



HAL
open science

Simulation des contraintes résiduelles dans les structures composites : déformée après cuisson et usinage.

Olga Klinkova, Sylvain Drapier, Jean-Michel Bergheau

► To cite this version:

Olga Klinkova, Sylvain Drapier, Jean-Michel Bergheau. Simulation des contraintes résiduelles dans les structures composites : déformée après cuisson et usinage.. CFM 2009 - 19ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. hal-03390769

HAL Id: hal-03390769

<https://hal.science/hal-03390769>

Submitted on 21 Oct 2021

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.

Simulation des contraintes résiduelles dans les structures composites : déformée après cuisson et usinage.

O. KLINKOVA^{a,b}, S. DRAPIER^a, J.M. BERGHEAU^b

a. École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, Centre Science de matériaux et des structures, LTDS UMR CNRS 5513 158, cours Fauriel 42023 Saint-Étienne

b. Universités de Lyon, ENISE, Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes, LTDS UMR CNRS 5513 58, rue Jean Parot 42100 Saint-Étienne

Résumé :

Un modèle numérique tridimensionnel de cuisson d'un matériau composite stratifié (T300 fibre de carbone / résine époxyde 914, UD pré-imprégné) a été validé en le confrontant à une étude expérimentale. Il s'agit de comparer expérimentalement et par simulation la variation d'un angle et la variation d'épaisseur d'une pièce en L équilibrée qui a subi un cycle de cuisson, mettant en évidence la présence de contraintes résiduelles à la fin du cycle de cuisson. Les variations d'angle et d'épaisseur du L composite sont représentées en différents points, mesurées sur toute la longueur de la pièce, à intervalles réguliers. La corrélation entre essais et calculs s'avère tout à fait concluante au regard des nombreux mécanismes de génération des contraintes résiduelles mis en jeu.

Abstract :

Finite element model (3D) for a simulation of process-induced residual stresses, angular distortions and thickness variation in a composite orthotrope L-shaped structure (T300 carbon fiber /914 epoxy, unidirectional prepregs) are presented and compared with the experimental measurements of these thermo mechanical angular and thickness variations. These variations are induced by the thermal state prescribed for resin curing, coupled with the exothermal physical chemical resin cross-linking characterized itself by volume changes. These variations of the L-shaped part are presented in different points along the L composite part.

Mots clefs : cuisson de la résine ; distorsion ; variation d'épaisseur, T300/914, propriétés

1 Introduction

L'élaboration des composites stratifiés à matrice thermodurcissable fait appel à un cycle de pression-température destiné à polymériser la résine, donnant à la structure composite sa configuration finale. Durant ce cycle thermo-mécanique, les fibres et la matrice subissent des variations dimensionnelles d'origine thermique et chimique conduisant au développement de contraintes résiduelles. Il s'agit ici de mettre en place la modélisation et la simulation numérique des phases de réalisation de cuisson puis d'usinage de moules à base de HexTOOL[®] utilisés dans les procédés par injection de type RTM. Ce matériau est constitué typiquement de paquets de fibres de carbone pré-imprégnés de résine époxyde 180°C, placés dans le plan en orientation quasi isotrope. Le HexTOOL est donc intrinsèquement multi-échelles, et les outils numériques mis en place devront être adaptés afin de prévoir les distorsions, et donc de dimensionner ces moules de façon à réduire les dispersions dimensionnelles des moules puis des structures composites élaborées par ces procédés. Dans le cas du HexTOOL, la problématique réside dans le choix judicieux de l'échelle d'observation de ce matériau, impliquant, ou non, la représentation des plis, des paquets de fibres, voire des constituants. La modélisation de l'usinage de matériaux composites a été peu étudiée jusqu'à présent, mais l'importance de l'usinage pour l'industrie soulève de nombreuses questions. Du fait de la présence de contraintes résiduelles créées lors du cycle de cuisson, la tâche suivante consistera donc à prédire la redistribution de ces contraintes et des distorsions après un enlèvement de matière.

