



**HAL**  
open science

## Simulation des contraintes résiduelles dans les structures composites : déformation après cuisson

Olga Klinkova, Florian Bremond, Sylvain Drapier, Jean-Michel Bergheau

### ► To cite this version:

Olga Klinkova, Florian Bremond, Sylvain Drapier, Jean-Michel Bergheau. Simulation des contraintes résiduelles dans les structures composites : déformation après cuisson. 9e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2009, Giens, France. hal-01413974

**HAL Id: hal-01413974**

**<https://hal.science/hal-01413974>**

Submitted on 12 Dec 2016

**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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

# Simulation des contraintes résiduelles dans les structures composites : déformation après cuisson.

O. Klinkova<sup>1,2</sup>, F. Bremond<sup>2</sup>, S. Drapier<sup>1</sup>, J.M. Bergheau<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 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  
klinkova@emse.fr, drapier@emse.fr

<sup>2</sup> Universités de Lyon, ENISE  
Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes, UMR CNRS 5513  
58, rue Jean Parot 42100 Saint-Étienne  
bremond@enise.fr, bergheau@enise.fr

---

**Résumé** — Le modèle numérique tridimensionnel de cuisson d'un matériau composite stratifié orthotrope a été validé en le confrontant à une étude expérimentale. Il s'agit de comparer expérimentalement et par simulation la variation d'angle et d'épaisseur d'une pièce en L, qui a subi un cycle de cuisson. Une approche macro thermo-physico-mécanique, couplée faiblement, est utilisée pour ce problème complexe. Les variations d'épaisseur et d'angle du L composite sont caractérisées en différents points, mesurés sur toute la longueur de la pièce à intervalles réguliers.

**Mots clés** — éléments finis ; cuisson de la résine ; distorsion ; analyse numérique ; simulation ; variation angulaire ; variation d'épaisseur

---

## 1 Introductions générales

Durant ces dernières décennies les matériaux composites ont beaucoup été utilisés en raison de leur faible densité, de leur haute résistance et de leur excellente tenue dans le temps. Cependant, il est connu que les composites se déforment après avoir été fabriqués. La distorsion des structures composites, après la fabrication, est une conséquence du développement des contraintes résiduelles. De plus, les contraintes résiduelles peuvent nuire à la longévité de la structure composite (délaminage, fissuration)[1, 2].

La prédiction numérique de contraintes résiduelles pendant la fabrication du composite est indispensable pour améliorer la connaissance du procédé, et donc analyser les effets des paramètres du procédé sur l'intégrité mécanique de la pièce. Les outils numériques existants basés sur les formulations thermique et mécanique sont capables de prédire telles distorsions. Les expériences sont d'abord présentées ci-dessous et comparées ensuite aux résultats de simulations.

## 2 Réalisation du L composite et les mesures.

Pour cette étude, le matériau suivant est utilisé : fibre de carbone T300 6K unidirectionnelle (UD) pré-imprégnée avec de la résine époxyde 914, fourni par la société "Hexcel Composites", avec une épaisseur nominale d'un pli de 0,158mm, une masse volumique de résine de  $1,30g/cm^3$ ,

un taux nominal de fibre de 58,9% et une masse volumique de fibre de  $1,76\text{g}/\text{cm}^3$ . 60 plis de  $150 \times 200\text{ mm}^2$  de pré-imprégnés unidirectionnels de T300/914 ont été coupés pour élaborer deux pièces composites en forme de L équilibré 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 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.

## 2.1 Cycle de cuisson

Le composite est ensuite placé dans une étuve pour y subir un cycle de cuisson. La vitesse de chauffage de l'étuve est de  $5^\circ\text{C}/\text{min}$ . La température a été mesurée tout au long de la cuisson par un thermocouple positionné sur la surface concave de la pièce. Le maintien en température est ensuite de 60 minutes à  $175^\circ\text{C}$ .

On note que la température s'élève jusqu'à  $206^\circ\text{C}$  pour le cycle de cuisson 1 et  $207^\circ\text{C}$  pour le cycle de cuisson 2, supérieure à la consigne de  $175^\circ\text{C}$  de l'étuve. Ce phénomène peut être expliqué par la réaction chimique exothermique de polymérisation de la résine quand au refroidissement, il se fait à l'air ambiant.

