



HAL
open science

Simulation de la reconsolidation et de la mise en forme des thermoplastiques

Damien Soulat, Majed Youssef, Philippe Boissé

► **To cite this version:**

Damien Soulat, Majed Youssef, Philippe Boissé. Simulation de la reconsolidation et de la mise en forme des thermoplastiques. 17e Congrès Français de Mécanique, Aug 2005, Troyes, France. hal-00020643

HAL Id: hal-00020643

<https://hal.science/hal-00020643>

Submitted on 8 May 2023

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 de la reconsolidation et de la mise en forme des thermoplastiques.

Damien Soulat *, Majed Youssef *, Philippe Boisse **

*LMSP UMR 8106 CNRS ENSAM - Université d'Orléans, Polytech'Orléans,

8 rue Léonard de Vinci, 45072 Orléans.

**LaMCoS UMR 5514 CNRS – INSA Lyon ; INSA Lyon,

Bat. J. Jacquard, 27 avenue Jean capelle 69621 Villeurbanne.

Résumé :

Un des principaux avantages de l'utilisation des composites à fibres continues et à matrice thermoplastique est que leur cycle de mise en forme est plus court notamment vis-à-vis des matrices thermodurcissables. Afin de développer des outils de simulation de ce procédé on se propose dans ce papier de décrire les mécanismes de déformations et de s'intéresser à l'étape de reconsolidation qui est nécessaire à la récupération des porosités en fin de cycle comme le montre les micrographies présentées. Pour simuler numériquement cette étape un élément de coque à pincement est développé et implémenté dans une approche en dynamique explicite.

Abstract :

One of the main advantages of the use of the composites with continuous fibres and thermoplastic matrix is that their forming process cycle is shorter. In order to develop tools for simulation of this process one proposes in this paper to describe the mechanisms of deformations and to be interested at the stage of reconsolidation which is necessary to close porosities at the end of the cycle as shows it micrographies presented. To simulate this stage numerically a shell element with pinching is developed and implemented in an explicit dynamics approach .

Mots clefs :

Mise en forme, composite thermoplastique, élément de coque.

1 Introduction

Les matériaux composites à fibres continues et matrices thermoplastiques (CFRTP) sont en plein essor et présentent une alternative prometteuse notamment par rapport aux matrices thermodurcissables [1], [2]. Leur emploi augmente dans la fabrication de nouveaux modèles d'avions en particulier dans les programmes A340/500-600. Leur principal avantage réside dans la durée du cycle de fabrication qui est plus court pour un matériau à propriétés mécaniques équivalentes si ce n'est supérieures. Par ailleurs le stockage, le recyclage et la maintenance sont plus aisées. Après une étape de chauffage, pour atteindre un état suffisamment fluide de la résine (Figure 1.1), la mise en forme est réalisée par un poinçon et une matrice associés en général à un élastomère sur cette matrice (Figure 1.2). Finalement une pression est maintenue sur le poinçon lors de l'étape de reconsolidation (Figure 1.3) afin d'éviter la présence de porosités entre les plis. Cette dernière étape est essentielle car les critères de qualités affectés aux structures en aéronautique sont très sévères. On s'intéresse dans ce papier à l'étude expérimentale et à la simulation de l'étape de

reconsolidation. L'évolution des porosités sera examinée grâce aux micrographies réalisées à différents états lors du cycle de fabrication. Elles montrent l'importance des porosités qui disparaîtront lors de l'étape de reconsolidation. L'analyse élément fini est réalisée en modélisant chaque pli avec des éléments de coques en contact visqueux entre eux, de sorte à autoriser le glissement. Concernant la reconsolidation, les porosités disparaissent si une contrainte normale et suffisante est appliquée au pli. A cet effet un élément de coque disposant d'un degré de liberté supplémentaire, la déformation dans l'épaisseur, est introduit. La composante de contrainte associée étant non-nulle, ce type d'élément peut décrire correctement la compression lors de cette phase de reconsolidation. Des exemples de simulation de la mise en forme et de cette étape de reconsolidation seront présentés dans le cas de profils en Z

