



HAL
open science

Détermination des paramètres géométriques pour la caractérisation électrique d'un composite T700/M21 en cours de cuisson

Sonia Sassi, Philippe Marguerès, Rébecca Le Begue, Mahamadou Mounkaila, Philippe Olivier, Thierry Camps

► **To cite this version:**

Sonia Sassi, Philippe Marguerès, Rébecca Le Begue, Mahamadou Mounkaila, Philippe Olivier, et al.. Détermination des paramètres géométriques pour la caractérisation électrique d'un composite T700/M21 en cours de cuisson. *Matériaux et Techniques*, 2016, 104 (4), pp.411. 10.1051/mat-tech/2016014 . hal-04492571

HAL Id: hal-04492571

<https://hal.science/hal-04492571v1>

Submitted on 6 Mar 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Détermination des paramètres géométriques pour la caractérisation électrique d'un composite T700/M21 en cours de cuisson

Sonia Sassi¹, Philippe Marguerès¹, Rébecca Le Begue¹, Mahamadou Mounkaila², Philippe Olivier¹ et Thierry Camps²

Reçu le 15 mars 2016, accepté le 22 avril 2016

Résumé – La variation du comportement électrique du matériau composite en cours de cuisson, dépend étroitement des changements rhéologiques et géométriques suivant les trois plans d'orthotropie. Cet article aborde la caractérisation géométrique de matériaux composites unidirectionnels T700/M21 en fonction des paramètres du procédé de mise en œuvre afin de modéliser son comportement électrique en temps réel de cuisson. Pour ce faire, une approche expérimentale a été développée afin de suivre les variations des paramètres géométriques suivants : fractions volumiques et surfaciques, paramètres de percolation et épaisseurs, en tenant compte des différentes transitions rhéologiques lors de cuissons à l'étuve. Des analyses microstructurales ont été réalisées pour définir les différentes lois décrivant les changements des paramètres géométriques souhaités en fonction du temps de cuisson. Cela nous permettra par la suite de créer un modèle électrique en résistance $R(\Omega)$ et en capacité $C(F)$ pour estimer les variations de $R(\Omega)$ et $C(F)$ en cours de cuisson. Dans ce contexte, on a proposé d'étudier un modèle de percolation estimant la variation du comportement électrique résistif du matériau composite lors de la cuisson en tenant compte des paramètres géométriques les plus influents. Les résultats de ce modèle ont été confrontés à des mesures en résistance électrique réalisées en temps réel de cuisson. Les premiers résultats sont satisfaisants et mettent en évidence l'influence significative des paramètres microstructuraux sur le comportement électrique transverse du matériau composite.

Mots clés : CFRP / T700/M21 / suivi de cuisson / paramètres géométriques / propriétés électriques

Abstract – **Determination of geometrical parameters for electrical characterization of a CFRP during curing.** The electrical values are affected by cure cycles and by the rheological and anisotropic geometrical parameters during curing. The present paper proposes to study the changes in the geometrical parameters of a unidirectional composite material made of T700/M21 prepregs during the cure cycle in the aim to model its electrical behavior during curing. For this work, an experimental approach has been developed to monitor the changes in the following parameters: volume and surface ratios, percolation parameters and thicknesses taking the rheological transitions into account during an oven cure. Then, micro-structural analyses (in the three orthotropic planes) were carried out to define different empirical laws traducing the changes in those parameters during curing. This enables us to determine the electrical model of resistance $R(\Omega)$ and capacitance $C(F)$ during curing. In this context, we propose to study a percolation model to estimate changes in the electrical resistive behavior of the present material during curing taking the influence of the micro-structural parameters into account. Obtained results of this model were compared with those measured during curing. The first obtained results are satisfactory and highlight the significant influence of the micro structural parameters on the electrical resistive transverse behavior of composite material during curing.

Key words: CFRP / T700/M21 / cure monitoring / geometrical parameters / electrical proprieties

¹ Université de Toulouse ; INSA, UPS, ICA (Institut Clément Ader), 31077 Toulouse, France
philippe.margueres@iut-tlse3.fr

² LAAS-CNRS, 31031 Toulouse, France

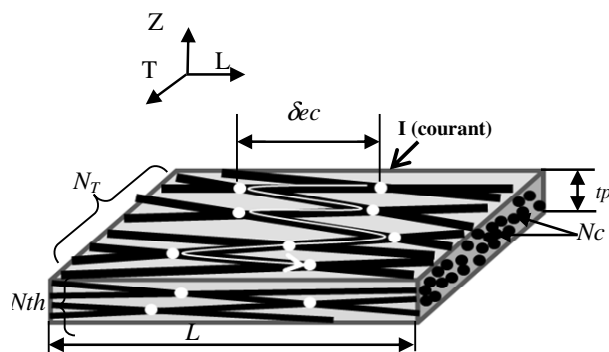


Fig. 1. Représentation schématique de la circulation du courant électrique suivant la direction transverse aux fibres.

Fig. 1. Schematic representation of the flow of electric current in the transverse direction to the fibers.

1 Introduction

Depuis l'apparition des premières pièces en résine renforcée de fibres de verre (vers 1940), les composites se sont énormément développés, entre autres dans le secteur aéronautique. Cette tendance est justifiée par une liste d'avantages de nature mécanique structurelle mais aussi électrique. Cependant, la compréhension des mécanismes de conduction électrique du matériau composite en cours de cuisson est mal connue voire difficile à évaluer. En effet, les paramètres électriques de tels matériaux présentent une forte variabilité liée d'une part à l'anisotropie du matériau et au procédé de mise en œuvre, et d'autre part aux changements des paramètres géométriques (fractions volumiques, paramètres de percolation, épaisseurs) lors de la cuisson. Ainsi, une analyse géométrique est nécessaire pour estimer les changements de ces paramètres en fonction du temps de cuisson permettant d'estimer à tout moment du cycle de cuisson les valeurs en $R(\Omega)$ et $C(F)$. Nous proposons ici d'étudier les changements des paramètres géométriques nécessaires pour la modélisation résistive électrique transverse du matériau composite unidirectionnel (UD) en fonction du temps de cuisson à l'étuve. Nous exposons en 1ère partie, par les différentes lois analytiques permettant d'estimer la résistance électrique transverse en mettant en évidence les paramètres microstructuraux les plus influents. Par la suite, on présentera le protocole expérimental qui consiste à définir les paramètres géométriques du matériau lors d'une cuisson classique à l'étuve. Enfin, différents résultats et analyses seront détaillés avant de donner quelques conclusions et perspectives.