## 2.2 Mesures

Les mesures de variation angulaire sont réalisées à l'aide d'une machine à mesurer tridimensionnelle CMM. De plus les mesures de variation d'épaisseur ont été réalisés à l'aide d'un micromètre le long de trois lignes horizontales parallèles désignées sur les surfaces. Chaque ligne comporte 10 points espacés de 20 mm. Les lignes les plus proches des bordures sont à 10 mm des bords, les lignes suivantes sont éloignées de 20 mm (Figure 1 (a)).

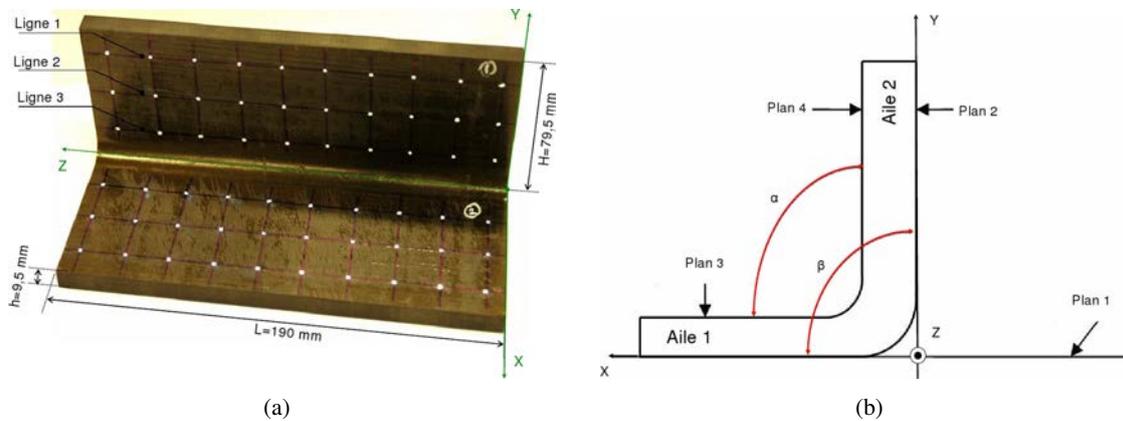


Figure 1 – (a) Points de de mesures d'épaisseur de la pièce en L, (b) désignation des angles et des plans.

## 2.3 Résultats des expériences et discussion

L'angle théorique du L doit être de  $90^\circ$ . 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 composite. 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.

### 2.3.1 Variation angulaire

Deux angles ont été différenciés (Figure 1(b)). L'angle  $\alpha$  est un angle entre les surfaces intérieures, autrement dit entre le Plan 4 et le Plan 3 de la Figure 1 (b), et  $\beta$  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.

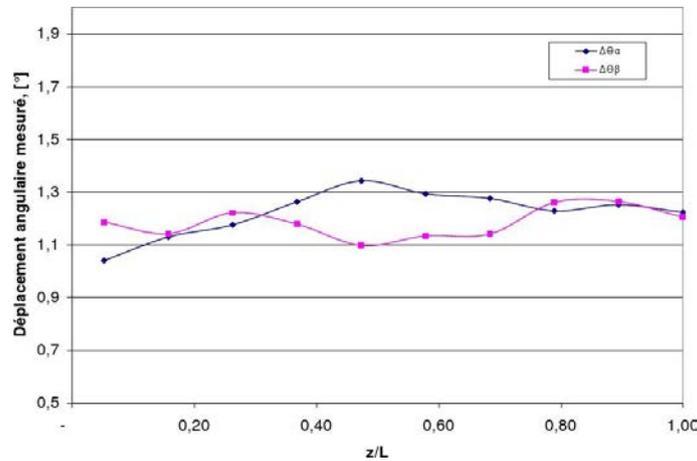


Figure 2 – Variation d'angle de distorsion des 2 faces de la deuxième pièce en L.

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.