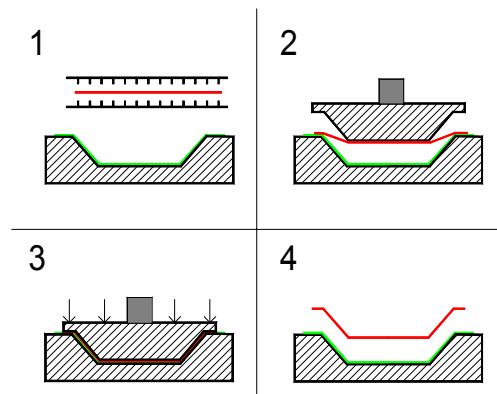


FIG 1. Etapes de la mise en forme des CFRTP- 1:Chauffage -2 : Mise en forme avec poinçon-matrice -3 :Etape de reconsolidation -4 : Retrait des outils

2 Simulation du procédé de mise en forme

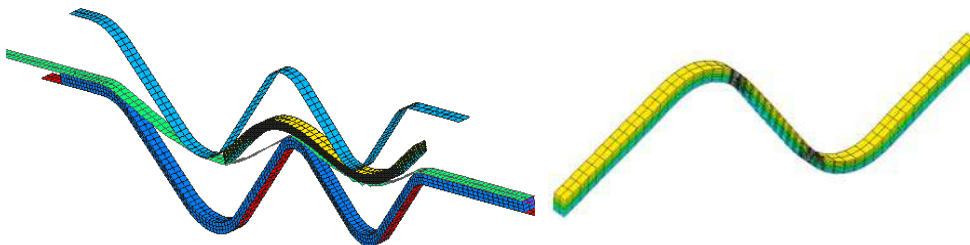


FIG 2. 1Simulation de l'étape de mise en forme. 2 Déformée finale

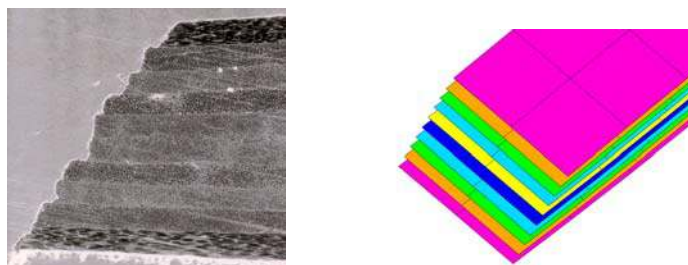


FIG 3. Glissement inter-ply 1. Expérimental. 2 Calculé

La simulation est réalisée avec le logiciel de simulation de mise en forme des composites PAM-FORM [3]. A chaque cycle de temps, le vecteur des accélérations nodales est obtenue par résolution de l'équation discrétisée du mouvement soit à t_n :

$$\mathbf{M}\mathbf{a}_n + \mathbf{F}^{\text{int}}(\mathbf{u}_n) = \mathbf{F}^{\text{ext}} \quad (1)$$

avec \mathbf{M} la matrice masse, \mathbf{F}^{int} et \mathbf{F}^{ext} les vecteurs des efforts intérieurs et extérieurs tels que :

$$\mathbf{M} = A \int_{\Omega^e} \mathbf{N}^t \mathbf{N} p dV, \quad \mathbf{F}^{\text{int}} = A \int_{\Omega^e} \mathbf{B}^t \boldsymbol{\sigma} dV, \quad \mathbf{F}^{\text{ext}} = A \int_{\Omega^e} \mathbf{N}^t \bar{\mathbf{f}} dV + A \int_{\Gamma^e} \mathbf{N}^t \bar{\mathbf{t}} dV \quad (2)$$

\mathbf{N} et \mathbf{B} sont les matrices des fonctions de base et d'interpolation des déformations, A l'opérateur d'assemblage, $\boldsymbol{\sigma}$ les contraintes de Cauchy, $\bar{\mathbf{f}}$ et $\bar{\mathbf{t}}$ les vecteurs des efforts extérieurs de surface et volume. Un schéma explicite est utilisé pour calculer le déplacement \mathbf{u}_{n+1} :

$$\mathbf{a}_n = \mathbf{M}^{-1} [\mathbf{F}_n^{\text{ext}} - \mathbf{F}^{\text{int}}(\mathbf{u}_n)], \quad \mathbf{v}_{n+1/2} = \mathbf{v}_{n-1/2} + \Delta t \mathbf{a}_n, \quad \mathbf{u}_{n+1} = \mathbf{u}_n + \Delta t \mathbf{v}_{n+1/2} \quad (3)$$