Par conséquent, un modèle numérique tridimensionnel de cuisson d'un matériau composite stratifié orthotrope (classique) en forme de L équilibré a été validé par une étude expérimentale pour simuler l'apparition de ces contraintes résiduelles. Cette étude expérimentale et numérique a été mise en place pour vérifier la présence des contraintes résiduelles qui induisent la variation d'angle et la variation d'épaisseur dans une pièce élaborée. Deux origines d'hétérogénéité et d'anisotropie des composites provoquent le changement de forme de la structure : la différence entre le comportement de dilatation thermique de la fibre et de la résine, ainsi que le retrait chimique de la résine lors du refroidissement [1, 2]. Dans cet article une approche macro thermo-

physico-mécanique couplée faiblement est utilisée [3, 4]. Les expériences sont d'abord présentées et ensuite les résultats du modèle numérique sont exposés et comparés aux mesures.

2 Expérience

Pour cette étude, le matériau suivant est utilisé : plis unidirectionnels (UD) de fibre de carbone T300 6K pré-imprégnés de résine époxyde 914, fourni par la société "Hexcel Composites", avec une épaisseur nominale d'un pli de 0,158mm et un taux nominal de fibre de 58,9% et une masse volumique de fibre de $1,76g/cm^3$.

◆ Propriétés de la matrice époxyde 914

Les propriétés de la résine sont supposées être constantes dans chaque phase. Le tableau 1 présente les propriétés de la résine époxyde 914 dans deux états : vitreux et caoutchoutique. L'indice m indique que le paramètre se rapporte à la matrice, et les exposants g et r représentent respectivement l'état vitreux et caoutchoutique. Les propriétés à l'état caoutchoutique sont calculées en utilisant les formules de [5].

État vitreux		État caoutchoutique	
E_m^g [GPa]	3,9	E_m^r [GPa]	$4,17 \cdot 10^{-2}$
ν_m^g [-]	0,4	ν_m^r [-]	$4,97 \cdot 10^{-1}$
α_m^g [$1/^\circ C$]	$5 \cdot 10^{-5}$	α_m^r [$1/^\circ C$]	$1,25 \cdot 10^{-4}$
G_m^g [GPa]	1,39	G_m^r [GPa]	$1,39 \cdot 10^{-2}$
K_m^g [GPa]	6,50	K_m^r [GPa]	2,60

TAB. 1 – Propriétés mécaniques de la matrice époxyde 914 dans deux états [6, 7].

◆ Propriétés de la fibre de carbone T300-6K

Les propriétés de la fibre de carbone T300 sont résumées dans le tableau 2. L'indice f signifie que le paramètre se rapporte à une fibre.

Propriétés de fibre de carbone T300	Symbole [Unité]	Valeur
Masse volumique	ρ_f [Kg/m^3]	1760
Module de Young (longitudinal)	E_f [GPa]	231
Module de cisaillement (longitudinal)	G_f [GPa]	92,1
Module de compressibilité	K_f [GPa]	123
Coeff. de Poisson	ν_f [-]	0.2
Coeff. de dilatation thermique (longitudinal)	α_f [$1/^\circ C$]	$1,9 \cdot 10^{-5}$

TAB. 2 – Propriétés de la fibre de carbone T300-6K [6, 7].

60 plis de 150×200 mm² de pré-imprégnés UD de T300/914, ont été coupés pour élaborer deux pièces composites en forme de L avec la séquence d'empilement de $[0, 90]_{30}$. Le moule utilisé est en aluminium (AU4G). Les plis préparés sont placés sur la moitié de moule mâle, dite "tool", selon la séquence d'empilement. La deuxième moitié du moule est fixée par 4 vis. Le serrage est réalisé avec une clef dynamométrique. L'espace entre les deux moitiés du moule est vérifié avec un pied à coulisse, il est égale à 9,4 mm. La pesanteur pointe en direction du rayon de la pièce.

Le composite est ensuite placé dans une étuve pour y subir un cycle de cuisson. La vitesse de chauffage de l'étuve a été réglée à $5^\circ C/min$. La température a été mesurée tout au long de la cuisson par un thermocouple positionné en contact avec la surface concave de la pièce. Le maintien en température est ensuite de 60 minutes à $175^\circ C$ pour deux manipulations. Nous observons, que la température s'élève jusqu'à $206^\circ C$, supérieure à la consigne de $175^\circ C$ de l'étuve. Ce phénomène peut être expliqué par la réaction chimique exothermique de polymérisation de la résine. Quant au refroidissement, il se fait à l'air ambiant. Deux expériences similaires ont été réalisées afin de vérifier la fidélité de la méthode de fabrication. Cependant, des agents de démoulage différents ont été employés car celui utilisé dans l'expérience n°1 a fondu. Il n'y avait pas de phénomène d'écoulement près gel observé.