### 2.3.2 Variation d'épaisseur

L'épaisseur visée était de 9,50 mm (60 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 [3], qu'il est très difficile d'obtenir une distribution d'épaisseur uniforme. La Figure 1 (a) indique les points de mesures, où chaque relevé a été fait trois fois. Trois lignes représentent les trois différents niveaux considérés (cf Figure 1(a)). La Figure 3 représente la variation d'épaisseur entre le Plan 2 et le Plan 4. Le Tableau 1 résume les résultats de variation d'épaisseur mesurée.

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		

Tableau 1 – Variation d'épaisseur mesurée en [%] pour les deux pièces en L.

## 3 Modèle numérique

Pour être capable de prédire des distorsions, une approche thermique est nécessaire pour décrire le comportement de la résine pendant la cuisson. Ce modèle thermique fournit la température

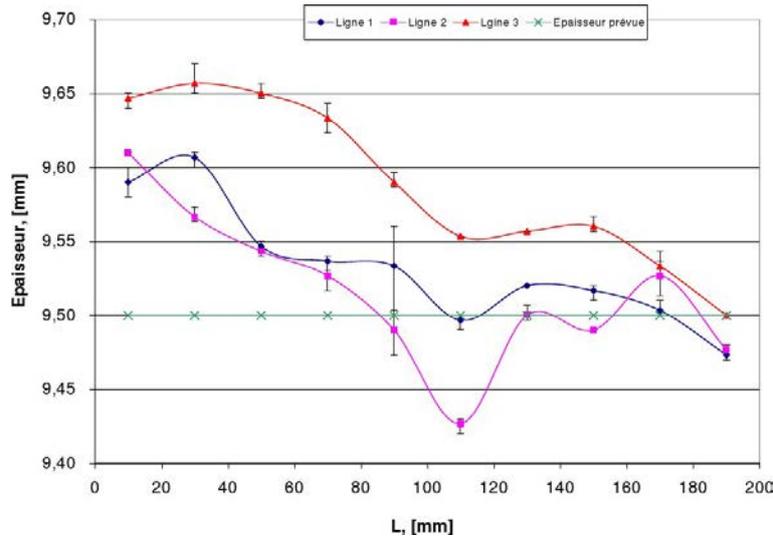


Figure 3 – Variation d'épaisseur de la pièce 2 (épaisseur considérée entre le Plan 2 et le Plan 4).

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 les résultats de la température et le degré de cuisson, comme données d'entrée, pour calculer la dilatation thermique (ou compression), le retrait chimique et les contraintes résiduelles [7].

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 ainsi que celles trouvées dans la littérature [4, 5]. Les paramètres se rapportent à la matrice ont deux états : l'état vitreux et l'état caoutchouteux. 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 :

$$T_g(\chi) = -30 + 220\chi \quad (1)$$

Avec  $\chi$  est le degré de cuisson.

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

### 3.1 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 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 appliquons les conditions aux limites différentes qui sont présentées sur la Figure 4 : les faces 1 et 1' sont bloquées suivant l'axe Z, la face 2 - suivant l'axe X et enfin 3 noeuds suivant les axe X et Y.

### 3.2 Résultats

Les simulations réalisées montrent que des contraintes résiduelles sont présentes dans la structure composite. Le degré de cuisson, à la fin du cycle, a la valeur 1, cela veut dire que la résine donc est totalement réticulée. La Figure 4 représente le profil final de la pièce 1 déformée, en comparaison avec le maillage initial. Nous constatons que la pièce se referme à la fin du cycle de cuisson, ainsi que la diminution d'épaisseur du maillage sur  $x=H$ .