1.1 Conduction résistive transverse du composite UD

La conduction électrique transverse d'un matériau composite à fibres de carbone de nombre des fibres N_T dans le plan (L, T) et N_{th} dans le plan (L, Z) et d'épaisseur tp , dépend principalement de la fraction volumique et de la morphologie des fibres (Fig. 1). En effet, la conductivité dans le sens transversal aux fibres

n'est pas nulle (elle varie entre 10 et 100 S/m), car elle dépend du réseau de percolation qui dû à la présence des contacts inter-fibres [1]. Ces contacts résultent majoritairement de la répartition inhomogène des fibres en cours de cuisson ainsi que des ondulations des fibres engendrées par la contraction de la résine pendant la réticulation. Xia et al. [2] ont montré que le paramètre géométrique le plus influent sur la résistivité transverse est la distance moyenne séparant deux contacts consécutifs entre deux fibres adjacentes dans le plan (L, T) et (L, Z) , notée δec (Fig. 1). Ce paramètre est fortement lié au nombre des points de contacts Nc et au taux volumique de fibre Vf , définis dans les plans et (T, Z) .

En ce qui concerne la détermination de δec , plusieurs approches ont été proposées. Xia et al. ont proposé de l'estimer à partir des points de contact inter-fibres Nc comme indique la relation suivante :

$$\delta ec = \frac{LN}{2Nc} \quad (1)$$

tel que L est la longueur totale des fibres et N est le nombre total des fibres dans un pli.

D'autres études considèrent que la mesure de δec est très difficile à réaliser et proposent par la suite la prédiction de ce paramètre en utilisant des modèles analytiques et des simulations numériques de type Monte Carlo [3, 4]. De plus, Gillet et al. [5] ont utilisé des analyses microstructurales. Ils considèrent que la mesure de ce paramètre s'avère difficile dans la mesure où les points de contact physique entre les fibres sont peu distincts. Pour cela ils considèrent que la période d'ondulation de la fibre est équivalente à δec .

En se basant sur ces approches, Xia et al. ont proposé un modèle analytique traduisant la variation de la résistance électrique transverse en tenant compte des paramètres de percolation comme indiqué dans l'équation suivante :

$$R_T = \frac{\rho(\beta\delta ec)^2}{N_{th}L} N_T \quad (2)$$

ρ est la résistivité de fibre, β est un facteur de forme ($\beta = 2$ pour une distribution carrée et $\beta = 2.4$ pour une distribution hexagonale des fibres).

L'objectif de cet article est de déterminer en fonction du temps réel de cuisson, le changement de la résistance électrique transverse aux niveaux des plis du matériau composite UD en utilisant le modèle de percolation mentionné ci-dessus. On présente tout d'abord le protocole expérimental permettant de déterminer les paramètres géométriques suivants : δec , N_T , N_{th} , N , Nc , Vf et tp en tenant compte des différentes transitions rhéologiques lors de cuisson. Par la suite, les valeurs électriques estimées seront comparées à celles mesurées en temps réel de cuisson.

2 Protocole expérimental

Des travaux précédents [6] ont démontré que l'instrumentation électrique à cœur de matériaux composites unidirectionnels T700/M21 pendant la cuisson est

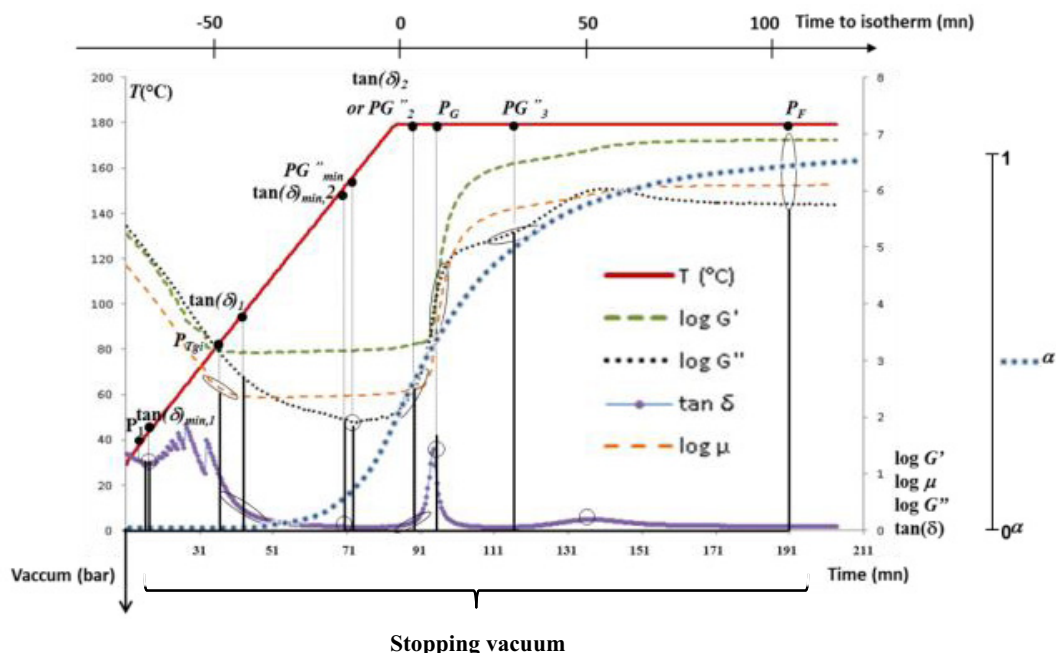


Fig. 2. Points rhéologiques caractéristiques choisis pour la détermination des paramètres géométriques en fonction du temps de cuisson (μ : viscosité ; G' : module conservatif ; G'' : module dissipatif ; $\tan(\delta)$: facteur de perte).

