Ile du Saulcy, Metz 57045, France

b. CIMULEC, ZI Les Jonquières, 57365 Ennery, France

c. Thales Alenia Space, 26 avenue Jean François Champollion 31100 Toulouse

d. CNES, Centre spatial de Toulouse 18 avenue Edouard Belin 31401 Toulouse cedex 9

Adresse e-mail : gautier.girard@univ-lorraine.fr

Résumé :

Le comportement élastique orthotrope de composites minces tramés est étudié dans cet article. Sur des matériaux minces, les propriétés dans le plan sont les plus facilement mesurables, mais les propriétés hors-plan sont nécessaires pour réaliser des calculs ou des simulations de structures. C'est le cas notamment pour les stratifiés utilisés dans les circuits imprimés. Une méthode d'homogénéisation combinant approches analytique et numérique est présentée ici afin d'obtenir le comportement élastique orthotrope complet d'un composite tramé à partir de sa structure interne 3D précise et de ses propriétés élastiques mesurées dans le plan.

Abstract :

The elastic orthotropic behaviour of thin woven composites is studied in this article. For thin materials, the in-plane properties can be measured, but the out-of-plane properties can be necessary in order to perform simulations on structures. It is the case in particular for laminates used in printed circuit boards. A homogenisation method combining analytical and numerical approaches is presented here to obtain the complete elastic orthotropic behaviour of a woven composite from its internal 3D structure and its measured in-plane properties.

Mots clés : Composite tramé, essais mécaniques, tomographie, comportement orthotrope, homogénéisation, circuits imprimés

1 Introduction

Dans un contexte de miniaturisation des systèmes électroniques, les dimensions des circuits imprimés diminuent sensiblement avec une densité d'interconnexion toujours croissante. Cette densification mène

les fabricants aux limites de leur savoir-faire. Dans le cadre de cette étude, on s'intéresse à la carte nue, c'est à dire un circuit imprimé sans composants assemblés. Le circuit imprimé est un multi-couche, multi-matériaux associant des diélectriques et du cuivre qui assure la connectivité électrique. Pour des applications spatiales ou aéronautique militaire, les circuits imprimés doivent pouvoir subir un certain nombre de cycles thermiques sans apparition de défaillances. Or les matériaux utilisés dans les circuits imprimés ont des comportements thermomécaniques très différents. En particulier, l'écart sur les valeurs des coefficients d'expansion thermique entre le cuivre et les substrats composites est à l'origine de certaines de ces défaillances (fissures dans les métallisations ou dans les isolants, problèmes aux interfaces...). Pour anticiper les problèmes de fiabilité dans les circuits imprimés, le recours à la simulation numérique est une nécessité, permettant ainsi de contourner la stratégie de conception par utilisation de prototypes successifs. En simulant différentes configurations, il est possible de déterminer la solution la plus fiable et ainsi améliorer la tenue en fatigue du circuit imprimé.

Au préalable, il convient d'alimenter les modèles numériques. De ce fait, le comportement des différents matériaux en jeu doit être précisément déterminé. Cela concerne à la fois le comportement élastoplastique du cuivre, mais aussi le comportement élastique des substrats. Or les substrats utilisés sont généralement des composites constitués d'une ou plusieurs trames de fibres de verre enrobées d'une résine parfois chargée. Les résines sont formulées entre autres afin de répondre à des propriétés électriques et magnétiques souhaitées. Le comportement global des substrats ou plis composite est orthotrope et nécessite la connaissance de neuf constantes élastiques. Dans le cadre de ce travail, nous nous intéressons aux circuits imprimés multicouches et les plis ont généralement une épaisseur de quelques centaines de micromètres. Des essais de traction dans le plan nous permettent de relever quatre constantes élastiques. Cependant, la caractérisation du comportement mécanique est difficile dans la direction de l'épaisseur. L'idée est d'estimer les cinq constantes manquantes à l'aide de simulations numériques.