3 Résultats des expériences et discussion

Les mesures de variation angulaire sont réalisées à l'aide d'une machine à mesurer tridimensionnelle CMM. Les mesures de variation d'épaisseur ont été réalisées à l'aide d'un micromètre, le long de trois lignes horizontales parallèles repérées sur les surfaces. Chaque ligne a 10 points espacés de 20 mm. Les lignes les plus proches de bordures sont à 10 mm de bords, les lignes suivantes sont éloignées de 20 mm (figure 1 (a)). L'angle théorique du L doit être de 90° . La figure 1 (b) présente les notations employées pour désigner les angles et les 4 plans. Le défaut de forme de chaque face du moule est relevé, avant les mesures effectuées sur le

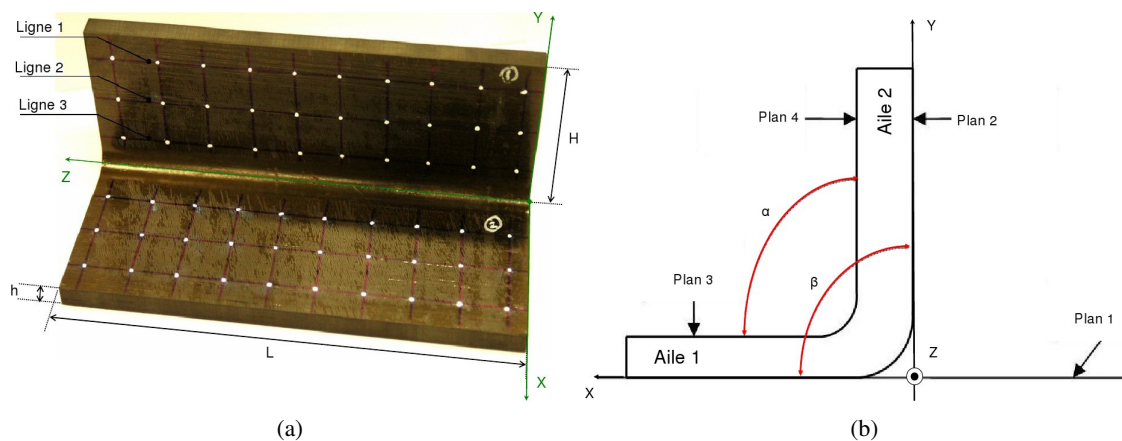


FIG. 1 – (a) Points de de mesures d'épaisseur de la pièce en L. (b) Désignation des angles et des plans.

composite, il est égale à 0,0034 mm en moyenne. Le diamètre du palpeur est de 6 mm. La pièce en composite est alors placée sur le plan 1. Il a été remarqué que ni l'épaisseur ni l'angle ne restent constants sur toute sa longueur.

3.1 Variation angulaire

Deux angles ont été différenciés (figure 1(b)). L'angle α est l'angle entre les surfaces intérieures, autrement dit entre le Plan 4 et le Plan 3 de la figure 1 (b), et β est un angle entre les surfaces extérieures, c'est-à-dire entre le Plan 1 et le Plan 2. La figure 2 montre les variations angulaires pour la deuxième pièce composite.