Fig. 2. Characteristics rheological points selected for the determination of geometrical parameters depending on the curing time (μ : viscosity; G' : storage modulus, G'' : loss modulus, $\tan(\delta)$ loss factor).

1 une technique fiable pour monitorer les propriétés ob-
 2 tenues dans le but d’asservir le moyen de production
 3 via le matériau lui-même. Ils ont montré que les me-
 4 sures électriques $R(\Omega)$ et $C(F)$ sont sensibles aux chan-
 5 gements des paramètres rhéologiques lors de la cuis-
 6 sion. La figure suivant (Fig. 2) montre les variations de
 7 la viscosité (μ), du degré de réticulation (α), des mo-
 8 dules de cisaillement (module conservatif, G' , et dis-
 9 sipatif, G''), et du facteur de perte $\tan(\delta)$ en temps
 10 réel de cuisson. La cuisson est réalisée dans une étuve
 11 avec un cycle thermique comportant un palier isotherme
 12 de 120 min à 180 °C et des rampes de montée et de
 13 descente en température de 2 °C/min (cycle préconisé
 14 par le fabricant). 10 points rhéologiques caractéristiques
 15 spécifiques sont détectés (Fig. 2) sur les courbes de μ , G' ,
 16 G'' et $\tan(\delta)$. Ces points correspondent aux minima des
 17 différentes courbes et sont liés aux différentes transi-
 18 tions rhéologiques lors du cycle de cuisson. En transition gel
 19 visqueux/liquide, 3 points ont été choisis : à 15 min après
 20 le début du cycle de cuisson, « P1 », à 21 min « $\tan(\delta)_{\min 1}$ »
 21 (correspondant au premier minimum du facteur de perte),
 22 et à 35 min, « PTgi » (l’amorçage de liquéfaction, chute
 23 de la viscosité, μ).

24 En transition liquide/gel viscoélastique, 5 points ont
 25 été choisis : à 45 min, « $\tan(\delta)_1$ » (le premier point d’in-
 26 flexion de $\tan(\delta)$), à 67 min « $\tan(\delta)_{\min 2}$ » (le second
 27 minimum de $\tan(\delta)$), à 73 min PG''_{\min} (le minimum du
 28 module de dissipation G''), à 89 min « $\tan(\delta)_2$ » (le se-
 29 cond point d’inflexion de $\tan(\delta)$) et à 95 min « PG »
 30 (le pic de $\tan(\delta)$ correspondant au point de gel). Enfin,
 31 en transition gel viscoélastique/vitreux, 2 points ont été

sélectionnés : 117 min, PG''_3 (le 3^{ème} point d’inflexion du
 G'') et à 187 min « PF » (la fin de polymérisation lorsque
 α tend vers l’unité). Ainsi, dans le but de déterminer les
 différents paramètres géométriques, on propose de réaliser
 des arrêts de vide au niveau de ces points caractéristiques
 (10 points) avec une continuité de cuisson jusqu’à la fin de
 cycle. Ceci pour « figer » le matériau à un temps de cuisson
 donné. Les spécimens utilisés sont des composites unidi-
 directionnels fabriqués à partir de prepregs T700/M21 (uti-
 lisé dans le domaine aéronautique et spatial). L’épaisseur
 retenue pour cette étude est de 2 mm (8 plis d’épaisseur
 250 μm). Les plaques réalisées sont carrées (100 mm \times
 100 mm). Afin de répondre à des exigences de reproduc-
 tibilité, plusieurs plaques de même cycle ont été produites.

3 Résultats

3.1 Microstructure d’un mono-ply T700 / M21 dans le plan (T,Z)

Près de 1250 images ont été reconstruites en utili-
 sant « Image J » dans le but d’estimer les changements
 des paramètres géométriques dans les trois plans d’ortho-
 tropie du stratifié. Ici, on ne présente que les résultats
 associés aux plis dans les plans en fonction du temps
 de cuisson. Des coupes parallèles aux fibres dans le plan
 (L,T) et (L,Z) et perpendiculaires aux fibres (T,Z) sont
 montrées dans la figure suivante (Fig. 3). Suivant le plan
 (T,Z) et (L,Z), nous constatons que l’épaisseur du pli
 se compose de mèches des fibres séparées par des couches