La grande majorité des stratifiés utilisés dans les circuits imprimés sont des composites constitués d'une ou plusieurs armures taffetas enrobées dans une matrice polymère. Le pas de tissage ou le nombre de fibres par fil peuvent varier, ainsi que la nature de la matrice utilisée, en fonction de l'application souhaitée. De nombreuses méthodes ont déjà été développées dans la littérature pour modéliser les composites tissés, aussi bien des méthodes analytiques que des méthodes numériques. Plusieurs auteurs [1] [2] proposent des modèles analytiques permettant d'obtenir un comportement homogénéisé en considérant une maille simplifiée. Barbero et al. [3], Chen et al. [4] ou encore Jacques et al. [5] proposent des méthodes d'homogénéisation numérique pour les composites tissés. La méthode consiste d'abord à déterminer le comportement isotrope transverse homogénéisé des torons (fibres + matrice), puis de sélectionner un Volume Élémentaire Représentatif (VER) de la structure (une maille) sur lequel des conditions aux limites périodiques sont appliquées. Différents chargements sont appliqués à ce VER pour en déduire le comportement homogénéisé et la matrice orthotrope des modules d'élasticité.

Différentes méthodes d'homogénéisation du toron sont étudiées dans ces articles (Mori-Tanaka, auto-cohérent, three phase approach, composite cylinder assembly) mais au delà d'un certain taux de fibres, aucune de ces méthodes ne conduit à des résultats satisfaisants. De plus, ces méthodes impliquent que le comportement de la matrice utilisée soit bien défini. Or dans les circuits imprimés, le comportement de la matrice peut être difficile à obtenir ou être considéré comme confidentiel par le fabricant. La méthode présentée se fonde sur une autre approche d'homogénéisation pour les torons et permet une homogénéisation sans connaître à priori le comportement de la matrice, mais en utilisant les mesures des coefficients d'élasticité dans le plan (approche inverse).

2 Mesures expérimentales et géométrie

Des mesures de coefficients d'élasticité dans le plan ont été réalisées sur une machine de traction électrodynamique Instron E3000. Le matériau testé est un stratifié conçu pour des applications hyperfréquences, avec une épaisseur de $305\mu m$. Les mesures de déformation sont réalisées par corrélation d'images numériques. Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes orientées à 0° , 45° et 90° et nous permettent d'obtenir les modules élastiques E_1 , E_2 , ν_{12} , G_{12} , voir tableau 1. Dans ce tableau, les valeurs sont comparées aux données fournisseur.

	E_1 [GPa]	E_2 [GPa]	ν_{12} [-]	G_{12} [GPa]
mesures expérimentales	18,53	20,37	0,168	5,78
valeurs datasheet	25,510	26,889	-	-

TABLE 1 – Coefficients d'élasticité dans le plan : mesures et valeurs datasheet pour le stratifié étudié

Pour prédire les composantes hors-plan, une approche numérique va être proposée. Dans cette section, on s'attache à définir précisément la structure du stratifié.

Pour décrire au mieux la géométrie du composite, des mesures ont été réalisées (Figure 1) sur un microtomographe EasyTom de RX Solutions présent au LEM3 avec une taille de voxel de $1,7\mu m$. La microtomographie permet d'observer le tissage à travers la résine, sans détruire l'échantillon et nous a permis de définir la géométrie du VER. Des observations complémentaires des torons et des fibres qui les constituent sont faites sur un microscope électronique à balayage (MEB). Les images des torons obtenues sont analysées et permettent de relever la forme globale d'un toron (Figure 2).

