



**HAL**  
open science

**Caractérisation des contraintes résiduelles de cuisson dans les structures composites : mesures et prédiction de variations angulaires = Characterization of cured-induced residual stresses in composite structures: measurements and prediction of angular variations.**

Olga Klinkova, Sylvain Drapier, Jean-Michel Bergheau

► **To cite this version:**

Olga Klinkova, Sylvain Drapier, Jean-Michel Bergheau. Caractérisation des contraintes résiduelles de cuisson dans les structures composites : mesures et prédiction de variations angulaires = Characterization of cured-induced residual stresses in composite structures: measurements and prediction of angular variations.. JNC 16, Jun 2009, Toulouse, France. 6 p. hal-00391086

**HAL Id: hal-00391086**

**<https://hal.science/hal-00391086>**

Submitted on 11 Jun 2009

**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.

# Caractérisation des contraintes résiduelles de cuisson dans les structures composites : mesures et prédiction de variations angulaires.

## *Characterization of cured-induced residual stresses in composite structures: measurements and prediction of angular variations.*

Olga KLINKOVA<sup>1,2</sup>, Sylvain DRAPIER<sup>1</sup>, Jean-Michel BERGHEAU<sup>2</sup>

1 : Centre Science de matériaux et des structures & LTDS UMR CNRS 5513  
Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne  
158, cours Fauriel 42023 Saint-Étienne  
e-mail : klinkova@emse.fr, drapier@emse.fr

2 : Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes, UMR CNRS 5513  
Universités de Lyon  
58, rue Jean Parot 42100 Saint-Étienne (France)  
e-mail : bergheau@enise.fr

### Résumé

Un modèle numérique tridimensionnel de cuisson d'un matériau composite stratifié (T300 fibre de carbone / résine époxyde 914, UD pre-impregné) a été validé en le confrontant à une étude expérimentale. Il s'agit de comparer expérimentalement et par simulation la variation d'un angle 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 du L composite sont représentées en différents points, mesurées sur toute la longueur de la pièce, à intervalles réguliers. La corrélation entre essais et calcul 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 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 Clés :** cuisson de la résine; distorsion; variation angulaire; T300/914; carbone/époxyde

**Keywords :** resin cure; distortion; spring-in; T300/914; carbon/epoxy

## 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'origines 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 de moules à base de HexTOOL<sup>®</sup> utilisés dans les procédés par injection de type RTM. Ce matériau est constitué typiquement de paquets de fibres de carbone pré-impregnés 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.

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 dans une pièce élaborée. Une approche macroscopique thermo-physico-mécanique couplée faiblement est utilisée pour ce problème complexe [1,4].

## 2. Expérience

Pour l'élaboration de la pièce en L  $[0,90]_{30}$  possédant un rayon de courbure de 10 mm, des nappes pré imprégnées unidirectionnelles fibres de carbones T300/ résine époxy 914, fournies par la société "Hexcel Composites", ont été employées, avec une épaisseur nominale d'un pli de 0,158 mm et un taux nominal de fibre de 58,9% [5-6]. A partir des propriétés connues de la résine époxy et de la fibre de carbone, nous calculons les propriétés d'un pli et en connaissant la séquence d'empilement du stratifié, les propriétés d'un matériau équivalent homogène (MEH) T300/914 sont déterminées; elles sont regroupées dans le Tableau 2.1.