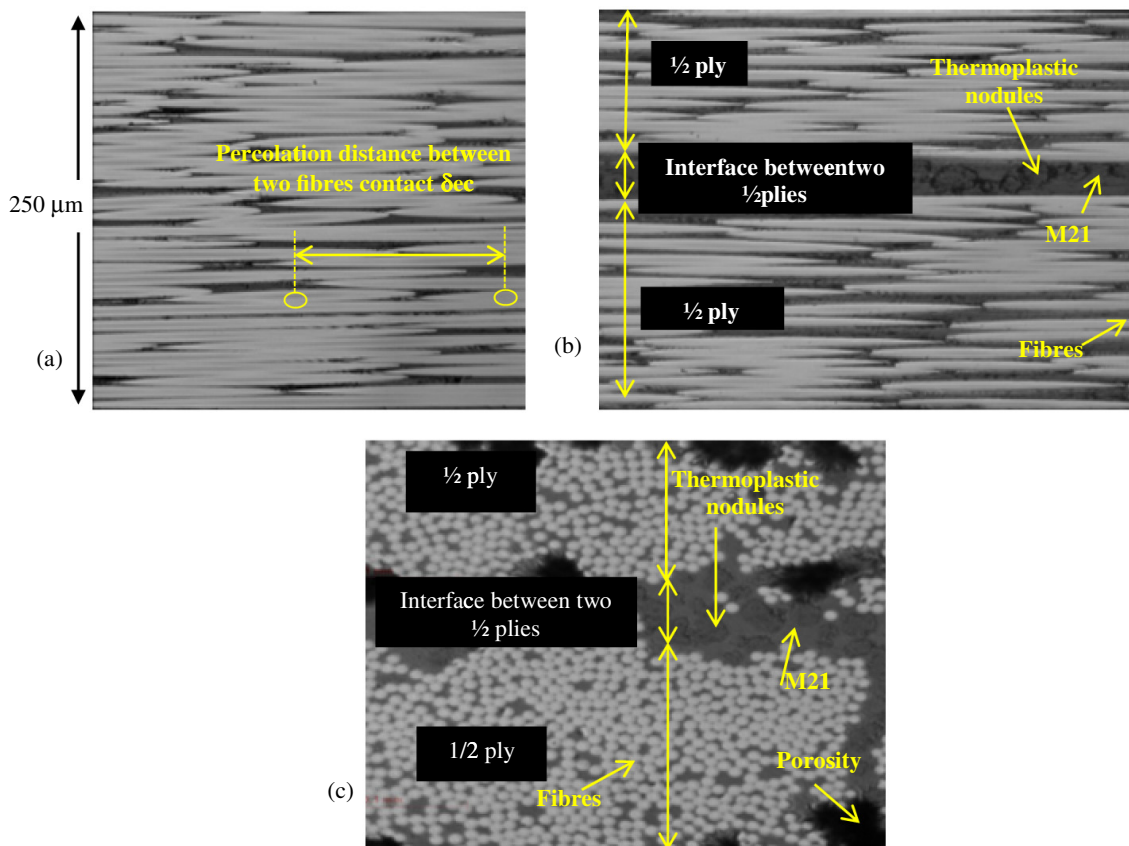


Fig. 3. Coupes parallèles aux fibres dans le plan (L, T) (a) et dans le plan (L, Z) (b) et perpendiculaire aux fibres dans le plan (T, Z) (c) d'un pli UD T700/M21.

Fig. 3. Sections parallel to the fibers in the plane (L, T) (a) and in the plane (L, Z) (b) and perpendicular to the fibers in the plane (T, Z) (c) for a UD ply made of T700 / M21.

1 de résine composées des porosités et des nodules ther-
 2 moplastiques. Ce constat est cohérent avec des résultats
 3 d'observations microscopiques similaires [7, 8] effectuées
 4 sur un matériau identique. Dans le contexte d'une car-
 5 caractérisation électrique transverse, il est extrêmement im-
 6 portant de tenir compte de la distribution des fibres (par-
 7 tie conductrice) et de la matrice (partie isolante). Dans
 8 le plan (L, T) et (L, Z) , il est possible de déterminer les
 9 paramètres géométriques d'une mèche des fibres : le taux
 10 surfacique des fibres S_f et δ_{ec} . Dans le plan (T, Z) , on
 11 peut déterminer S_f et N_c .

12 3.2 Évolution des paramètres géométriques 13 en cours de cuisson

14 Vu le nombre important des analyses microstruc-
 15 turales à réaliser, on propose de développer une
 16 méthodologie de mesure automatique notamment des pa-
 17 ramètres suivants : taux volumique et surfacique des fibres
 18 (V_f , S_f), et nombre des points de contact inter-fibres
 19 N_c . Par contre, δ_{ec} et t_p restent plus difficile à obte-
 20 nir de façon automatique. Elles seront donc obtenues par
 21 approche manuelle.

22 3.3 Évolution de l'épaisseur du pli en fonction 23 du temps de cuisson

24 La figure suivante (Fig. 4) présente la variation de
 25 l'épaisseur moyenne des plis dans les plans (L, Z) et (T, Z)
 26 en fonction du temps de cuisson en tenant compte des
 27 différentes transitions rhéologiques de la résine époxy.
 28 L'écart entre les épaisseurs moyennes des plis dans
 29 ces plans s'explique principalement par des conditions
 30 d'échantillonnage.

31 Les variations des épaisseurs des plis présentent des
 32 tendances en puissance en fonction du temps de cuisson.
 33 Ces comportements sont similaires à ceux trouvés dans
 34 d'autres travaux [9]. Les courbes de variation d'épaisseurs
 35 dans les plans (L, Z) et (T, Z) montrent la présence des
 36 3 zones significatives du matériau : la première zone
 37 (à partir de départ cycle jusqu'à Ptgi) présente une
 38 réduction rapide de l'épaisseur due à la pression de vide
 39 juste avant la liquéfaction de la résine Ptgi. La deuxième
 40 zone (à partir de Ptgi jusqu'au PG) montre une dimi-
 41 nution ralentie des épaisseurs. La compaction dans cette
 42 zone est expliquée par le fait que la température et le
 43 maintien de la pression de vide ont permis le flot de la
 44 résine et la disparition des matières volatiles. La dernière
 45 zone (à partir de PG jusqu'à PF) est caractérisée par une

