

Étude numérique et expérimentale des déformations résiduelles sur des plaques composite minces : prise en compte de l'interaction pièce/moule

Numerical and experimental study of residual deformations in thin composite plates : considering the part/mold interaction

Elias DELSOL¹⁻², Wiyao AZOTI¹, Bruno CASTANIE¹, Philippe OLIVIER¹ et Léon RATSIFANDRIHANA²

1 : Institut Clément Ader (ICA)

CNRS UMR 5312, INSA, ISAE-Supaéro, INSA, IMT Mines Albi, UPS

3 Rue Caroline Aigle, F-31400 Toulouse

e-mail : edelsol@insa-toulouse.fr, azoti@insa-toulouse.fr, castanie@insa-toulouse.fr et philippe.olivier@iut-tlse3.fr

2 : SEGULA TECHNOLOGIES

Immeuble EQUINOX, Bat-1, 24 Boulevard Déodat de Séverac, F-31770 Colomiers

e-mail : leon.ratsifandrihana@segula.fr

Résumé

La maîtrise des déformations résiduelles sur une pièce composite fabriquée en autoclave représente un enjeu scientifique et économique pour le secteur aéronautique. En effet, la cuisson d'une pièce composite est le siège de phénomènes multiphysiques à l'origine de déformations résiduelles. Cet article propose une étude expérimentale et numérique des déformations résiduelles sur des plaques composites minces. Les mesures expérimentales, réalisées par stéréo-corrélation d'images, permettent d'identifier les influences des principaux mécanismes en jeu. Différents modèles numériques sont évalués afin de déterminer leur capacité à prédire les déformations observées expérimentalement. Une méthode de simulation complète de la cuisson est développée afin de modéliser l'ensemble des phénomènes physiques, intégrant l'interaction pièce/moule. Les résultats obtenus mettent en évidence l'importance de cette dernière et soulignent des lacunes dans la prise en compte de ce mécanisme.

Abstract

The control of residual deformations in composite parts manufactured in an autoclave represents a significant scientific and economic challenge for the aerospace sector. Indeed, the curing process of a composite part involves multiphysical phenomena that lead to residual deformations. This paper presents an experimental and numerical study of residual deformations in thin composite plates. Experimental measurements, performed using stereo image correlation, identify the influence of the main mechanisms involved. Various numerical models are evaluated to assess their ability to predict the experimentally observed deformations. A comprehensive simulation of the curing process is implemented to model all physical phenomena, including the part/mold interaction. The results highlight the importance of this interaction and reveal gaps in how this mechanism is accounted for.

Mots Clés : Déformations résiduelles ; Virtual-manufacturing ; Warpage ; Interaction pièce/moule

Keywords : Process-Induced deformations ; Virtual-manufacturing ; Warpage ; Mold/part interaction

1. Introduction

Les matériaux composites jouent un rôle central dans l'industrie aéronautique, représentant près de 50 % de la masse d'un avion commercial moderne. Dans un marché concurrentiel marqué par une demande croissante, la réduction des délais et des coûts de fabrication constitue un enjeu majeur, en particulier pour les pièces de structure primaire en CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer). Pour relever ce défi, il est essentiel de réduire :

- le coût intrinsèque des moules,
- les non-conformités géométriques,

- le nombre d'itérations nécessaires pour obtenir la forme des moules.

Pour y parvenir, une meilleure maîtrise du procédé de fabrication et des mécanismes à l'origine des déformations résiduelles est essentielle [1]. Elle permet :

- d'envisager l'utilisation de matériaux plus économiques pour la fabrication des moules (comme le passage de l'INVAR à l'aluminium ou à l'acier),
- de développer une méthode de conception de moules compensés efficace,
- d'améliorer la maîtrise des non-conformités dimensionnelles.

Dans ce contexte, la création d'un outil de simulation numérique de la cuisson est primordiale, permettant la prédiction des déformations résiduelles. L'objectif de l'étude présentée ici est de développer une méthodologie de prédiction robuste prenant en compte les trois principaux mécanismes à l'origine des déformations résiduelles :

- la dilatation thermique différentielle [2],
- le retrait chimique de la résine [3],
- l'interaction pièce/moule [4].

À cet effet, une étude expérimentale des déformations résiduelles sur des plaques minces a été réalisée, suivie d'une étude numérique visant à développer l'outil de prédiction associé.