Symbole	État vitreux	État caoutchouteux
$E_{11}$ [GPa]	73,8	65,4
$E_{22}$ [GPa]	73,8	65,4
$E_{33}$ [GPa]	19,3	5,58
$\nu_{12}$ [-]	$5,58 \times 10^{-2}$	$1,05 \times 10^{-3}$
$\nu_{13}$ [-]	$4,86 \times 10^{-1}$	$8,10 \times 10^{-1}$
$\nu_{23}$ [-]	$4,86 \times 10^{-1}$	$8,10 \times 10^{-1}$
$G_{12}$ [GPa]	5,13	$5,41 \times 10^{-2}$
$G_{13}$ [GPa]	4,87	$5,40 \times 10^{-2}$
$G_{23}$ [GPa]	4,87	$5,40 \times 10^{-2}$
$\alpha_1$ [1/°C]	$2,15 \times 10^{-5}$	$1,92 \times 10^{-5}$
$\alpha_2$ [1/°C]	$2,15 \times 10^{-5}$	$1,92 \times 10^{-5}$
$\alpha_3$ [1/°C]	$1,55 \times 10^{-7}$	$2,85 \times 10^{-5}$
$\beta_1$	$-3,2 \times 10^{-3}$	$-7,4 \times 10^{-5}$
$\beta_2$	$-3,2 \times 10^{-3}$	$-7,4 \times 10^{-5}$
$\beta_3$	$-1,9 \times 10^{-2}$	$-3,2 \times 10^{-2}$

Tab. 2.1 – Propriétés de MEH de T300/914, avec la séquence d'empilement  $[0,90]_{30}$ .

$E$ ,  $\nu$ ,  $G$ ,  $\alpha$  et  $\beta$  sont respectivement le module de Young, le coefficient de Poisson, le module de cisaillement, coefficient de dilatation thermique et le retrait chimique du stratifié. 60 plis de  $150 \times 200 \text{ mm}^2$  ont été coupés pour élaborer deux pièces composites en forme de L, dont l'angle théorique est de  $90^\circ$ . Les plis préparés sont placés sur la moitié du moule mâle, dit "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 égal à 9,4 mm, sur six points équirépartis le long du périmètre du moule. Le composite est ensuite placé dans une étuve pour y subir un cycle de cuisson. La vitesse de chauffage de l'étuve de  $5^\circ\text{C}/\text{min}$ . Le maintien en température est ensuite de 60 minutes à  $175^\circ\text{C}$ . La température a été mesurée tout au long de la cuisson par un thermocouple positionné en contact avec la surface concave de la pièce (Fig.2.1). Nous observons, que la température s'élève jusqu'à  $206^\circ\text{C}$  pour les deux cycles de cuisson, qui est supérieure à la consigne de l'étuve. Ce phénomène est expliqué par la réaction chimique exothermique de polymérisation de la résine. Quant au refroidissement, il se fait à l'air ambiant.

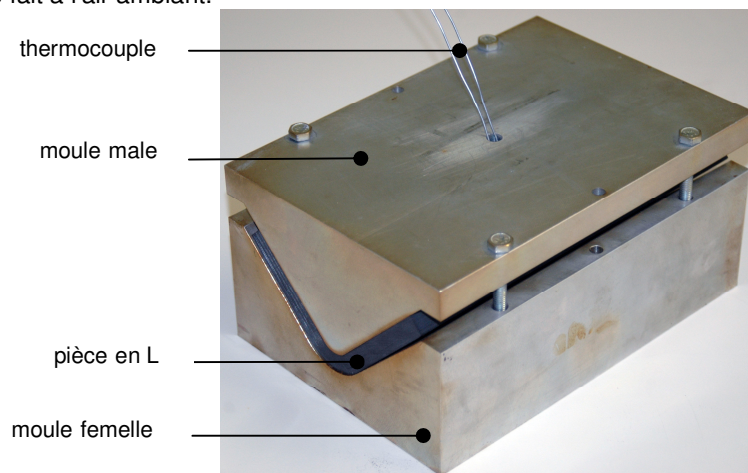


Fig. 2.1. Configuration de l'appareillage de cuisson.

### 3. Résultats des expériences et discussion

Deux expériences similaires ont été réalisées afin de vérifier la répétabilité de manipulations et de la méthode de mesure. Les mesures dimensionnelles des pièces en L ont été réalisées à l'aide d'une machine à mesurer tridimensionnelle, 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 des bordures sont à 10 mm de bords, les lignes suivantes sont éloignées de 20 mm (Fig. 3.1).