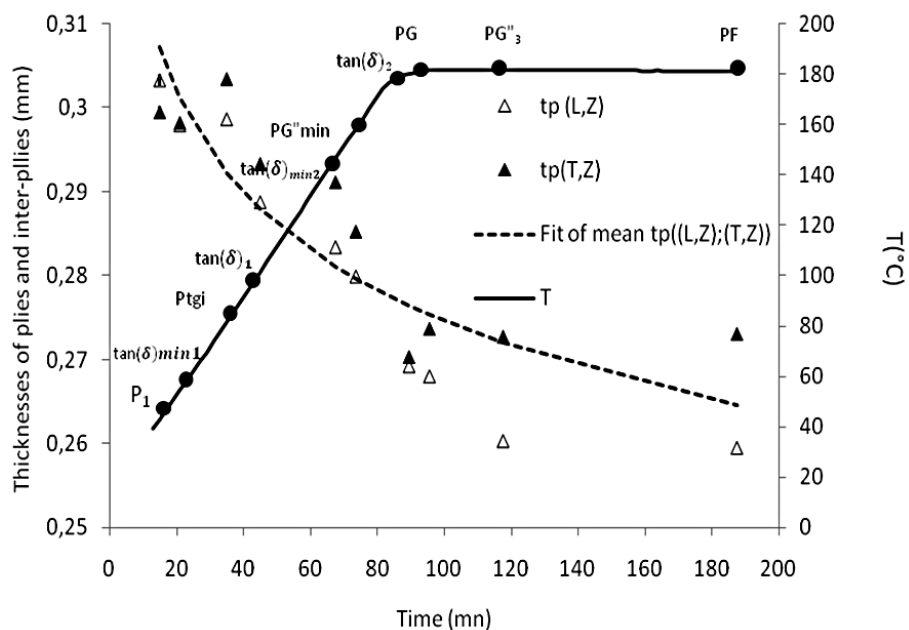


Fig. 4. Changements de l'épaisseur moyenne des plis dans les plans (L, Z) et (T, Z) en fonction du temps de cuisson.
Fig. 4. Changes in the average thickness of the plies in the planes (L, Z) and (T, Z) as a function of curing time.

1 quasi-stabilisation de l'épaisseur en fonction du temps de
 2 cuisson suite à l'augmentation de la viscosité à partir de
 3 point PG. À partir de ce point, le maintien de la pression
 4 de vide n'a aucun effet sur la réduction de l'épaisseur.
 5 Par contre, la moindre réduction de l'épaisseur dans cette
 6 zone est associée aux phénomènes de réticulation et de
 7 contraction thermique de la matrice thermodurcissable
 8 jusqu'à la fin de polymérisation PF.

9 3.4 Évolution de la fraction surfacique des fibres S_f 10 en fonction du temps de cuisson

11 Une première campagne d'analyse d'image manuelle
 12 a été réalisée afin d'obtenir S_f dans les trois plans en
 13 fonction du temps de cuisson. Face au temps consacré,
 14 il a été nécessaire de développer une automatisation des
 15 mesures.

16 Le seuillage manuel permet de distinguer trois phases :
 17 fibres ; résine (époxy + nodules thermoplastiques) et po-
 18 rosités. Cette méthode est réalisée par seuillage à l'œil sur
 19 les images concernées. Elle consiste à trouver nettement
 20 le contour et le cœur des fibres de niveaux de gris (ou in-
 21 tensité) proche de blanc ce qui permet d'obtenir S_f dans
 22 le plan concerné.

23 Face à cette approche manuelle, une méthode auto-
 24 matique, « Otsu 3 », a été utilisée permettant de mettre
 25 en exergue les fibres en adéquation avec les seuils ma-
 26 nuels. Les fractions surfaciques des fibres obtenues par
 27 l'approche automatique sont en bonne adéquation avec
 28 celles déterminées manuellement (Tab. 1). Cependant, les
 29 écartypes élevés obtenus dans le plan (L, T) peuvent être
 30 expliqués par le fait que le polissage manuel ne permet pas
 31 d'assurer une bonne répétabilité de profondeur polie sur

la surface supérieure du stratifié (pli8). Les fractions sur-
 32 faciques des fibres S_f déterminées dans les plans (L, T) et
 33 (L, Z) sont différentes entre elles de celles obtenues dans le
 34 plan (T, Z) et par dissolution chimique comme démontré
 35 par [10].
 36

À partir de ces résultats, on peut conclure que l'ap-
 37 proche automatique est fiable pour estimer les changements
 38 de S_f avec gain du temps de mesure non
 39 négligeable. Par la suite, on ne présente que les résultats
 40 obtenus par la méthode automatique en S_f en fonction
 41 du temps de cuisson. La figure suivante (Fig. 5) expose
 42 les changements des valeurs moyennes de S_f des plis dans
 43 les 3 plans, (L, T) , (L, Z) et (T, Z) durant la cuisson.
 44

Comme précédemment, des lois de puissance peuvent
 45 être utilisées pour décrire la variation de S_f en fonction
 46 du temps de cuisson. Il est à noter que, $S_{f(L,T)}$ présente
 47 les valeurs les plus importantes (équivalentes aux S_f du
 48 prepreg $\sim 56.9\%$) et $S_{f(L,Z)}$ présente les valeurs les plus
 49 faibles. Par contre, la tendance de $S_{f(T,Z)}$ est encadrée par
 50 les tendances de $S_{f(L,T)}$ et $S_{f(L,Z)}$. On peut considérer
 51 que la fraction volumique V_f est égale à S_f obtenue
 52 dans le plan (T, Z) ($S_{f(T,Z)} = V_f$) car $S_{f(T,Z)}$ est égale
 53 à V_f obtenue par dissolution chimique au PF comme
 54 montré en 29. Comme V_f est le paramètre clef pour la
 55 caractérisation électrique transverse, les résultats concer-
 56 nant les taux volumiques de résine et de porosité ne sont
 57 pas présentés ici.
 58

59 3.5 Évaluation des paramètres de percolation 60 en fonction du temps de cuisson

Le réseau de percolation transverse dans le plan (L, T)
 61 est associé aux distances de percolation δ_{ec} également aux
 62

Tableau 1. Comparaison des taux surfaciques de fibres obtenus par approche manuelle et automatique pour les trois plans orthotropes (le point PF est pris comme exemple ici).