2. Étude expérimentale

2.1. Description de l'étude

Pour étudier expérimentalement les effets des mécanismes listés précédemment, deux types de plaques ont été fabriqués, chacune en quatre exemplaires afin d'évaluer la répétabilité. Les dimensions des plaques sont de 250 x 250 mm. Les drapages considérés sont $[0,90]_s$ et $[0,90,0,90]$.

Les plaques sont minces, l'épaisseur est de l'ordre de 0,72 mm, afin de limiter les gradients thermiques dans l'épaisseur, responsables de déformations résiduelles. De plus, lorsque le drapage est symétrique, le différentiel de dilatation thermique et le retrait chimique n'engendrent pas de déformations résiduelles. Par conséquent, la fabrication d'une version symétrique et d'une version asymétrique, constituées des mêmes plis, permet d'accéder directement à l'effet de l'interaction pièce/moule.

Les plaques sont cuites en autoclave suivant le cycle de cuisson recommandé par le fabricant du matériau. Le marouflage et les différents composants sont présentés sur la *Fig. 1* et le *Tab. 1*. Afin de maximiser l'effet de l'interaction pièce/moule, un moule en aluminium est utilisé.

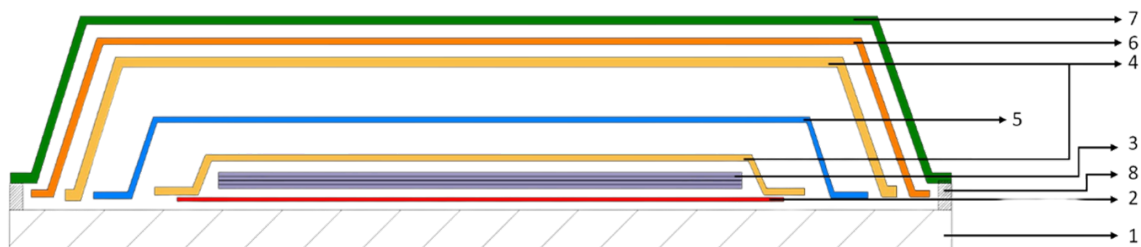


Fig. 1. : Marouflage

Référence	Désignation	Référence	Désignation
1	Moule en aluminium	2	Tissu d'arrachage
3	Pièce composite	4	Film démoulant perforé
5	Pli absorbant	6	Tissu de drainage
7	Poche à vide	8	Joint

Tab. 1. : Composants dans la poche à vide

2.2. Les déformations résiduelles

Les plaques étudiées étant très fines, l'utilisation des techniques traditionnelles de contrôle dimensionnel, telles que la mesure tridimensionnelle (MMT), n'est pas envisageable. En effet, une mesure par contact pourrait influencer les résultats [5] [6]. Dans ce contexte, la mesure par stéréo corrélation d'images a été choisie. Les déplacements hors-plan sont mesurés sur la surface en contact avec le moule.

Afin de prendre en compte les dispersions observées sur les plaques fabriquées, une équation de surface a été calculée à l'aide de la méthode des moindres carrés. Cette méthode permet de calculer la surface qui minimise les écarts entre les quatre surfaces obtenues expérimentalement. Les champs de déplacement interpolés sont présentés sur les Fig. 2 et Fig. 3. La planéité de la plaque asymétrique est de 10,2 mm, tandis que la version symétrique est de 2,6 mm. Ces résultats mettent en évidence que l'interaction pièce/moule joue un rôle significatif et ne peut être négligée.

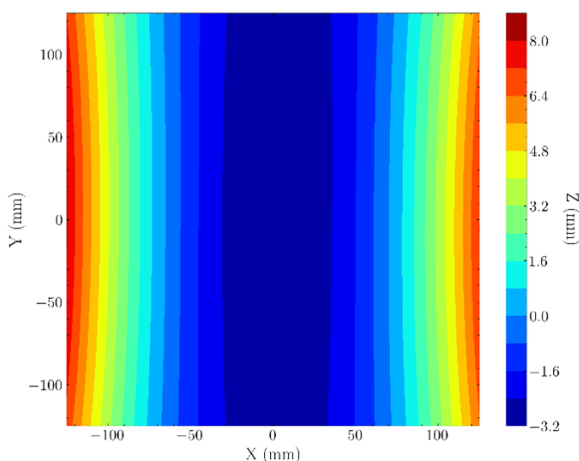


Fig. 2. : Déplacements hors-plan interpolés drapage [0,90,0,90]