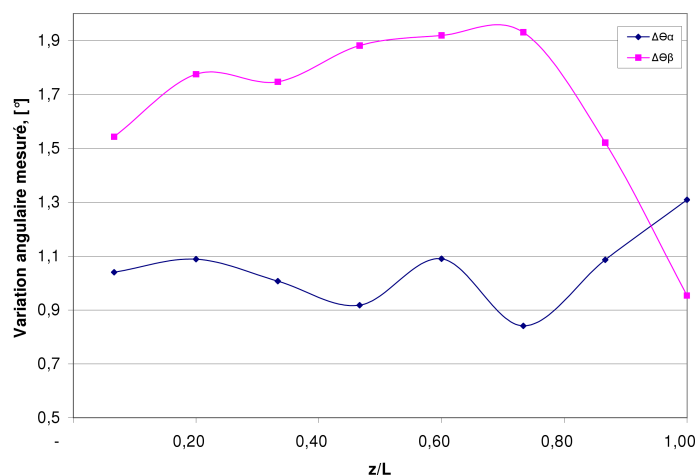


FIG. 2 – Variation d'angle de distorsion des 2 faces de la première pièce en L.

Nous introduisons deux nouveaux paramètres $\Delta\theta_\beta$ et $\Delta\theta_\alpha$, qui sont la différence entre les 90° désirés et β , et entre 90° et α , respectivement. Nous constatons que $\Delta\theta_\beta$ est plus importante que $\Delta\theta_\alpha$ de l'ordre de 28 à 56%, pour la première pièce, et de 1 à 22% pour la deuxième.

3.2 Variation d'épaisseur

L'épaisseur prévue était de 9,50 mm (60 plis x 0,158 mm). En analysant les mesures nous observons que l'épaisseur n'est pas constante, elle change en fonction de la position. Il a également été confirmé, par [8], qu'il est très difficile d'obtenir une distribution d'épaisseur uniforme, ce qui pourrait contribuer à la formation de contraintes résiduelles supplémentaires. La figure 1 (a) indique les points de mesures, où chaque relevé a été fait trois fois. Les deux pièces sont identiques, mais 40 mm de longueur de la première pièce ont été découpés pour un autre type d'essai. La première pièce mesure alors 150 mm et la deuxième 190 mm. La figure 3(a)

montre la variation d'épaisseur de la pièce 1, entre le Plan 2 et le Plan 4, et la figure 3(b) entre le Plan 1 et le Plan 3, respectivement. Trois lignes représentent les trois différents niveaux considérés (cf figure 1 (a)).

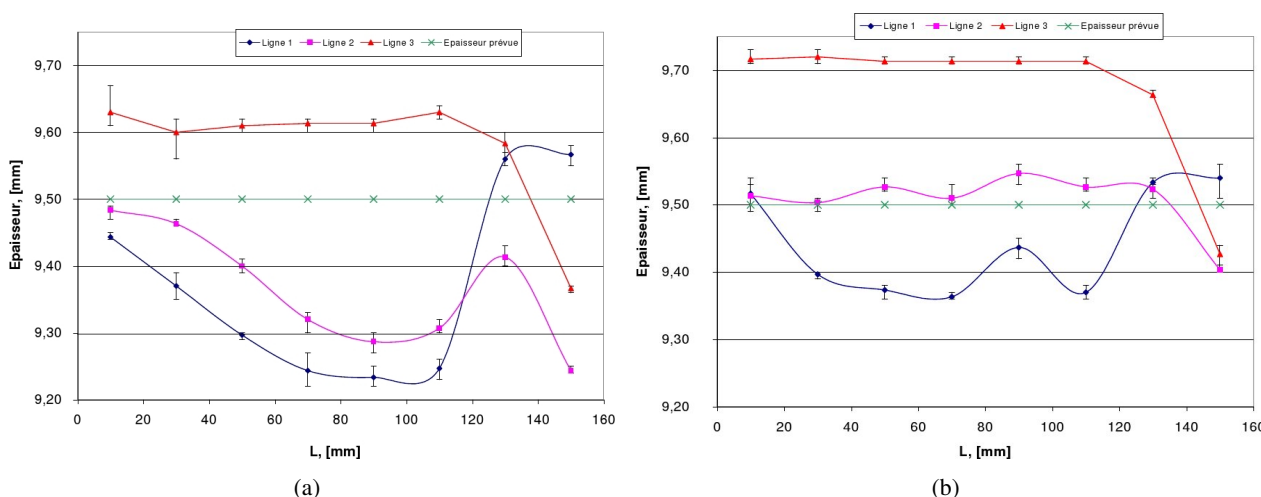


FIG. 3 – Variation d'épaisseur de la pièce 1 : (a) épaisseur considérée entre Plan 2 et Plan 4, (b) épaisseur considérée entre Plan 1 et Plan 3.