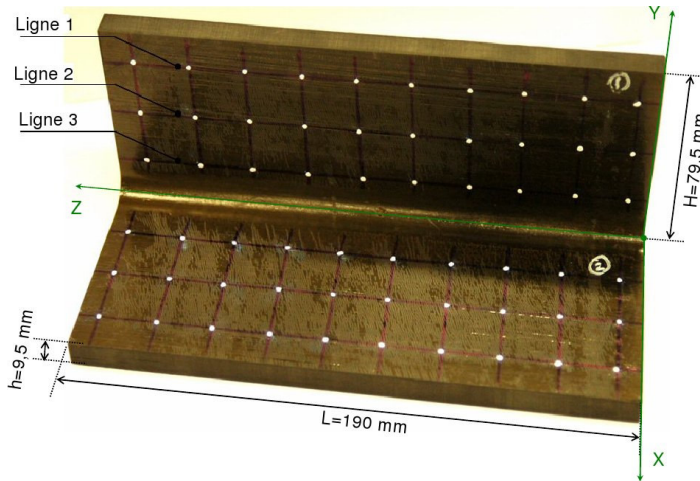


Fig. 3.1. Points de mesures et dimension de la pièce en L.

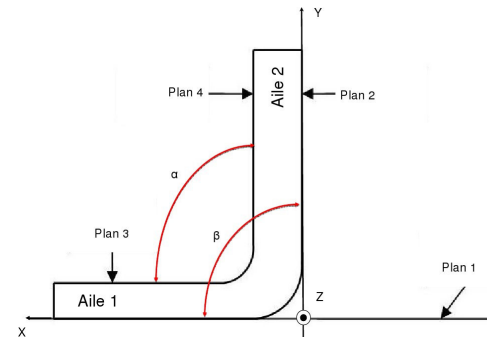


Fig. 3.2. Désignation des angles.

La Figure 3.2 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 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 la surface.

Deux angles ont été différenciés (Fig. 3.2). L'angle  $\alpha$  est l'angle entre les surfaces intérieures, et  $\beta$  est un angle entre les surfaces extérieures. Nous introduisons deux nouveaux paramètres  $\Delta\theta_\beta$  et  $\Delta\theta_\alpha$ , qui sont la différence entre les  $90^\circ$  désirés et  $\beta$ , et entre  $90^\circ$  et  $\alpha$ , 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. La Figure 3.3 montre les variations angulaires pour la deuxième pièce composite.

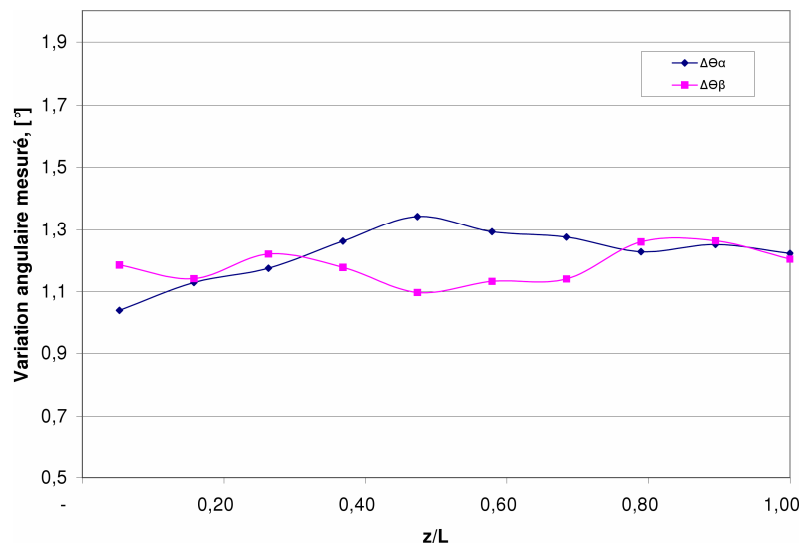


Fig. 3.3. Variation d'angle entre des 2 faces de la deuxième pièce en L.