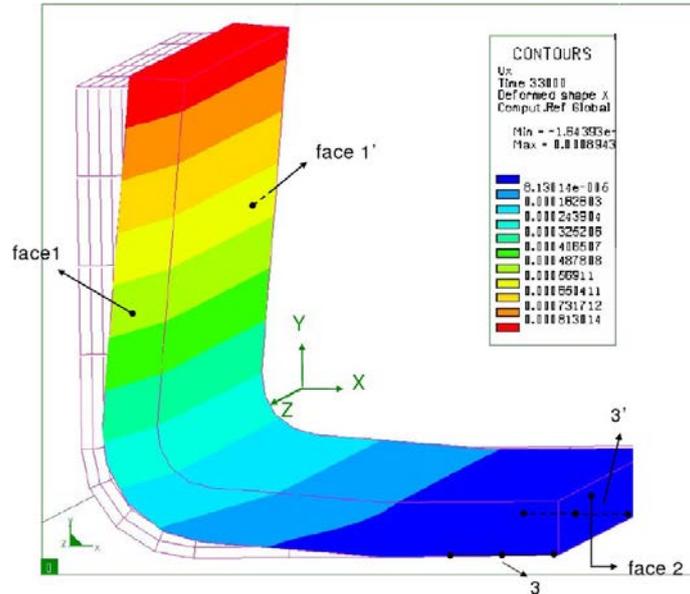


Figure 4 – Déplacement simulé suivant x à la fin du cycle de cuisson. Maillage déformé et initial.

Les variations angulaires prédites,  $\Delta\theta_\alpha$  et  $\Delta\theta_\beta$  sont différentes, 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  $\Delta\theta_\beta = 0,87$  et  $\Delta\theta_\alpha = 0,90$  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 de le long de la ligne 1 est de 9,53, de 9,53 pour la ligne 2 et de 9,52 pour la ligne 3. La simulation montre que l'épaisseur devient plus importante à la fin de cuisson (9,53 au lieu de 9,50 mm). 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, où bien par les conditions aux limites imposées.

## 4 Conclusions

Les résultats montrent que les variations angulaires ne sont pas identiques à l'intérieur et à l'extérieur de la pièce. Cette variation est de l'ordre d'un degré. Ces résultats sont cohérents avec la littérature. Le Tableau 2 est établi pour synthétiser et comparer des résultats expérimentaux et numériques.

**Variation d'angle** Les angles prédits et mesurés montrent la même tendance, mais pas les mêmes valeurs. Cette différence peut être expliquée par le manque de valeurs exactes de retrait

	Sim. 2	Exp. 2		Écart, [%]
$\Delta\theta_\alpha$	0,81	max min	1,34 1,04	35,75 17,08
$\Delta\theta_\beta$	0,84	max min	1,26 1,09	29,28 18,57
Épaisseur (Plan 2 - Plan 4)	9,53	max min	9,66 9,43	1,28 1,11
Épaisseur (Plan 1 - Plan 3)	9,53	max min	9,63 9,53	1,04 0,06

Tableau 2 – Écart entre la simulation 2 et l'expérience 2.

d'origine chimique (la valeur moyenne a été prise pour la première étude) et des coefficients de dilatation thermiques.

**Variation d'épaisseur** Les variations d'épaisseur ont été observées dans les expériences. Le modèle numérique n'est pas capable de démontrer visiblement ces variations, pour le moment.

## Références

- [1] S.R. White, H.T. Hahn. Process Modeling of Composite Materials : Residual Stress Development during cure. Part 1. Model formulation. *Journal of Composite Materials*, 26(16), 2402-2422, 1992.
- [2] P.K. Mallick. Fiber - Reinforced Composites : materials, manufacturing and design. New York : Marcel Dekker, Inc., Chapter 5, 1988.
- [3] L.K. Jain, M. Hou, L. Ye, Y.W. Mai. Spring-in study of the aileron rib manufactured from advanced thermoplastic composite. *Composite Part A*, 29(82), 973-979, 1998.
- [4] Hexcel Corporation. Composite carbon T300/epoxy 914, product properties, [www.hexcel.com](http://www.hexcel.com).
- [5] R. Prepin. Analyse des contraintes résiduelles de cuisson dans un composite carbone/époxy à plis croisés. *Thèse de Doctorat*, Institut National Polytechnique de Lorraine, 1989.
- [6] Q. Zhu, P.H. Geubelle, M. Li, C.L. Tucker. Dimensional accuracy of thermoset composite : Simulation of process-induced residual stresses. *Journal of composite materials*, 35(24), 2172-2204, 2001.
- [7] M. Svanberg, J.A. Holmberg. Predictions of Manufacturing Induced Shape Distortions. *PhD thesis*, Lulea University of Technology, Sweden, Paper C, 2002.