Par conséquent il n'est pas nécessaire de résoudre un système d'équations, et la méthode est très économique. Par contre le pas de temps doit satisfaire des conditions de stabilité liées à la taille des éléments et aux données matériaux [4]. Ce schéma de résolution en dynamique explicite est couramment utilisé en simulation de la mise en forme des composites et notamment pour les renforts tissés [5]. Un des modes principaux de formage est le glissement relatif des plis entre eux. Afin de le représenter chaque pli est modélisé par une couche d'éléments coques. Un exemple de la mise en forme d'un profil en Z est représentée sur la figures 2. La structure est constituée de 10 plis qui par l'introduction d'un contact visqueux, peuvent glisser entre eux. Le glissement relatif issu du calcul (Figure 3.2) est en bonne adéquation avec les résultats expérimentaux (Figure 3.2).

3 Simulation de l'étape de reconsolidation

Les porosités dans l'épaisseur de la structure sont sources de rupture, et doivent être absentes au sens des critères de qualités appliqués dans l'aéronautique. L'étape de reconsolidation est indispensable à cet effet. Afin d'étudier l'évolution de ces porosités lors du processus complet, des expériences ont été réalisés au CCR EADS à Suresnes, sur le profil en Z. Le procédé a été stoppé à différents états, pour lesquels des micrographies ont été réalisées permettant de quantifier ces porosités. Ces mesures et micrographies [6] ont été faites à différentes coupes et notamment dans les parties planes et courbes du profil. Cette analyse expérimentale montre de manière évidente l'apparition des porosités dès l'étape de chauffage du laminé. Ces porosités subsistent dans les parties planes du profil lors de l'étape de mise en forme et disparaissent (pour des raisons géométrique) dans les rayons de courbure à l'issue de cette étape. A l'issue de l'étape de reconsolidation, on constate que les défauts ont totalement disparus, autant dans les parties planes que courbes. Cette étape au cours de laquelle une pression est maintenue, via les outils sur la structure, est donc essentielle. Notons que dans les zones courbes dus aux effets géométriques générant une contrainte transverse la re-consolidation s'opère lors de la mise en forme. La simulation de cette étape de reconsolidation est, dans la logique du développement d'un outil de simulation du procédé dans son ensemble, est nécessaire.

3.1 Élément de coque avec pincement

Les expériences décrites précédemment montrent l'apparition et la résorption des porosités, tout en insistant sur le caractère essentiel de l'étape de reconsolidation, qu'il est nécessaire de pouvoir simuler. Cette étape a été étudiée [7] et des modèles ont été proposés au niveau local. Ces études montrent que la reconsolidation dépend de l'état de contrainte dans le pli et plus spécifiquement sur la composante normale à l'épaisseur, qui, par hypothèse n'est pas calculée dans les éléments de coques classiques. Divers éléments finis de coques à contrainte ou déformation au travers de l'épaisseur ont été développés [8], [9], [10]. Dans

ce travail, un élément de coque à un degré de liberté supplémentaire, la déformation dans l'épaisseur est utilisé [11].

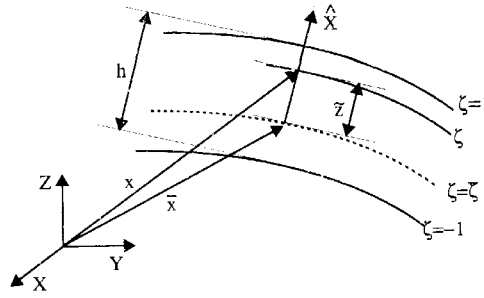


FIG. 4 – Cinématique d'une coque

La composante de la contrainte étant déduite de la loi de comportement. La position d'un point d'une coque est classiquement (Figure 4) défini par :

$$\mathbf{x} = \bar{\mathbf{x}} + \tilde{z} \hat{\mathbf{X}} \quad (4)$$

avec $\bar{\mathbf{x}}$ la projection de ce point sur la surface moyenne et \tilde{z} sa position sur la normale $\hat{\mathbf{X}}$. A partir de la position initiale (indiquée 0), le déplacement s'exprime alors :

$$\mathbf{u} = (\bar{\mathbf{x}}^t - \bar{\mathbf{x}}^0) + \tilde{z}^t \hat{\mathbf{X}}^t - \tilde{z}^0 \hat{\mathbf{X}}^0 \quad (5)$$