Table 1. Comparison of fiber surface rates obtained by manual and automatic approach for the three orthotropic planes (PF is taken as an example here).

| | Sf (%) (L,T) | Sf (%) (L,Z) | Sf (%) (T,Z) | Vf (%) Global values |
|----------------------|---------------|--------------|---------------|----------------------|
| Méthode manuelle | 55,02 ± 11,08 | 48,47 ± 1,60 | 50,22 ± 0,907 | – |
| Méthode automatique | 57,35 ± 5,41 | 48,84 ± 1,06 | 51,23 ± 1,11 | – |
| Dissolution chimique | – | – | – | 51,75 ± 3,33 |

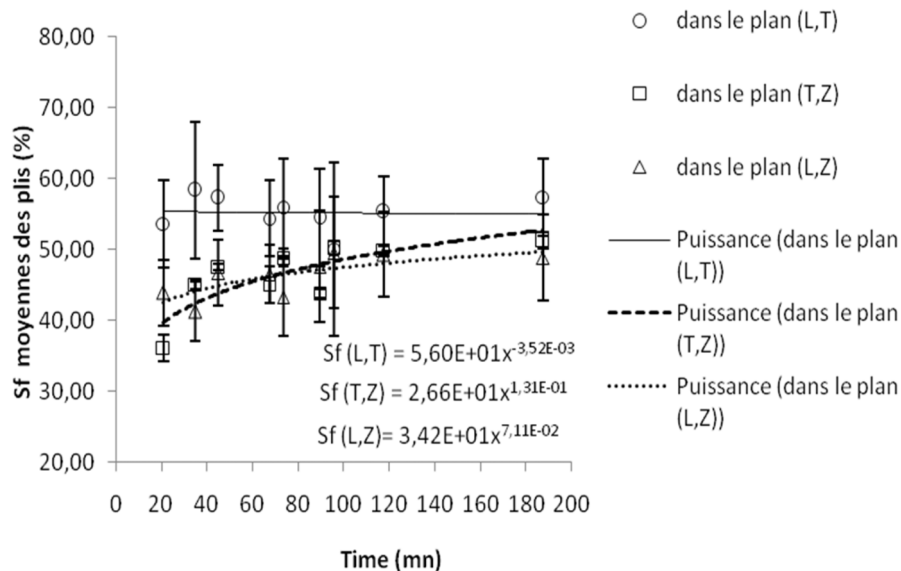


Fig. 5. Changements des valeurs moyennes de Sf obtenues par la méthode automatique en fonction du temps de cuisson.
Fig. 5. Changes in average values of Sf obtained by the automatic method according to curing time.

1 nombres des points de contact inter-fibres N_c . Le suivi
2 des paramètres de percolation (δec ; N_c) en fonction du
3 temps de cuisson a peu retenu l’attention. Ici, on propose
4 le suivi de ces paramètres en fonction du temps de cuisson
5 en tenant compte de l’anisotropie du matériau en utilisant
6 des analyses microstructurales.

7 Dans le but de déterminer δec , une approche automa-
8 tique a été développée pour mesurer N_c sur plus de 600
9 micrographies en utilisant la méthode de « Binary Water-
10 shed ». La figure qui suit (Fig. 6) montre l’évolution de
11 N , N_c , N_T et N_{th} en fonction de Vf au sein des plis dans
12 le plan (T, Z) en cours de cuisson.

13 Par la suite, en se basant sur l’Équation (1), la varia-
14 tion de δec dans le pli en fonction du temps de cuisson
15 est donnée dans la suivante (Fig. 7).

16 Les figures précédentes montrent que N et N_c aug-
17 mentent en cours de cuisson tandis que δec diminue
18 de façon significative jusqu’au point PG (les points de
19 contact ne sont pas figés) et présente par la suite un
20 comportement stabilisé. Ceci peut être expliqué par la
21 réduction de l’épaisseur et par le flot de la résine liée à la
22 chute de la viscosité à partir du point Ptgi.

3.6 Résistance électrique transverse en cours de cuisson

23 Dans cette dernière partie, on présente la comparaison
24 entre les variations de la résistance électrique transverse
25 R_T estimée et mesurée dans le plan (L, T) d’une plaque
26 composite T700/M21 en cours de cuisson. Afin d’assu-
27 rer les mesures de R_T en cours de cuisson, on place sur
28 la surface supérieure d’une plaque composite (100 mm ×
29 100 mm) deux électrodes type « flex » de façon à mesurer
30 la conduction transversale du pli supérieur (pli 8) en fonc-
31 tion du temps de cuisson (Fig. 8). La fréquence retenue
32 de mesure est de l’ordre 30 KHz.
33

34 La figure suivante (Fig. 9) montre la comparaison
35 entre R_T mesurée et estimée en fonction du temps de
36 cuisson à partir de l’amorçage de l’étape de liquéfaction
37 (Ptgi) jusqu’à la fin de réticulation (PF).
38

39 On constate que les valeurs de R_T mesurées tendent
40 significativement vers celles estimées par le modèle de Xia
41 et al. [2], en considérant une distribution hexagonale des
42 fibres ($\beta = 2.4$) plus que vers celles qui correspondent à
43 une distribution carré ($\beta = 2$). Ceci semble cohérent avec
44 la distribution réelle des fibres T700 du présent matériau.
45 On peut observer un écart entre les valeurs estimées et
46 mesurées à partir de Ptgi jusqu’à PG. À partir de PG,