L'épaisseur prévue était de 9,48 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 Jain et *al.* [8] qu'il est très difficile d'obtenir une distribution d'épaisseur uniforme. 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. Trois lignes représentent les trois différents niveaux considérés (Fig.3.1.).

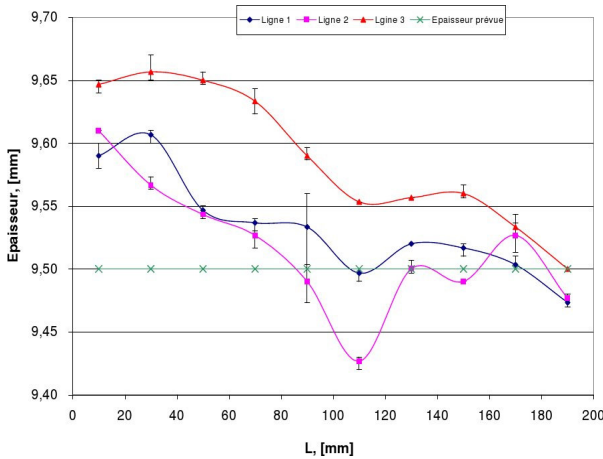


Fig. 3.4. Variation d'épaisseur de la pièce 2, épaisseur considérée entre Plan 2 et Plan 4.

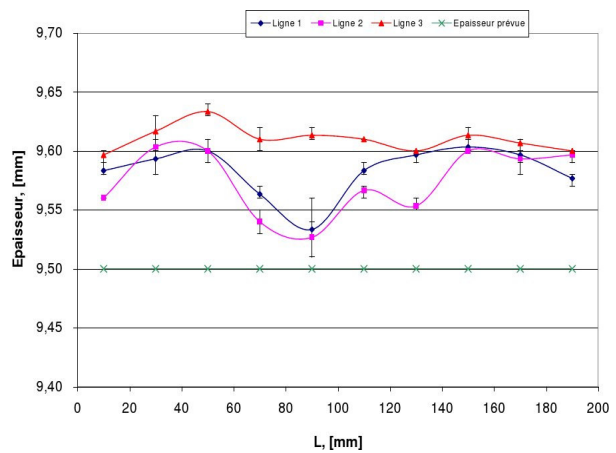


Fig. 3.5. Variation d'épaisseur de la pièce 2, épaisseur considérée entre Plan 1 et Plan 3.

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. On observe que l'épaisseur est la plus grande à proximité de la courbure du L, pour les 2 pièces (Fig. 3.4 et 3.5.)

#### 4. Modèle numérique

Pour être capable de prédire des variations dimensionnelles, une approche thermo-chimique est nécessaire pour décrire le comportement de la résine pendant la cuisson. Ce modèle fournit la température et le degré de cuisson. Puis, un modèle mécanique (viscoélastique) utilise la température et le degré de cuisson calculés, pour évaluer la dilatation thermique, le retrait chimique et les contraintes résiduelles [1-2].

La géométrie de la pièce modélisée correspond aux L réalisés expérimentalement (Figure 3.1.). Le modèle est constitué de 300 éléments (briques 3D à 8 noeuds) et 468 noeuds. 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:

$$T_g(\chi) = -30 + 220\chi \quad (\text{eq. 1})$$

avec  $\chi$  le degré de cuisson.

L'enthalpie totale de la réaction dégagée par le composite durant la cuisson est égale à  $2,6 \times 10^5$  [J/Kg] [7]. Un Matériau Homogène Équivalent (MHE) est utilisé pour la simulation thermo-mécanique.

##### 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

Les valeurs de températures, obtenues expérimentalement par les mesures du thermocouple lors de l'élaboration des pièces, sont appliquées aux surfaces "BAG" et "TOOL".

– 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 appliquons les conditions aux limites, présentées Figure 4.1.1.