Dans l'hypothèse de petites rotations entre deux états et en introduisant $\Delta h = \tilde{z}^t - \tilde{z}^0$ le déplacement dans l'épaisseur et $\beta = \frac{\Delta h}{\tilde{z}^0}$ la déformation dans l'épaisseur, l'équation (5) devient :

$$\mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}} - \tilde{z}^0 \hat{\mathbf{X}}^t \times \boldsymbol{\theta} + z \beta \hat{\mathbf{X}}^t \quad (6)$$

Si $\beta = 0$ l'équation (6) conduit à la cinématique classique d'une coque sans pincement. Nous considérerons $\beta = \text{cste}$ dans l'épaisseur. β est le degré de liberté supplémentaire. Le tenseur des déformations est obtenue par dérivation (en hypothèse des petites perturbations) du champ de déplacement de l'équation (6). Dans un repère orthonormé ($\hat{\mathbf{e}}_1, \hat{\mathbf{e}}_2, \hat{\mathbf{e}}_3 = \hat{\mathbf{X}}$) local à l'élément les composantes de déformations de membrane-flexion, de cisaillement transverse, et de pincement (déformation dans l'épaisseur) : sont respectivement:

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ 2\varepsilon_{12} \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} \bar{u}_{x,1} \\ \bar{u}_{y,2} \\ \bar{u}_{y,1} + \bar{u}_{x,2} \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} \theta_{y,1} \\ -\theta_{x,2} \\ -\theta_{x,2} + \theta_{y,1} \end{Bmatrix} \\ \begin{Bmatrix} 2\varepsilon_{13} \\ 2\varepsilon_{23} \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} \bar{u}_{z,1} + \theta_y \\ \bar{u}_{z,2} - \theta_x \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} \beta_{,1} \\ \beta_{,2} \end{Bmatrix} \\ \{\varepsilon_{33}\} &= \beta \end{aligned} \quad (7)$$

Par l'introduction de cette déformation, les composantes de cisaillement transverse sont modifiées, et contrairement à une approche de coque classique les contraintes dans l'épaisseur sont non-nulles. Il a été montré [6], [11] que ce type d'éléments induisait du verrouillage, il est alors nécessaire de modifier la loi de comportement afin de dissocier le couplage entre le pincement et la flexion. Des exemples de validation de cet élément de coque et de l'efficacité de cette modification pour éviter ce verrouillage peuvent être trouvés dans [12],[13].

3.2 Simulation du procédé d'un profil en Z

Utilisant la coque à pincement décrite précédemment, la composante de contrainte dans la direction de l'épaisseur peut-être calculée pour un pli initialement plat mis en forme Z puis compacté lors de l'étape de reconsolidation. Lors de la mise en forme et à la fin de celle-ci (Figure 5) les valeurs de la composante de contraintes selon l'épaisseur sont quasi-nulles dans le pli, hormis dans les zones courbes associées aux rayons de courbures des outils. Ces résultats sont en accord avec les micrographies montrant une reconsolidation du matériau dans ces zones courbes. Après la reconsolidation (Figure 6), le matériau est en compression due à la pression exercée par les outils, les valeurs de contrainte étant plus importante dans les zones courbes, où le contact a été permanent. Par ailleurs les valeurs obtenues dépendent de l'angle des zones courbes du profil en Z.