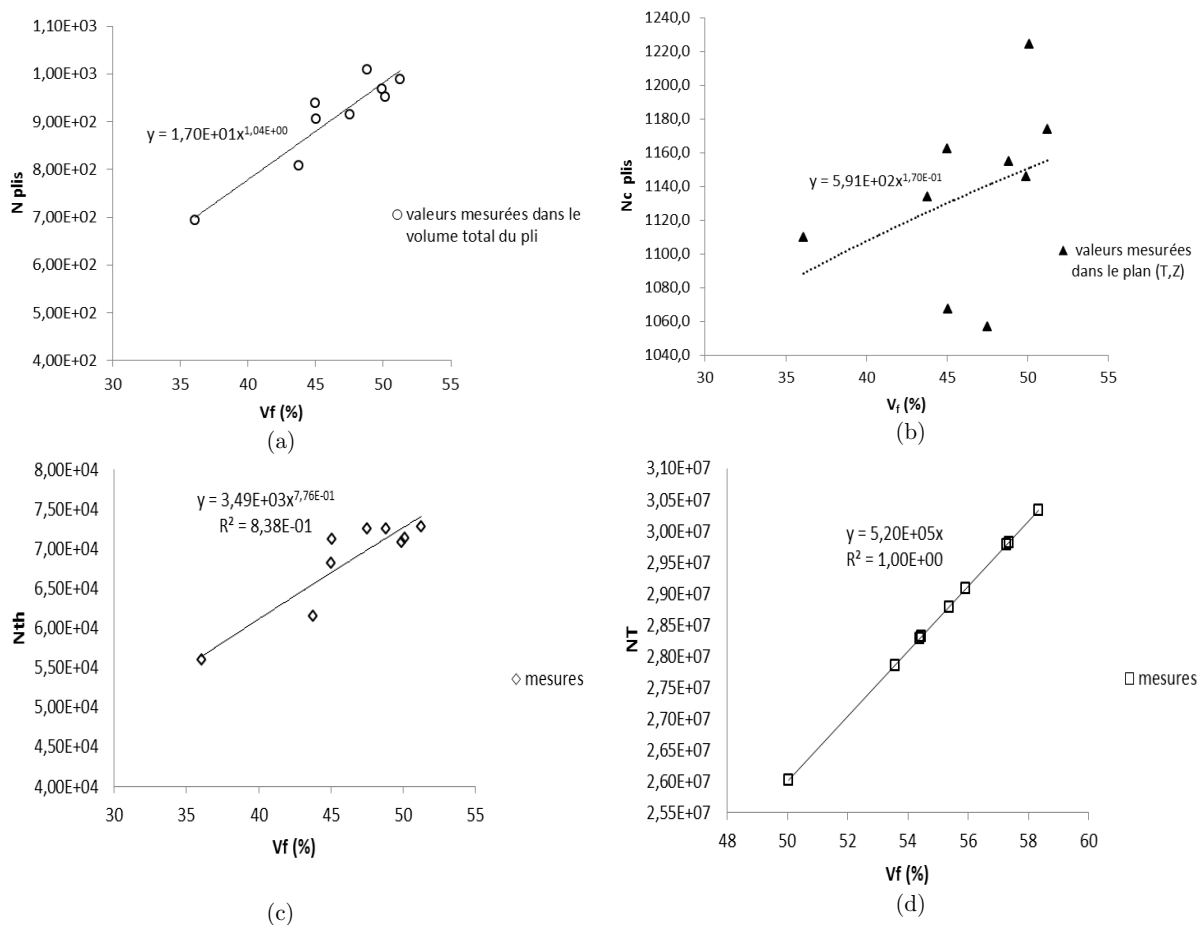


Fig. 6. N (a), N_c (b), N_{th} (c), NT (d). Vs. V_f des plis en cours de cuisson.
Fig. 6. N (a), N_c (b), N_{th} (c), NT (d). Vs. V_f of plies during curing.

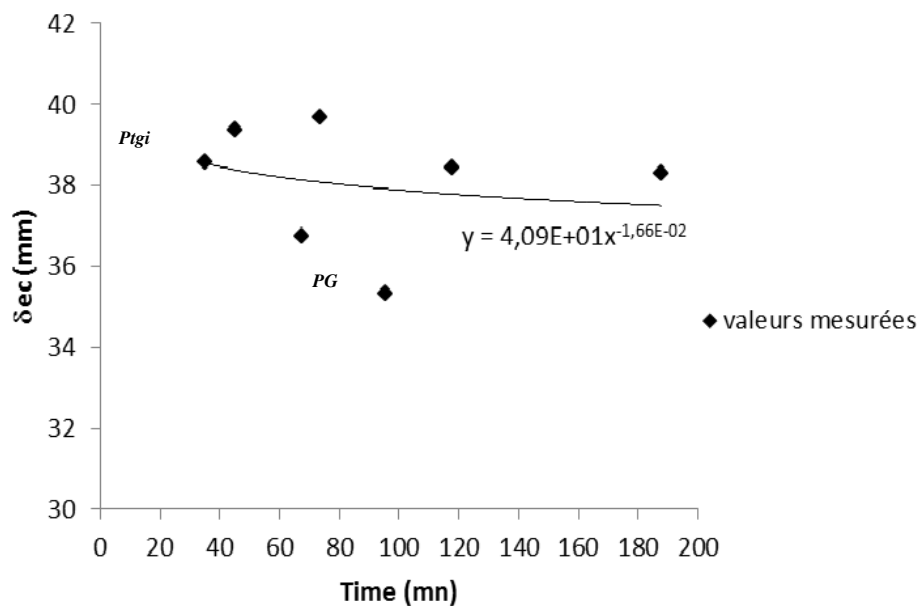


Fig. 7. δ_{ec} en fonction du temps de cuisson.
Fig. 7. Changes in δ_{ec} during curing.

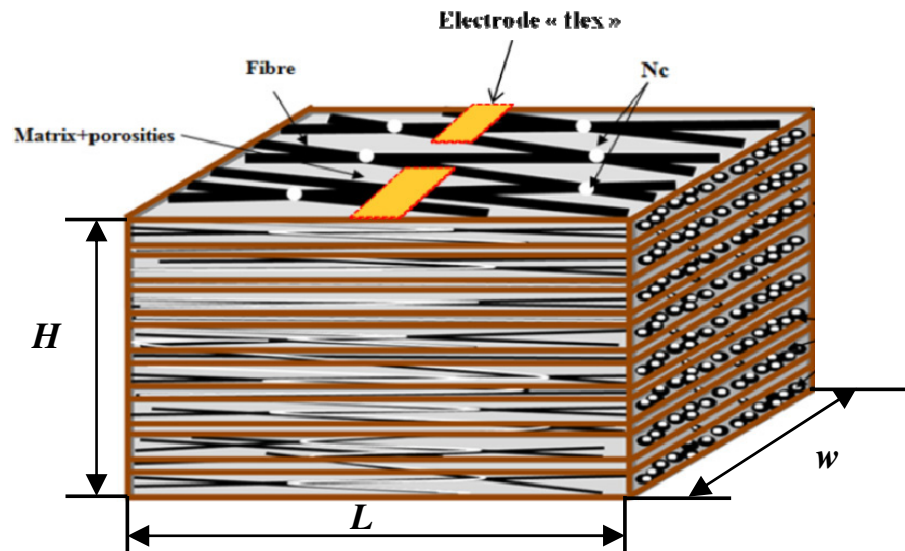


Fig. 8. Plaque T700/M21 instrumenté en surface pour mesurer la résistance électrique transverse en cours de cuisson.
Fig. 8. Instrumented surface of a Plate T700/M21plate to measure the transverse electrical resistance during curing.