Les barres d'erreur indiquent sur la figure 3 l'écart entre les valeurs maximales et minimales relevées en chaque point. Le tableau 3 résume les résultats de variation de l'épaisseur mesurée. Premièrement, la comparaison est faite entre les valeurs minimales et maximales expérimentalement mesurées sur chaque ligne (cf figure 1). Ensuite, nous calculons la différence entre le maximum et le minimum de toutes les épaisseurs mesurées sur un même ligne et sur l'ensemble des trois lignes et ceci pour chacune des ailes.

Différence entre max et min des valeurs d'épaisseur, [%]	Pièce 1			Pièce 2		
	ligne 1	ligne 2	ligne 3	ligne 1	ligne 2	ligne 3
sur la ligne (Plan 2 - Plan 4)	3,48	2,53	2,73	1,39	1,91	1,62
sur la ligne (Plan 1 - Plan 3)	1,85	1,50	3,02	0,73	0,80	0,38
de toutes les valeurs (Plan 2 - Plan 4)	4,12			2,38		
de toutes les valeurs (Plan 1 - Plan 3)	3,67			1,11		

TAB. 3 – Variation d'épaisseur mesurée en [%] pour les deux pièces.

Les variations d'épaisseur ont été observées sur chacune des 2 pièces fabriquées. Les mesures d'épaisseur sont réalisées 3 fois pour chaque point de la pièce (figure 1(a)).

4 Modèle numérique

Pour être capable de prédire des variations dimensionnelles, une approche thermique est nécessaire pour décrire le comportement de la résine pendant la cuisson. Ce modèle thermique fournit la température et le degré de cuisson, à n'importe quel point du composite et à n'importe quel instant pendant le processus de fabrication. Puis, un modèle mécanique (viscoélastique) utilise la température et le degré de cuisson calculés, comme données d'entrée, pour calculer la dilatation thermique, le retrait chimique et les contraintes résiduelles [4]. Nous avons fait le choix d'utiliser le modèle numérique intégré dans le code d'éléments finis SYSPLY.

Le principe de la loi de comportement mécanique développée par peut être expliqué en considérant un solide viscoélastique linéaire. Pour simplifier, le raisonnement est exposé à partir d'un modèle rhéologique à une dimension dans lequel un ressort est placé en parallèle d'un élément de Maxwell.

La contrainte totale est égale à

$$\sigma = \int_0^t E(t - \tau) \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} d\tau \quad (1)$$

où ε est la déformation. Le module de relaxation E est donné par la relation

$$E(t) = E_a + E_m \cdot e^{-\frac{E_m}{\eta_m} \cdot t} \quad (2)$$

L'élément de Maxwell sert ici à modéliser la condition limite entre l'état coutchoutique et l'état vitreux.

Ainsi, la relation est simplifiée en supposant que la relaxation du matériau est instantanée à l'état caoutchoutique, c'est-à-dire pour les températures situées au-dessus de la température de transition vitreuse. Pour cela, η_m tend vers zéro, et la rigidité à l'état caoutchoutique E_r devient égale à E_a . Pour des températures situées en-dessous de la température de transition vitreuse, nous supposons qu'il n'y a pas de relaxation. η_m tend donc vers l'infini, et la rigidité à l'état vitreux E_g est égale à $E_a + E_m$. L'expression de la contrainte devient donc :

$$\sigma = \begin{cases} E_r \epsilon + \int_{t_1}^t (E_g - E_r) \frac{\partial \epsilon}{\partial \tau} d\tau & , \text{ quand } T < T_g, \quad \eta_m \rightarrow \infty \\ E_r \epsilon & , \text{ quand } T \geq T_g, \quad \eta_m \rightarrow 0 \end{cases} \quad (3)$$

où t_1 est le moment où s'est passée la dernière transition état caoutchoutique / état vitreux.