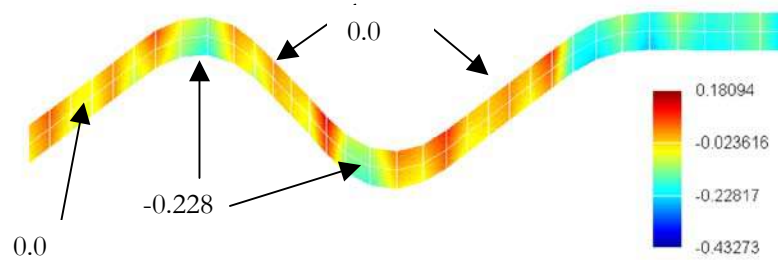


FIG.5 – Contrainte dans la direction de l'épaisseur à la fin de la mise en forme

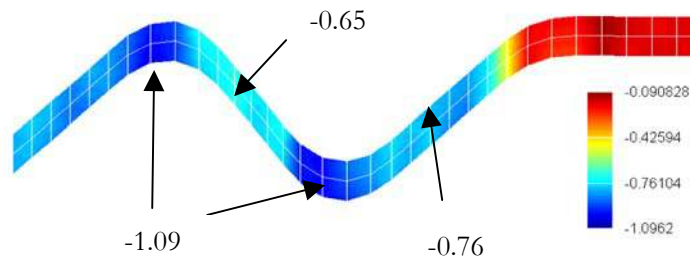


FIG.6 – Contrainte dans la direction de l'épaisseur après la reconsolidation

4 Conclusions

Dans ce travail, l'analyse expérimentale réalisée sur l'ensemble du procédé de fabrication d'un matériau composite thermoplastique a mis en évidence l'apparition des défauts et l'importance de l'étape de reconsolidation. L'introduction d'un élément de coque à pincement a permis de simuler toutes les étapes de ce procédé, et de quantifier, via la contrainte dans la direction de l'épaisseur, la compression dans les plis, dans les zones où ils sont consolidés. Cette première étape a été réalisée en introduisant une relation linéaire dans la loi de comportement pour le calcul des contraintes dans l'épaisseur. La détermination et l'identification d'une loi de comportement de compaction fera l'objet de prochains travaux, car il a été montré [14], [15] que les porosités conduisaient à des non-linéarités.

References

- [1] MAISON S., THIBOUT C., GARRIGUES C., GARCIN J.L., PAYEN H., SIBOIS, H., COIFFER C., VAUTEY P., Technical developments in thermoplastic composites fuselages, SAMPE journal, 34, n°5, 1998, 33-39.

- [2] PORA J., Composite Materials in the Airbus A380- From History to Future, Proceedings of ICCM13, CD-ROM, 2001
- [3] DE LUCA P., PICKETT A.K. Industrial examples of forming non-metallic parts using PAM-FORMTM. Proceedings of PAM'98, PSI/ESI Group, Tours, France, 1998, p.1-18
- [4] BELYTSCHKO T. An overview of semidiscretisation and time integration procedures, Computation methods for transient analysis. Ed. T. Belytschko and T.J.R. Hughes, Elsevier Science, 1983, 1-65.
- [5] BOISSE P., DANIEL J.L., HIVET G., SOULAT D. A simplified explicit approach for simulations of fibre fabric deformation during manufacturing preforms for R.T.M. process. International Journal of Forming Processes, 2001, Vol.3, n°3-4, pp.331-353.
- [6] CHERUET A., Analyse et simulation de la mise en forme des composites thermoplastiques, Thèse de doctorat, Université d'Orléans, 2001.
- [7] LEE W., SPRINGER G., A model of the manufacturing process of thermoplastic matrix composites, Journal of Composite Materials, Vol. 21, p1017-1055, 1987.
- [8] SIMO J.C., FOX D.D., RIFAI M.S, On a stress resultant geometrically exact shell model. Part 4 : Variable thickness shells with trough-the-thickness stretching, Comp. Meth. in App. Mech. and Engng, 1990, vol. 79, p 21-70.
- [9] BUTCHER N., RAMM E., ROEHL D. Three dimensional extension of non-linear shell formulation based on the enhanced assumed strain concept. Int. J. for Num. In Engng., 1994, Vol 37, p.2551-2568.
- [10] BISCHOFF M., RAMM E., Shear deformable shell elements for large strains and rotations, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 40, p4427-4449, 1997.
- [11] COQUERY M.H., Modélisation d'un joint de culasse multifeuille, Thèse de doctorat, ENSAM Paris, 1999.
- [12] CHERUET A., SOULAT D., BOISSE P., SOCCARD E., MAISON-LE POEC S, Analysis of the reconsolidation of thermoplastic composites forming., Proc. of the Fifth International ESAFORM conference on Material Forming, pp.291-294, 2002
- [13] A. CHERUET, D. SOULAT, P. BOISSE, E. SOCCARD, S. MAISON-LE POEC, Analysis of the interply porosities in thermoplastic composites forming processes. International Journal of Forming Processes. vol. 5, n. 2-3-4, p.247-258, 2002
- [14] GUTOWSKI TG. A resin flow/fibre deformation model for composites, SAMPE Quart., 1985, 16 (4), 58-64.
- [15] BAOXING C., CHOU T.W. Compaction of woven-fabric preforms in liquid composite molding processes : single layer deformation, Composite Science and Tech., 1999, 59, 1519-1526.