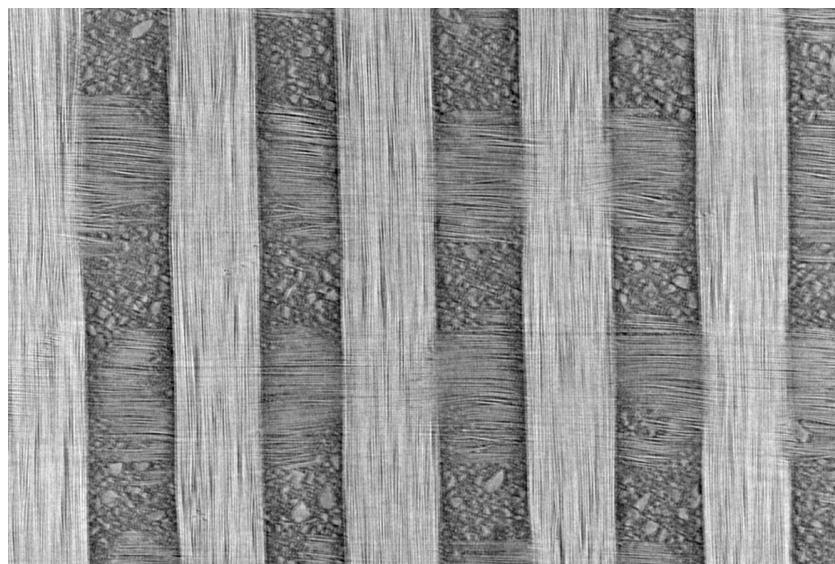


FIGURE 1 – Observation du stratifié au microtomographe

A la suite des observations, le tissage est reconstruit dans le modèle numérique éléments finis. On peut observer que la fibre moyenne des torons suit une courbe en sinus. La période et l'amplitude de cette courbe ont donc été quantifiées à partir des observations au microtomographe. La section du toron, quant à elle, a été relevée sur les images réalisées au MEB.

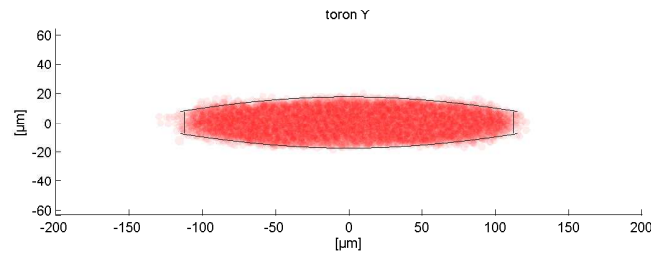


FIGURE 2 – Exploitation des observations de torons au MEB. Une analyse statistique sur plusieurs dizaines de torons permet d'en définir une forme moyenne qui sera utilisée pour la simulation numérique.

3 Homogénéisation du comportement orthotrope d'un composite tissé

La prédiction du comportement du stratifié va se faire au travers d'une homogénéisation en deux étapes, suivie d'une approche inverse.

3.1 Homogénéisation des torons

Il est encore très difficile de représenter toutes les fibres dans un calcul d'homogénéisation, même sur un seul VER. En effet, on peut trouver plusieurs centaines de fibres dans un toron et le coût de leur représentation serait énorme, même avec de gros moyens de calculs.

On choisit donc de réaliser une première homogénéisation sur le comportement des torons. Le toron a un comportement élastique isotrope transverse qui peut être décrit par la relation (1).

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = \underline{\underline{S}} : \underline{\underline{\sigma}} \quad (1)$$

En notation de Voigt, on a :

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{12} \\ 2\varepsilon_{13} \\ 2\varepsilon_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu_{12})}{E_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Différentes méthodes d'homogénéisation sont possibles et ont été testées, voir [3], [4], [5]. On peut citer les méthodes d'homogénéisation de Mori-Tanaka, la méthode sur l'assemblage de cylindres composites ou encore la méthode auto-cohérente. [6] note que la méthode de Mori-Tanaka est la plus précise.

Une homogénéisation par la méthode de Mori-Tanaka a été comparée à une homogénéisation par un modèle éléments finis 3D. Un VER 3D de fibres noyées dans une résine a été généré à partir des mesures faites au MEB. Des sollicitations de traction et de cisaillement ont été appliquées pour en obtenir le comportement homogénéisé. Il en ressort que les résultats obtenus par la méthode de Mori-Tanaka sont en très bon accord avec les résultats éléments finis pour les constantes relatives à la direction des fibres (E_3 , $\nu_{13} = \nu_{23}$ et $G_{13} = G_{23}$ si les fibres sont alignées dans la direction 3). En revanche, on trouve une différence importante pour les autres constantes élastiques $E_1 = E_2$, ν_{12} et G_{12} .