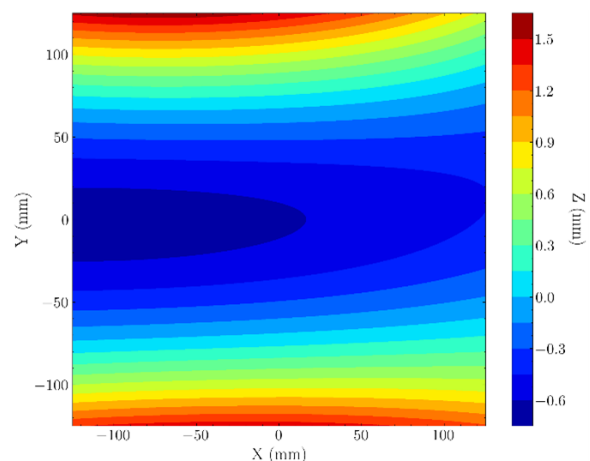


Fig. 3. : Déplacements hors-plan interpolés drapage [0,90,90,0]

La Fig. 2 montre que la plaque asymétrique présente une courbure principale autour de l'axe vertical, et une courbure secondaire, autour de l'axe horizontal, nettement inférieure. De plus, les plaques présentent une bi-stabilité caractéristique de ce type de drapage, déjà observée dans des travaux précédents [7]. On remarque, de plus, que la forme finale est différente de celle prédite par la théorie des stratifiés, puisque les deux courbures observées devraient avoir la même valeur absolue. Néanmoins, en sortie de cuisson, toutes les plaques asymétriques ont le même mode de déformation, correspondant à celui présenté.

3. Étude numérique

Pour comprendre les mécanismes en jeu et leurs influences respectives, deux types de modélisation sont considérés :

- une simulation de la phase de refroidissement, durant laquelle la majorité des contraintes résiduelles se forment,
- une modélisation de la cuisson, en négligeant l'effet du gradient thermique (l'épaisseur de la plaque est de l'ordre de 0,72 mm).

3.1. Modélisation éléments-finis

La modélisation reproduit, en partie, le marouflage présenté en *Fig. 1*. Aussi, trois composants sont pris en compte afin de modéliser l'interaction pièce/moule : le moule en aluminium, le tissu d'arrachage, la plaque composite.

Le contact entre le tissu d'arrachage et le moule est modélisé avec un frottement, tandis que le tissu d'arrachage est supposé collé à la plaque composite. Le cycle de cuisson est appliqué au modèle entier, il n'y a donc pas de résolution du problème en thermique. La pression de l'autoclave, de 0,7 MPa, est appliquée sur la plaque composite. Les caractéristiques des matériaux sont issues des publications [8] [9] : le durcissement de la résine est modélisé par modèle de CHILE (Cure Hardening Induced Linear Elastic) simple.

Pendant la cuisson, le moule est mis en position de manière isostatique (*Fig. 4*). D'une manière analogue, lors du démoulage de la plaque composite, celle-ci est mise en position de manière isostatique afin de ne pas influencer les champs de contraintes. Une correction du champ de déplacement (changement de base de référence) est faite pour la comparaison avec les valeurs expérimentales. Les non-linéarités géométriques, discutées précédemment, sont prises en compte et des éléments de type C3D20 sont utilisés (*Fig. 5*).

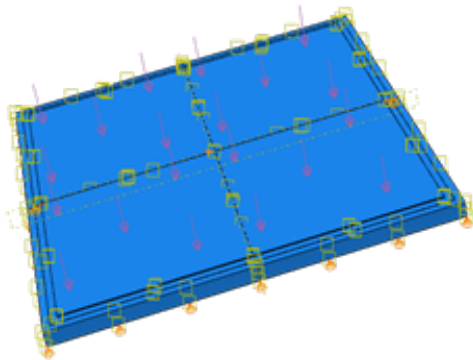


Fig. 4. : Conditions limites pendant la cuisson

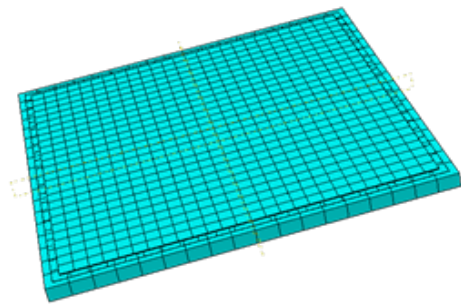


Fig. 5. : Maillage de l'assemblage

3.2. Simulation de refroidissement seul

Un premier type de modélisation, considérant le comportement thermoélastique de la plaque composite durant la phase de refroidissement, a été étudié. À l'état initial, la plaque est supposée sans contraintes résiduelles et à une température correspondant au dernier palier du cycle de cuisson (180°C). Les caractéristiques du matériau à l'état vitreux sont utilisées, et un refroidissement jusqu'à 22°C est appliqué.