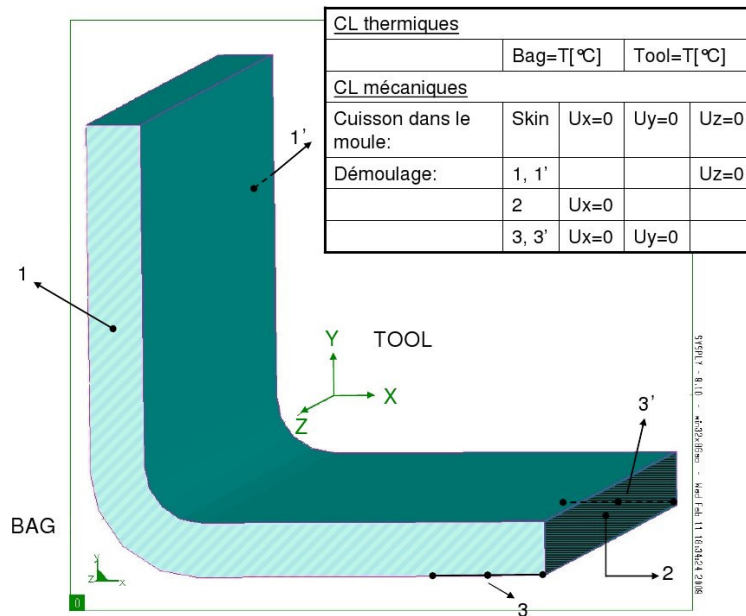


Fig. 4.1.1. Conditions aux limites créées pour mettre en évidence les déplacements de la partie haute du L. Simulation du démoulage.

## 5. Résultats et discussions

Les simulations réalisées montrent que des contraintes résiduelles sont présentes dans la structure composite. Le degré de cuisson, à la fin du cycle, vaut 1, cela veut dire que le composite est cuit.

La Figure 5.1. représente le profil final de la pièce 2 déformée, en comparaison avec le maillage initial.

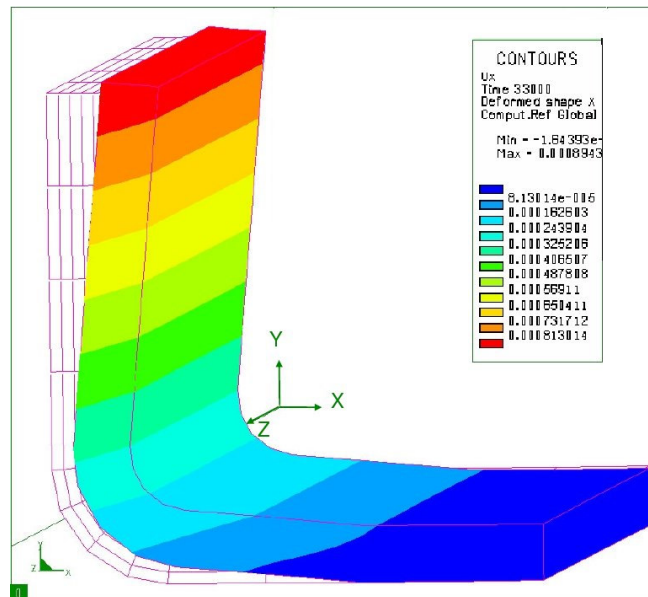


Fig. 5.1. Distorsion de la pièce 1 à la fin du cycle de cuisson.

Un coefficient d'amplification des déplacements est appliqué au maillage final, pour pouvoir mieux visualiser les déformations, car il y a une grande différence entre la longueur et l'épaisseur d'une pièce ( $L=190$  mm,  $h=9,5$  mm). Nous constatons que la pièce se referme à la fin du cycle de cuisson. Ces résultats sont confirmés par de nombreux auteurs.