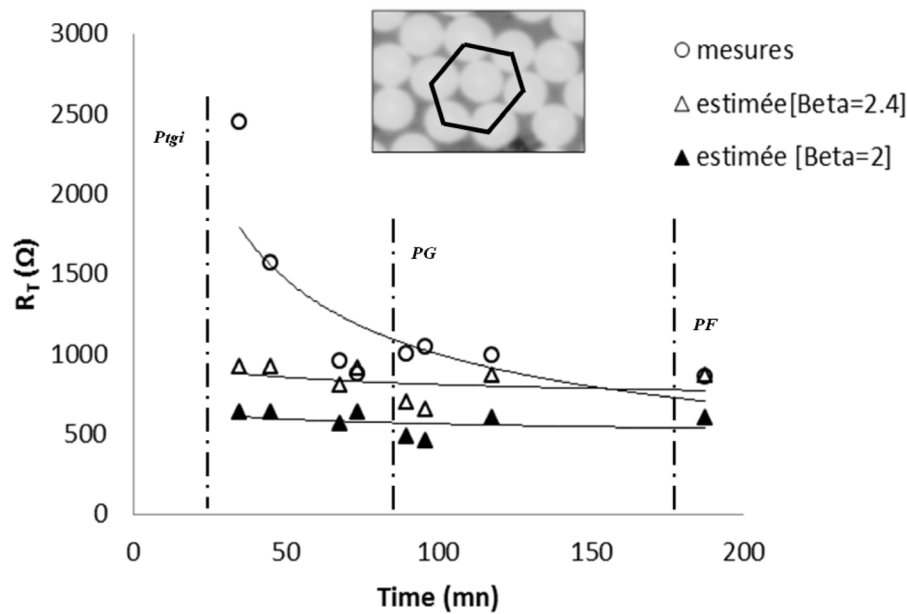


Fig. 9. Comparaison entre les valeurs de R_T mesurées et estimées en fonction du temps de cuisson.
Fig. 9. Comparison between the measured and estimated values of R_T during curing.

1 les deux valeurs convergent fortement. Ceci peut être
 2 expliqué par l'absence de contact pli/électrodes lors de
 3 liquéfaction (et du flot de la résine). À partir, la struc-
 4 ture se fige et les électrodes restent en contact avec le pli
 5 de PG jusqu'à la fin de réticulation.

6 4 Conclusion

7 Cette étude a pour but l'investigation du compor-
 8 tement électrique transverse en résistance d'un compo-
 9 site UD carbone-époxy en cours de cuisson en tenant

10 compte des paramètres géométriques anisotropes. Pour
 11 cela, un modèle analytique de percolation a été utilisé afin
 12 de prédire la variation de la résistance électrique trans-
 13 verse en cours de cuisson dépendamment des paramètres
 14 géométriques de percolation. Des analyses microstructu-
 15 rales automatiques et manuelles ont été réalisées pour
 16 suivre les changements en temps réel de cuisson des pa-
 17 ramètres étudiés suivant les trois plans d'orthotropie.
 18 Les valeurs de la résistance transverse estimées par ce
 19 modèle sont en bonne adéquation avec celles mesurées
 20 en cours de cuisson. Cette adéquation met en évidence
 21 l'influence significative des changements des paramètres

1 microstructuraux de percolation sur la conduction
2 électrique transverse en cours de cuisson.

3 *Remerciements.* Cette étude fait partie d’un projet plus glo-
4 bal qui a reçu le soutien de la Région Midi-Pyrénées (Projet
5 Région Celect-SHM) et s’exprime au travers une collaboration
6 bilatérale entre les laboratoires ICA-CNRS et LAAS-CNRS de
7 Toulouse.

8 Références

9 [1] R. Grimberg, Eddy current examination of carbon
10 fibres in carbon-epoxy composites and kevla, The 8th
11 International Conference of the Slovenian Society for
12 Non-Destructive Testing, September 1-3, 2005
13 [2] Z.H. Xia, W.A. Curtin, *Compos. Sci. Technol.* **67** (2007)
14 1518-1529

[3] J.B. Park, *Smart Mater. Struct.* **16** (2007) 57-66 15
[4] J.B. Park, *Smart Mater. Struct.* **105** (2003) 16
[5] A. Gillet, Prédiction des propriétés électrique d’un com- 17
posite aéronautique, JNC16-Toulouse, France, 2009 18
[6] P. Marguerès, *Meas. Sci. Technol.* **24** (2013) 095005 19
[7] P. Prombut, Caractérisation de la propagation de 20
délaminage des stratifiés composites multidirectionnels, 21
Ph.d. thesis, 2007 22
[8] C. Paris, Étude et modélisation de la polymérisation 23
dynamique de composites à matrice thermodurcissable, 24
Ph.D. thesis, 2011 25
[9] T.E. Saliba, *Compos. Sci. Technol.* **51** (1994) 1-9 26
[10] A. Pilato, Caractérisation des structures composites bo- 27
binees epaisses, application a l’etude du comportement 28
de reservoirs de stockage d’hydrogene, Ph.D. thesis, 2011 29