Les déplacements hors-plan obtenus sont présentés sur la *Fig. 6*. Le mode de déformation est celui observé expérimentalement. Toutefois, la différence constatée provient du fait que, lors de la mesure par DIC, la plaque a été retournée pour contrôler la face en contact avec le moule. La flèche maximale prédite est de 11,4 mm, ce qui correspond à une surestimation de 11 % par rapport aux résultats expérimentaux.

Par ailleurs, une étude paramétrique visant à évaluer l'influence des caractéristiques de l'interaction pièce/moule, montre que cette interaction n'a pas d'impact sur la prédiction. Dans ce type de modèle, l'interaction pièce/moule ne génère donc pas de contraintes résiduelles. Cette observation est confirmée par la réalisation d'une étude similaire sur la plaque symétrique, car il n'y a pas de déformations prédites. Par conséquent, seules les contraintes issues de la dilatation thermique différentielle sont considérées.

3.3. Simulation numérique de la cuisson

L'analyse précédente montre que la modélisation thermoélastique proposée de la phase de refroidissement ne permet pas de prendre en compte l'effet de l'interaction pièce/moule, ainsi que le retrait chimique de la résine. De plus, la surestimation des déformations résiduelles suggère que :

- l'interaction pièce/moule s'oppose aux effets du retrait chimique et de la dilatation thermique,
- l'effet de la dilatation thermique est surestimé.

Par conséquent, un modèle de simulation numérique de la cuisson, basé sur les outils précédemment développés par l'Institut Clément Ader [5] [6], a été développé. Il repose sur deux sous-routines UMAT et UEXPAN, permettant de modéliser le durcissement de la résine, l'évolution des coefficients de dilatation thermique du matériau et le retrait chimique de la résine. Le reste du modèle est identique au précédent, à l'exception du cycle de cuisson qui est considéré dans son intégralité.

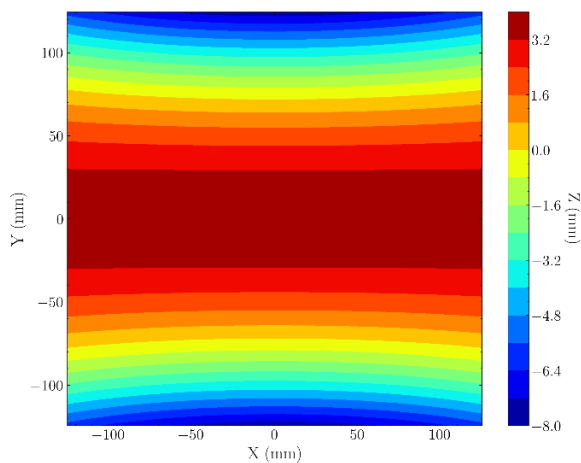


Fig. 6. : Déplacements hors-plan interpolés drapage $[0,90,0,90]$ avec modèle thermoélastique

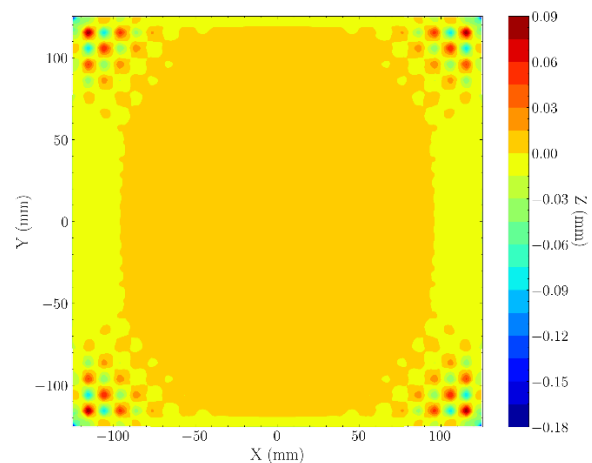


Fig. 7. : Déplacements hors-plan drapage $[0,90]_s$ avec modèle complet et un coefficient de frottement de 1

Concernant le drapage asymétrique, une première simulation avec un coefficient de frottement nul donne une flèche maximale de 13,4 mm. L'erreur de prédiction augmente par rapport au modèle précédent, avec une planéité plus élevée. Ce résultat n'est pas surprenant dans la mesure où le retrait chimique s'ajoute à l'effet de la dilatation thermique. De plus, les contraintes liées à l'interaction pièce/moule proviennent uniquement de la contribution du tissu d'arrachage.