Les distorsions  $\Delta\theta_\beta$  et  $\Delta\theta_\alpha$  prédites sont différentes, comme cela a été montré par l'expérience, mais les valeurs prédites ne sont pas égales à celles des valeurs mesurées. La tendance examinée est la même :

$$\Delta\theta_\beta < \Delta\theta_\alpha \text{ (cf Fig. 3.3 et Tableau 6.1).}$$

Les valeurs de variations angulaires prédites sont  $\Delta\theta_\beta = 0,90^\circ$ ;  $\Delta\theta_\alpha = 0,87^\circ$  et  $\Delta\theta_\beta = 0,86^\circ$ ;  $\Delta\theta_\alpha = 0,80^\circ$  pour la première et la deuxième simulation respectivement. Il n'y a presque aucune différence entre les deux simulations, l'écart est de l'ordre de 1 %, ce qui est du à la similitude des cycles de cuisson.

Le Tableau 5.1. est établi pour synthétiser et comparer des résultats expérimentaux et numériques.

	Sim.2	Exp.2		Ecart, [%]
$\Delta\theta_\alpha$	0,86	max	1,34	35,75
		min	1,04	17,08
$\Delta\theta_\beta$	0,89	max	1,26	29,28
		min	1,09	18,57
Epaisseur (Plan 2-Plan 4)	9,53	max	9,66	1,28
		min	9,43	1,11
Epaisseur (Plan 1-Plan 3)	9,53	max	9,63	1,04
		min	9,53	0,06

Tab. 5.1 – Écart entre la simulation 2 et l'expérience 2.

## 6. Conclusion

Les résultats expérimentaux et numériques montrent que les distorsions 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 [1-3]. Les angles prédits et mesurés montrent la même tendance, mais pas les mêmes valeurs. 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.

On observe que l'épaisseur est la plus grande à proximité de la courbure du L, pour les 2 pièces (Fig. 3.4. et Fig. 3.5.). Les variations d'épaisseur sont moins marquées pour la deuxième pièce. L'écart entre les épaisseurs maximales et minimales est de l'ordre de 3%. On observe un minimum d'épaisseur au milieu des 2 pièces, plus marqué pour la pièce 2. La différence entre le maximum et le minimum de toutes les épaisseurs mesurées est 4,12% et 2,38% pour la pièce 1 et pièce 2 sur les Plan 2 – Plan 4. La différence entre le maximum et le minimum de toutes les épaisseurs mesurées est 3,67% et 1,11% pour la pièce 1 et pièce 2 sur les Plan 1 – Plan 3.

## Références

- [1] M.J. Svanberg, et J.A. Holmberg, « Predictions of Manufacturing Induced Shape Distortions ». *PhD thesis*, Lulea University of Technology, Sweden, 2002.
- [2] S.R. White et H.T. Hahn, « Process modelling of composite materials: Residual stress development during cure. Part 1. Model formulation ». *Journal of Composite Materials*, 26(16), pp. 2402-2422, 1992.
- [3] C. Albert et G. Fernlund, « Spring-in and warpage of angled composite laminates ». *Composite Science and Technology*, 62(14), pp. 1895-1912, 2002.
- [4] O. Klinkova, « Numerical prediction of the thermally induced distortions after releasing of composite structures ». *Master Thesis*, Siegen Universität, Germany, 2008.
- [5] Hexcel Corporation, « Composite Carbon T300/epoxy 914 ». *Fiche produit*. [www.hexcel.com](http://www.hexcel.com).
- [6] O. Klinkova, et S. Drapier, et J.M. Bergheau, « Simulation des contraintes résiduelles dans les structures composites: déformée après caisson et usinage ». *19<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique*, Marseille, 2009.
- [7] R. Prepin, « Analyse des contraintes résiduelles de cuisson dans un composite carbone / époxy à plis croisés ». *PhD thesis*, Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 1989.
- [8] L. Jain et M. Hou et Y. Mai, « Process Spring-in study of the aileron rib manufactured from advanced thermoplastic composite ». *Composite Part A*, 26(82), pp. 973-979, 1998.