Pour affiner la prédiction des constantes élastiques E_1 , ν_{12} et G_{12} , il a donc été choisi de réaliser un modèle d'homogénéisation en 2D sur Abaqus, représentant un VER de fibres noyées dans la résine avec des conditions aux limites périodiques. A noter que le taux volumique de fibres dans les torons est supérieur à 70%. Pour rappel, les constantes E_3 , $\nu_{13} = \nu_{23}$ et $G_{13} = G_{23}$ sont obtenues par la méthode de Mori-Tanaka. Les calculs doivent être réalisés sur les torons de trame et de chaîne car ceux-ci ont généralement un taux de fibres (et donc un comportement) différent.

3.2 Homogénéisation du composite tissé

La géométrie du stratifié a été définie grâce aux mesures au microtomographe et au MEB. Les torons sont dessinés sur le logiciel Abaqus en extrudant leur section suivant une courbe en sinus. Les torons trame et chaîne sont mis en place afin de construire le tissage taffetas. Le VER représentant la maille du tissage est obtenu. Le comportement des torons est supposé connu (voir section 3.1). L'axe d'isotropie transverse suit l'orientation de la fibre moyenne du toron (courbe en sinus). Cependant, on a pu observer par la simulation que l'oscillation du toron étant faible, la différence sur les valeurs des constantes homogénéisées avec ou sans prise en compte de l'orientation suivant la courbe moyenne est inférieure à 2%. Le VER est ensuite maillé et les conditions aux limites périodiques lui sont appliquées. On obtient alors le modèle présenté sur la Figure 3 (une partie de la résine n'a pas été représentée pour mieux observer les torons et leur géométrie). Les conditions aux limites périodiques, non implémentées directement dans Abaqus, sont définies grâce à un script python.

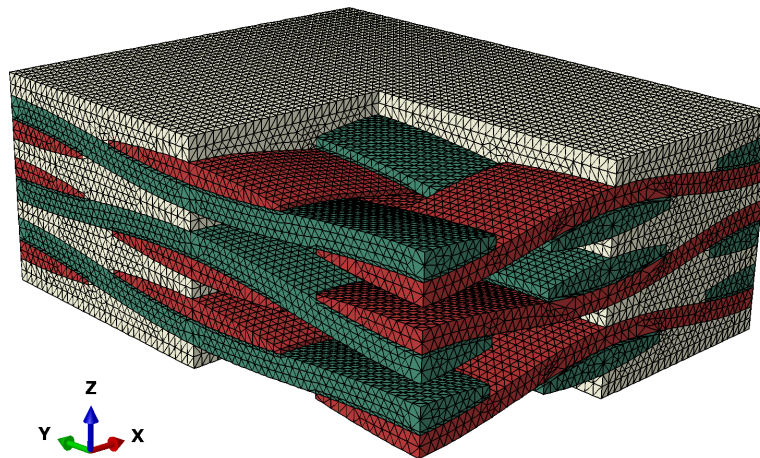


FIGURE 3 – Modèle Abaqus de la maille élémentaire

Les résultats des calculs éléments finis permettent l'obtention des modules homogénéisés. La matrice des souplesses pour un comportement orthotrope est décrite dans la relation (3) en notation de Voigt.

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{12} \\ 2\varepsilon_{13} \\ 2\varepsilon_{23} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{31}}{E_3} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Les calculs d'homogénéisation ont été réalisés avec différents maillages afin de quantifier son influence sur les résultats. Deux modèles comptant 360000 et 597000 éléments tétraédriques C3D10 retournent les mêmes valeurs homogénéisées.

Cette démarche fonctionne si les caractéristiques matériaux de chaque phase sont connues.

3.3 Optimisation, identification inverse

Dans notre étude, la matrice utilisée dans les stratifiés n'est pas clairement décrite par le fournisseur et son comportement est inconnu. Par ailleurs, des observations au MEB ont montré que la matrice inter-torons est chargée en phase inclusionnaire, ce qui n'est pas le cas de la matrice intra-torons. L'idée est alors de considérer le comportement élastique isotrope de ces résines comme inconnu et d'essayer, à partir des mesures des constantes élastiques globales dans le plan du stratifié ($E_1, E_2, \nu_{12}, G_{12}$), de les identifier par méthode inverse.