Une augmentation du coefficient de frottement permet une réduction de la planéité prédite. Lorsque le coefficient de frottement est égal à 1, la planéité est de 12,4 mm. Toutefois, la prise en compte de cette interaction n'est pas satisfaisante, et paradoxalement, un modèle thermoélastique simple permet une meilleure prédiction.

Les simulations effectuées sur la plaque avec un drapage symétrique confirment l'observation précédente. La Fig. 7 montre que le mécanisme associé à l'interaction pièce/moule n'est pas capté par le modèle. Des investigations complémentaires doivent être menées pour mieux comprendre les paramètres qui pilotent ce mécanisme.

4. Conclusion

La fabrication de plaques composites minces avec un drapage symétrique et asymétrique a permis de constituer une base de données expérimentales pour analyser les principaux mécanismes responsables des déformations résiduelles. La plaque asymétrique présente des non-linéarités géométriques qui entraînent une bi-stabilité et une forme différente de celle prédite par la théorie des stratifiés. La plaque symétrique est caractérisée par une planéité élevée, malgré le fait que seule l'interaction pièce/moule est à l'origine des déformations observées.

Ces données expérimentales ont permis l'évaluation de deux catégories de modèles numériques. Le modèle thermoélastique, permet une bonne prédiction sur la plaque asymétrique, bien que celle-ci doit être nuancée par l'aspect restrictif du modèle. D'ailleurs, ce modèle ne permet pas de représenter le stockage de contraintes associé à l'interaction de frottement pièce/moule.

Une modélisation de la cuisson dans son intégralité, bien que plus complexe, ne permet pas une prise en compte suffisante de l'interaction pièce/moule. Par conséquent, des investigations complémentaires sont nécessaires. Il s'agira d'analyser les paramètres influents sur ce type de modèle basé sur le modèle de CHILE, dans l'objectif de capter l'effet de cette interaction.

Références

- [1] E. Kappel « Forced-interaction and spring-in-relevant initiators of process-induced distortions in composite manufacturing », *Composite Structures* Vol. 140, pp. 217–229, 2016.
- [2] M. R. Wisnom, M. Gigliotti, N. Ersoy, M. Campbell, K. D. Potter « Mechanisms generating residual stresses and distortion during manufacture of polymer–matrix composite structures », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* Vol. 37 n° 4, pp. 522–529, 2006.
- [3] C. Li, K. Potter, M. R. Wisnom, G. Stringer « In-situ measurement of chemical shrinkage of MY750 epoxy resin by a novel gravimetric method », *Composites Science and Technology* Vol. 64 n° 1, pp. 55–64, 2004.
- [4] G. Twigg, A. Poursartip, G. Fernlund « Tool–part interaction in composites processing. Part I : experimental investigation and analytical model », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* Vol. 35 n° 1, pp. 121–133, 2004.
- [5] L. Moretti, B. Castanié, G. Bernhart, P. Olivier « Characterization and modelling of cure-dependent properties and strains during composites manufacturing », *Journal of composite materials* Vol. 54 n° 22, pp. 3109–3124, 2020.
- [6] L. Moretti, P. Olivier, B. Castanié, G. Bernhart « Experimental study and in-situ FBG monitoring of process-induced strains during autoclave co-curing, co-bonding and secondary bonding of composite laminates », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* Vol. 142, pp. 106224, 2021.
- [7] M. Gigliotti, M. R. Wisnom, K. D. Potter « Loss of bifurcation and multiple shapes of thin [0/90] unsymmetric composite plates subject to thermal stress », *Composites Science and Technology* Vol. 64 n° 1, pp. 109–128, 2004.
- [8] N. Ersoy, T. Garstka, K. Potter, M. R. Wisnom, D. Porter, M. Clegg, G. Stringer « Development of the properties of a carbon fibre reinforced thermosetting composite through cure », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* Vol. 41 n° 3, pp. 401–409, 2010.
- [9] B. Castanié, L. Arnon, P. Olivier « Effect of release agent on process-induced deformation in autoclave curing of laminate composites », in : 20th European Conference on Composite Materials (ECCM20),, , pp. 8–p, 2022.