Les déformations se décomposent en une partie thermique et une partie chimique :

$$\varepsilon^E = \varepsilon^T + \varepsilon^C, \quad \varepsilon^T = \int_0^t \alpha(T, \chi) \frac{\partial T}{\partial t'} dt', \quad \varepsilon^C = \int_0^t \beta(T, \chi) \frac{\partial \chi}{\partial t'} dt' \quad (4)$$

où α et β sont respectivement le coefficient de dilatation thermique et le coefficient de retrait chimique.

$$\alpha_{ij} = \begin{cases} \alpha_{ij}^g, & T < T_g(\chi) \\ \alpha_{ij}^r, & T \geq T_g(\chi) \text{ et } \chi \geq \chi_{gel} \\ \alpha_{ij}^l, & T \geq T_g(\chi) \text{ et } \chi < \chi_{gel} \end{cases} \quad (5)$$

et

$$\beta_{ij} = \begin{cases} \beta_{ij}^g, & T < T_g(\chi) \\ \beta_{ij}^r, & T \geq T_g(\chi) \text{ and } \chi \geq \chi_{gel} \\ \beta_{ij}^l, & T \geq T_g(\chi) \text{ and } \chi \leq \chi_{gel} \end{cases} \quad (6)$$

où χ est le degré de cuisson, χ_{gel} est le degré de cuisson à la température de gélification et T_g la température de transition vitreuse. Ces formulations sont ensuite généralisées dans les trois dimensions.

La géométrie de la pièce modélisée correspond aux L réalisés expérimentalement (figure 1(a)). Le modèle est constitué de 300 éléments (3D briques à 8 noeuds) et 468 noeuds. Les propriétés de la résine époxyde 914 et de la fibre de carbone T300 sont tirées de la fiche produit fournie par la société Hexcel complétés par celles trouvées dans la littérature [6, 7]. Les paramètres se rapportant à la matrice correspondent à deux états : l'état vitreux et l'état caoutchoutique. Les propriétés de la résine sont supposées être constantes dans chaque phase. Le modèle numérique nécessite l'évaluation de la température de transition vitreuse en fonction du degré de cuisson qui est classiquement supposée être une fonction linéaire, telle que représentée par :

$$T_g(\chi) = -30 + 220\chi \quad (7)$$

L'enthalpie totale de la réaction dégagée par le composite durant la cuisson est égale à $2,6 \cdot 10^5 [J/Kg]$ [7]. Un Matériau Équivalent Homogène (MEH) de points de vue mécanique, thermique et physico-chimique est utilisé pour la simulation.

4.1 Conditions aux limites

Différentes conditions aux limites thermiques et mécaniques sont appliquées au L tout au long de la simulation de son cycle d'élaboration. Conditions aux limites thermiques : pour prendre en compte le phénomène exothermique signalé dans la section 2 les valeurs de températures, obtenues expérimentalement lors de l'élaboration des pièces, sont appliquées aux surfaces de la pièce. Conditions aux limites mécaniques : afin de simuler la cuisson dans le moule et le démoulage, les conditions aux limites mécaniques évoluent au cours de la simulation. La cuisson dans le moule est modélisée par le blocage en déplacements, suivant les trois directions, de tous les noeuds situés sur la "peau" du L. Après démoulage, quand la pièce est libre, nous supposons que la pièce est posée sur le plan 1 (cf. figure 1 (b)).

4.2 Résultats et discussion

Les simulations réalisées montrent que des contraintes résiduelles sont présentes dans la structure composite. Sur le profil final de la pièce déformée, en comparaison avec le maillage initial nous constatons que la pièce se referme à la fin du cycle de cuisson, et que son épaisseur diminue du maillage sur son bord $x=H$ (cf figure 1). Les variations angulaires prédites, $\Delta\theta_\alpha$ et $\Delta\theta_\beta$, sont différentes par la simulation, comme cela a été montré par l'expérience. La tendance examinée est la même : $\Delta\theta_\alpha < \Delta\theta_\beta$ (cf figure 2). Les valeurs de variations angulaires prédites sont $\Delta\theta_\beta = 0,90$ et $\Delta\theta_\alpha = 0,87$ et $\Delta\theta_\beta = 0,86$ et $\Delta\theta_\alpha = 0,80$ pour la première et

deuxième simulation respectivement. Il n'y a presque aucune différence entre les deux simulations. La seule variation provient des cycles de cuisson (l'écart entre deux cycles de cuissons est de l'ordre de 1 %).

