

Caractérisation des interactions « pièce-processus-ressources » en mise en forme de matériaux composites en vue de la maîtrise dimensionnelle de la pièce

H.-F. PERRIN, A. D'ACUNTO, P. MARTIN

Laboratoire de Conception Fabrication Commande (LCFC), Arts et Métiers ParisTech Centre de Metz, 6 rue Augustin Fresnel, 57000 Metz (France)

Résumé :

L'industrialisation des nouveaux procédés de mise en forme de matériaux composites à hautes performances requiert la prise en compte des interactions pièce-processus-ressources pour une meilleure maîtrise dimensionnelle de pièces produites. Cette étude porte sur la mise en forme de pièces de haute performance par procédé de transfert de résine. Nous proposons une méthode permettant la caractérisation des interactions produit-processus-ressources induisant un transfert de contraintes dans la pièce. Cette démarche doit permettre une optimisation du couple processus-ressources afin de minimiser voire supprimer les déformations induites au cours de la fabrication.

Abstract :

High performance composite part manufacturing by new moulding processes need to allow for the product-process-resources interactions to the dimensional control of the manufactured part. These interactions are accountable for stress transfer during the resin cure and induce after demoulding shape distortions. This study offers an experimental method applied for Liquid Composite Moulding (LCM) processes for interactions characterisation. The proposed approach can be used to develop a method for suppression/minimization of the induced deformations during the manufacturing.

Mots clefs: interaction produit processus ressources, transfert de résine, infusion, fidélité dimensionnelle

1 Introduction

Les procédés de transferts de résine liquide dit LCM (Liquid Composite Molding) sont de plus en plus usités pour des applications de hautes performances tel que l'aéronautique. Les pièces aéronautiques deviennent de plus en plus grandes et intègrent un nombre toujours croissant de fonctions. Bien que la qualité structurale des pièces composites reste le critère primordial pour des pièces de hautes performances, la qualité géométrique, également appelée fidélité dimensionnelle, représente un verrou lors de la conception.

La connaissance des paramètres d'industrialisation ainsi que de leurs influences sur la géométrie de la pièce produite permet d'éviter la coûteuse méthode de correction outillage par essai-erreur ou un choix de paramètres d'industrialisation surnuméraires.

Des matériaux à faibles coefficients de dilatation thermique sont parfois présentés comme une solution pour réduire les déformations. Dans le cadre de cette étude, ils ne feront pas l'objet d'étude plus approfondie car le coût et les limitations d'approvisionnement représentent des contraintes industriellement insatisfaisantes.

Lors de la mise en forme de matériaux composites à matrice thermodurcissable, l'élévation de la température pour la réticulation de la résine engendre de manière directe ou indirecte des contraintes résiduelles. Elles créent lors du démoulage une distorsion de la pièce produite. Différents mécanismes induisant des déformations prédominent en fonction des propriétés intrinsèques de la pièce. Dans le cas de pièce monolithique de faible épaisseur constituée de plis symétriques et équilibrés les interactions entre la pièce et l'outillage ainsi que les

renfermements d'angle (spring-in) sont les mécanismes moteurs identifiés pour les procédés pré imprégné-autoclave [1].

Le mécanisme de type interaction pièce-outillage résulte d'interactions produits-procédé-processus-ressources. Lors du processus de mise en forme, l'outillage se dilate concomitamment avec les variations de température nécessaires à la cuisson de la résine (Cf. FIG. 1-A). La pièce composite se déforme d'un facteur de 10 à 20 fois moins qu'un outillage conventionnel en acier ou aluminium. Ainsi, le mouvement relatif pièce-outillage résultant, entraîne un transfert de contrainte responsable de phénomène de gauchissement de la pièce composite.

Les phénomènes de renfermement d'angle peuvent s'expliquer par l'anisotropie des coefficients de dilatation thermique ainsi que des propriétés de réticulation de la pièce composite (Cf. FIG. 1-B). [2] Les paramètres conduisant ces mécanismes sont par définition intrinsèques. Les résultats expérimentaux présents dans la littérature présentent une dépendance avec des paramètres extrinsèques comme le matériau d'outillage, ou les conditions de surface. [2]; [3]. Plusieurs mécanismes de déformation peuvent interagir au cours de la fabrication d'une pièce.