On introduit quatre inconnues : $E_m, \nu_m, E_{mt}, \nu_{mt}$ les modules d'Young et coefficients de Poisson respectivement de la matrice entre torons et au coeur des torons. Le comportement des fibres de verre est supposé connu ($E_f = 72,3$ GPa, $\nu_f = 0,22$). La méthode d'homogénéisation décrite précédemment est appliquée en utilisant une valeur initiale pour chaque inconnue. On obtient alors un comportement orthotrope, dont les valeurs de E_1, E_2, ν_{12} et G_{12} sont comparées aux valeurs mesurées dans le plan. Par minimisation d'une fonction coût qui sera la somme des carrés des différences relatives entre chacune des valeurs, les valeurs des quatre inconnues sont identifiées. A convergence, une estimation des propriétés élastiques isotropes des deux résines présentes dans le stratifié, mais aussi le comportement orthotrope du stratifié lui-même sont obtenus. Le tableau 2 présente les valeurs des constantes élastiques du stratifié déduites de cette méthode.

E_1 [GPa]	E_2 [GPa]	E_3 [GPa]	ν_{12} [-]	ν_{23} [-]	ν_{13} [-]	G_{12} [GPa]	G_{23} [GPa]	G_{13} [GPa]
19,26	20,32	14,31	0,168	0,270	0,264	5,77	5,64	5,60

TABLE 2 – Comportement orthotrope homogénéisé du stratifié à 20°C.

4 Conclusions

Une méthode d'homogénéisation à deux échelles des composites tissés est proposée afin d'en prédire le comportement élastique orthotrope. Cette méthode d'homogénéisation s'applique si toutes les propriétés des matériaux sont préalablement bien connues. Dans notre cas, le comportement des résines est inconnu. De ce fait, une méthode inverse a été implémentée afin de trouver une estimation du comportement des résines et du stratifié. Ce travail permet la connaissance du comportement hors-plan d'un stratifié à partir de sa géométrie et de ses propriétés dans le plan. Dans le futur, cette méthode sera appliquée à différentes températures et pour d'autres matériaux utilisés dans les circuits imprimés spéciaux.

5 Remerciements

Les auteurs remercient le support du CNES via la bourse de thèse de G. Girard. Les auteurs du LEM3 et de CIMULEC remercient le soutien de l'ANR via le programme Labcom ANR-14-LAB7-0003-01 et la création du labcom LEMCI.

Références

- [1] N.R. Sottos, J.M. Ockers, M. Swindeman, Thermoelastic properties of plain weave composites for multilayer circuit board applications, *Journal of Electronic Packaging* 121 (1999) 37–43
- [2] J.J. Xiong, R.A. Shenoi, J.Gao, An analytical model to predict residual thermal stress in 2D orthogonal plain weave fabric composites, *International Journal of Solids and Structures*, 46 (2009) 1872–1883.
- [3] E.J. Barbero, J. Trovillion, J.A. Mayugo, K.K. Sikkil, Finite element modeling of plain weave fabrics from photomicrograph measurements, *Composite Structures*, 73 (2006) 41–52.
- [4] Z. Chen, F. Yang, S.A. Meguid, Multi-Level modeling of woven glass/epoxy composite for multi-layer printed circuit board applications, *International Journal of Solids and Structures*, 51 (2014) 3679–3688
- [5] S. Jacques, I. De Baere, W. Van Paepegem, Application of periodic boundary conditions on multiple part finite element meshes for the meso-scale homogenization of textile fabric composites, *Composite Science and Technology* 92 (2014) 41–54
- [6] S. Abaimov, A. Khudyakova, S. Lomov, On the closed form expression of the Mori-Tanaka theory prediction for the engineering constants of a unidirectional fiber-reinforced ply, *Composites Structures* 142 (2016) 1–6