On note que l'épaisseur calculée n'est pas exactement la même que celle attendue. L'épaisseur le long de la ligne 1 est de 9,53mm, de 9,53mm pour la ligne 2 et de 9,52mm pour la ligne 3. La simulation montre que l'épaisseur devient plus importante à la fin de cuisson (9,53mm au lieu de 9,50mm). Ceci est confirmé par les expériences. L'épaisseur diminue à l'approche de la partie courbe du L, ce qui est contraire aux résultats mesurés. Cela peut être expliqué par les défauts d'élaboration, peut être par la présence de porosités, ou un délaminage, ou bien encore par les conditions aux limites imposées.

Le tableau 4 est établi pour synthétiser et comparer des résultats expérimentaux et numériques.

	Sim. 1	Exp. 1		Écart, [%]
$\Delta\theta_\alpha$ [°]	0,87	max min	1,30 0,84	33,49 3,48
$\Delta\theta_\beta$ [°]	0,90	max min	1,93 0,95	53,28 5,43
Épaisseur (Plan 2 - Plan 4) [mm]	9,53	max min	9,63 9,23	1,01 3,14
Épaisseur (Plan 1 - Plan 3) [mm]	9,53	max min	9,72 9,36	1,92 1,7

TAB. 4 – Écart entre la simulation 1 et l'expérience 1.

5 Conclusion

Les variations d'épaisseur ne sont pas les mêmes sur les deux ailes d'une pièce en L (tableau 3, figure 3 (a) et figure 3(b)), et les deux pièces réalisées ne présentent pas les mêmes variations d'épaisseur (figure 3. Ceci peut s'expliquer par les conditions d'élaboration manuelles, qui peuvent varier d'une pièce sur l'autre, avec peut-être présence de porosités ou de délaminage dans certains cas. On observe que l'épaisseur est la plus grande à proximité de la courbure du L, pour les 2 pièces (figure 3. L'écart entre les épaisseurs maximales et minimales est de l'ordre de 3% (tableau 3). On observe un minimum d'épaisseur au milieu des 2 pièces.

Les résultats montrent que les distortions angulaires ne sont pas identiques à l'intérieur et à l'extérieur de la pièce. Cette distorsion est de l'ordre d'un degré. Ces résultats sont cohérents avec la littérature. Les angles prédits et mesurés montrent la même tendance, mais pas les mêmes valeurs (cf. tableau 4). Cette différence peut être expliquée par le manque de valeurs matériaux fiables, par exemple pour le retrait chimique, la valeur moyenne a été prise pour la première étude pour la fibre de carbone unidirectionnelle et la résine époxyde.

Les gradients de températures observés pendant la simulation sont très faibles, la cuisson du L a donc été homogène sur toute son épaisseur. D'autre part, le degré de cuisson de la pièce finie est égal à 1, ce qui prouve que la pièce a été complètement cuite.

Références

- [1] Parlevliet P., Bersee H., and Beukers A. Residual stresses in thermoplastic composites - a study of literature. Part III : Effects of thermal residual stresses. *Composites : Part A*, 38, 1581–1596, 2007.
- [2] Mallick P. *Fiber - Reinforced Composites : materials, manufacturing and design.*, 1988.
- [3] White S. and Hahn H. Process Modeling of Composite Materials : Residual Stress Development during cure. Part 1. Model formulation. *Journal of Composite Materials*, 26(16), 2402–2422, 1992.
- [4] Svanberg M. and Holmberg J. Predictions of Manufacturing Induced Shape Distortions. PhD thesis, Lulea University of Technology, Sweden, 2002.
- [5] Gay D. *Matériaux composites*, 2005.
- [6] Hexcel . Composite carbon T300 / epoxy 914, product properties. Technical report, www.hexcel.com, 2009.
- [7] Prepin R. Analyse des contraintes résiduelles de cuisson dans un composite carbone / époxy à plis croisés. PhD thesis, L'institut National Polytechnique de Lorraine.
- [8] Jain L., Hou M., Ye L., and Mai Y. Spring-in study of the aileron rib manufactured from advanced thermoplastic composite. *Composite Part A*, 29(82), 973–979, 1998.