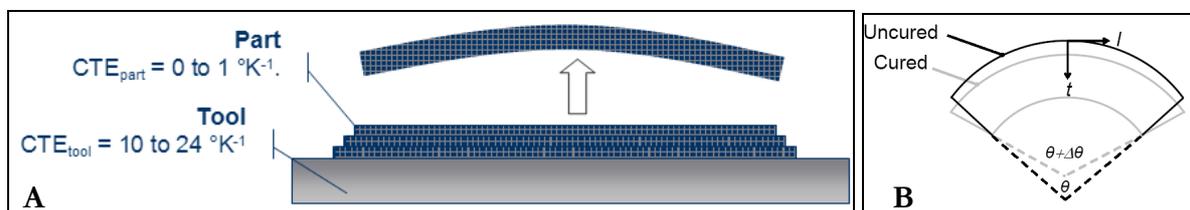


FIG. 1 –A Représentation schématique du mécanisme d'interaction pièce-outillage

B – Explication géométrique renfermement d'angle [1]

De l'isolement de chaque mécanisme de déformations dépend l'élaboration de modèle de prédiction limitant les méthodes essai-erreur. Les modèles de prédiction [4];[5] ont été élaborés pour les procédés de prépreg-autoclave et leur spécificités. Les méthodes développées peuvent être en parti transposées aux procédés de transfert de résine. Leurs spécificités nécessitent par ailleurs une étude expérimentale préalable.

Les procédés de mise en forme pré-imprégné-autoclave consiste en la consolidation et la polymérisation de renforts pré-imprégné de résine dans une enceinte tempérée (jusqu'à 180°C) et pressurisée (7 bars).

L'infusion dit LRI (Liquid Resin Infusion) consiste en l'imprégnation transverse d'un renfort fibreux sec par une résine liquide sous l'action d'une dépression. L'imprégnation transverse est réalisée par l'ajout d'un média de distribution facilitant l'écoulement de la résine par rapport au tissu sec. Ces procédés s'affranchissent de l'utilisation d'enceintes pressurisées. La mise en œuvre de part les produits et les ressources utilisés est moins restrictive permettant le développement de nouvelles méthodes de caractérisation.

L'issue de ce sujet est de développer une démarche d'industrialisation de pièce composite aéronautique. L'anticipation du comportement de la pièce et du procédé doit permettre une maîtrise du couple fidélité dimensionnelle-outillage et ainsi réduire les coûts.

2 Méthodes de caractérisation de l'interaction pièce-outillage

Des études récentes ont développé des outillages instrumentés afin de mesurer les interactions pièces-outillages. La méthode, mise au point [6], permet de quantifier les interactions entre la pièce et l'outillage par le biais de jauge de contrainte disposée sur un feuillet mince d'aluminium recouvrant la pièce composite. Cette méthode est cependant limitée par sa sensibilité. Les contraintes dues à l'interaction pièce-outillage ne représentant qu'un

faible ratio des contraintes mesurées sur la surface externe de la pièce.

Des méthodes plus directes ont été développées et consistent à noyer dans la pièce composite un capteur permettant la mesure de contrainte. Nous pourrions citer les travaux de Kim et Daniel [7] qui ont mesuré les contraintes dans la pièce composite en insérant dans celle-ci un capteur à fibre optique ainsi qu'une jauge de contrainte à résistance électrique.

Les méthodes citées précédemment permettent une meilleure compréhension des phénomènes d'interactions pièce-outillage et des contraintes induites dans la pièce. Afin de pouvoir mieux comprendre le comportement de l'interface pièce outillage, [8] proposent une méthode expérimentale permettant la mesure des contraintes de cisaillement directement à l'interface et dans des conditions opératoires reproduites en termes de pression et de température.

L'ensemble de ces méthodes a été appliqué pour les procédés de préimprégné-autoclave. Leur mise en œuvre est rendue possible par la consistance même du tissu préimprégné. Leurs transpositions vers des procédés de transferts de résine restent donc assez limitées.

La méthode proposée [8] se concentre sur les interactions pièce-outillage à l'interface. Les spécificités de l'infusion ainsi que le degré de complexité géométrique réalisable par ces procédés peuvent entraîner d'autres types d'interactions. Celles-ci peuvent jouer un rôle significatif sur la déformation de la pièce après démoulage.

3 Identification des paramètres d'industrialisation en LRI

3.1 Interaction pièce outillage en cisaillement

Les différents paramètres influant sur la déformation de type gauchissement due à l'interaction pièce outillage ont fait l'objet de plusieurs travaux de recherches expérimentales [9],[10]. Il en ressort que ce mécanisme de déformation est conduit tant par des paramètres intrinsèques que extrinsèques. Le design, l'empilement, les dimensions de la pièce peuvent impacter fortement l'ampleur de la déformation. Les propriétés de l'interface résultant de la qualité de surface de l'outillage et de la nature du produit de démoulage utilisé déterminent le niveau de contraintes transmis à la pièce. Il est également à noter que le cycle de polymérisation, par la présence ou non de palier de maintien, détermine le niveau de contrainte emprisonné dans la pièce pendant les phases de montée en température (Cf. FIG 2).

3.2 Interaction pièce-outillage en compression

Le différentiel de coefficients de dilatation entre la pièce et l'outillage peut être la source d'un transfert de contrainte de compression. La pièce composite prend sa forme à haute température lorsque la résine se fige. A cet état l'outillage est dilaté. Lors du refroidissement, l'outillage se rétracte et peut engendrer un blocage géométrique de la pièce dans l'outillage (Cf. FIG 2).

Les blocages géométriques engendrent des distorsions de pièces ainsi que de difficultés de démoulage voir même des fissurations de la matrice.

3.3 Interaction pièce-équipements d'infusion

Produits caractéristiques de procédés d'infusion, les médias de distribution intercalés avec un tissu de délaminage, permettent une imprégnation transverse de pièce grâce à la seule action du vide.

L'ensemble hétérogène ainsi formé se compose de renforts fibreux imprégnés de résine et d'une couche de résine non renforcée. Il a été montré [11] que des zones riches en résine pouvaient représenter une source de

déformation significative. La résine se rétracte au cours de sa polymérisation. L'évolution du retrait dépend des paramètres caractéristiques du cycle de cuisson.

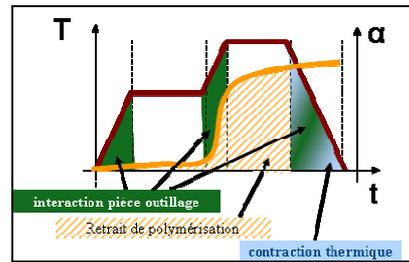


FIG. 2 – Sources de transfert de contrainte en fonction du cycle de polymérisation

3.4 Paramètres d'industrialisation produits-processus-ressources pour l'infusion

Les paramètres d'industrialisation jouant un rôle significatif dans les différents mécanismes de déformations évoqués ont été ordonnés dans un tableau (Cf. FIG 3).

	processus	ressources	produit
interaction pièce-outillage en cisaillement	cinétiques de montée en température cinétiques de descente en température température de moulage température de démoulage pression de vide	matériaux d'outillage état de surface outillage traitement de surface outillage film d'interface	dimensions film technique type de renfort
interaction pièce-outillage en compression	paliers de température	blocage géométrique latéral blocage géométrique de surface matériaux d'outillage	dimensions
interaction pièce-équipements d'infusion	cinétiques de montée en température cinétiques de descente en température paliers de température pression de vide	type de média de distribution épaisseur du média de distribution tissu de délaminage	dimensions type de renfort

FIG. 3 – Paramètres d'industrialisation en fonction des différents mécanismes de déformations

4 Dispositifs expérimentaux : résultats et discussions

Les contraintes résiduelles induites par les différentes interactions apparaissent à différentes échelles, à l'interface fibre-matrice, entre les plis ainsi qu'à l'échelle de la structure de la pièce. Une analyse expérimentale multi-échelles doit permettre d'étendre la connaissance des mécanismes de déformation.

Nos travaux proposent une méthodologie expérimentale permettant la quantification de l'influence de paramètres d'industrialisation. Elle permet de déterminer dans un premier temps le niveau de contrainte transmise au cours du processus de mise en forme de matériaux composite par transfert de résine. Elle rend possible dans un second temps la détermination des relations entre les niveaux de contraintes transmises dans la pièce et la déformée de la pièce résultante. Deux dispositifs expérimentaux ont été conçus, réalisés et mis au point afin de répondre à ces objectifs.

4.1 Caractérisation des interfaces

Le dispositif expérimental (Cf. FIG 4-A) permettant la caractérisation des propriétés aux interfaces reproduit le mouvement relatif entre la pièce et l'outillage dû au différentiel de coefficient de dilatation thermique, ainsi que le mouvement relatif entre les équipements d'infusion et la pièce.

Les renforts fibreux secs sont déposés dans une empreinte dont l'épaisseur correspond au taux de fibre souhaité. La résine est infusée dans l'outillage au moyen d'un système de dépression. La lame mobile représente l'outillage de moulage. Ces conditions de fabrication et son traitement de surface suivent des procédures identiques aux

outillages de fabrication. Ainsi, les paramètres d'industrialisation de l'outillage et de ses conditions de surfaces peuvent être évalués. Le dispositif expérimental est installé dans une machine de traction conventionnelle. Le pilotage du déplacement de la lame mobile s'effectue en fonction de l'évolution de la température. L'effort de cisaillement est mesuré tout au long du cycle de polymérisation. La modification de la vitesse de déplacement de la lame mobile permet de quantifier le niveau de contrainte transmis à différents positions de la pièce.

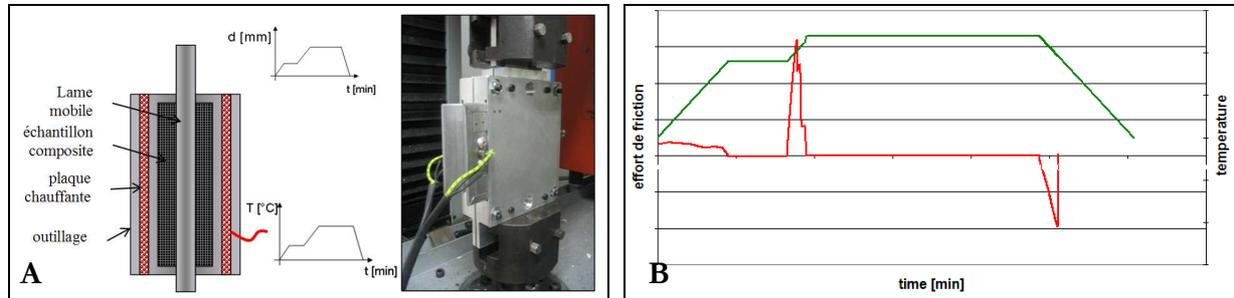


FIG. 4 – A-Dispositif expérimental pour l'analyse des interfaces pièce-outillage

B- Exemple de résultat : effort de friction en fonction du cycle de polymérisation

Il est à noter que l'emploi d'un contre-moule rigide ne permet pas de reproduire la pression pouvant être exercée par un contre-moule souple sous l'action de la dépression. L'importance de ce paramètre devra être évaluée.

Ce dispositif permet de comparer l'influence de paramètres d'industrialisation sur le niveau de transfert de contrainte (Cf. FIG 4-B).

4.2 Caractérisation de la déformée

Une méthode expérimentale complémentaire à celle présentée ci-dessus a été mise au point. Elle permet d'observer sur une plaque plane les phénomènes résultants des interactions en une dimension à une échelle macroscopique.

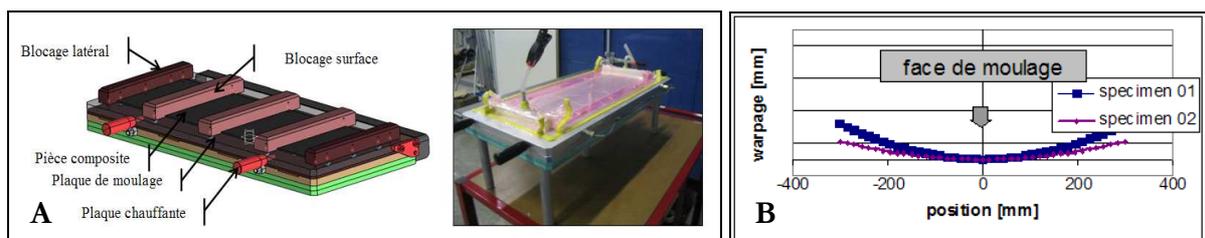


FIG. 5 –A-Dispositif expérimental pour l'analyse des gauchissements

B- Exemple de déformées obtenues sur l'outillage d'expertise

Une plaque mobile libre repose sur une table chauffante (Cf. FIG 5-A). Différents matériaux d'outillage, ainsi que différentes conditions de surface peuvent être reproduits. Sur cette plaque se fixe différents blocages. Les variations de mise en œuvre ainsi que la possibilité de créer différents types de blocage rendent possible l'isolement des différents types d'interactions.

La figure 5-B montrent la déformée de deux plaques dont les paramètres du processus ont été modifiés.

5 Conclusion

Les mécanismes sont présents à différentes échelles dans une pièce et se couplent. Il en résulte des comportements complexes et difficilement analysables. Afin de répondre aux objectifs fixés, ces différents mécanismes doivent pouvoir être isolés des autres mécanismes. Deux outillages spécifiques ont été développés dans le but de répondre aux problèmes liés à l'interaction pièce-outillage. L'un traite de l'étude de l'interface pièce-outillage à une échelle mésoscopique, l'autre permet l'étude d'un comportement de cette interface à une échelle macroscopique. Cette analyse multi-échelle au cours du cycle de polymérisation permet l'amélioration de la compréhension du mécanisme, et l'expérimentation de solution permettant sa suppression /réduction. Elle permet également d'accumuler des paramètres expérimentaux tels que les contraintes de cisaillement transmises tout au long du cycle de polymérisation ainsi que la déformée résultante essentielle pour la mise au point d'un modèle simulant le mécanisme d'interaction pièce-outillage. Ces résultats permettront par la suite d'isoler le phénomène de spring-in et de développer un modèle de prédiction plus fiable.

6 Remerciements

Les travaux rapportés ici font partie du projet CAPSAIRTM, soutenue par la DGE et labélisé par le pôle de compétitivité MIPI. Les auteurs souhaitent remercier les partenaires du projet : SLCA-Groupe SAFRAN ; PPE et Ateliers CINI pour leurs contributions à ces travaux de recherches.

Références

- [1] G. Fernlund and Al.; Residual stress, Spring-in and warpage in autoclaved composite parts; Department of Metals and Materials Engineering, The University of British Columbia; 309-6350 Stores Rd., Vancouver, V6T 1Z4, Canada
- [2] C. Albert, G. Fernlund; Spring-in and warpage of angled composite laminates *Composites Science and Technology* 62 (2002) 1895–1912
- [3] David A. Darrow and Al. Isolating Components of Processing Induced Warpage in Laminated Composites; *Journal of Composite Materials* 2002; 36; 2407
- [4] JM. Svanberg, J.A. Holmberg; Prediction of shape distortions; Part II. Experimental validation and analysis of boundary conditions; *Composites: Part A* 35 (2004) 723–734
- [5] G. Fernlund and Al.; Finite element based prediction of process-induced deformation of autoclaved composite structures using 2D process analysis and 3D structural analysis; *Composite Structures* 62 (2003) 223–234
- [6] Twigg G, Poursartip A, Fernlund G. ; An experimental method for quantifying tool–part shear interaction during composites processing. *Compos Sci Technol* 2003;63:1985–2002.
- [7] Kim YK, Daniel IM. Cure cycle effect on composite structures manufactured by resin transfer molding; *J Compos Mater* 2002; 36(14).
- [8] N. Ersoy et al.; An experimental method to study the frictional processes during composites manufacturing; *Composites: Part A* 36 (2005) 1536–1544
- [9] Xiaokai N.; Process induced residual stresses and dimensional distortions, Dissertation, University of Florida, 1999
- [10] G. Twigg, A. Poursartip, G. Fernlund; Tool–part interaction in composites processing; Part I: experimental investigation and analytical model; *Composites Group, Department of Metals and Materials Engineering, The University of British Columbia, Composites: Part A* March 2003, pp121–133
- [11] Wiersma and Al.; Prediction of springforward in continuous –fiber/polymer L-shaped, *Composite Part A: Applied Science and Manufacturing*; 1998 29A 1333-1342