

**Intégrité et durée de vie de moules en HexTOOL™ =
Integrity and life cycle of HexTOOL™ composite molds**

Yves-Henri Grunevald, Francis Collombet

► **To cite this version:**

Yves-Henri Grunevald, Francis Collombet. Intégrité et durée de vie de moules en HexTOOL™ = Integrity and life cycle of HexTOOL™ composite molds. JNC16, Jun 2009, Toulouse, France. 8 p. hal-00430593

HAL Id: hal-00430593

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00430593>

Submitted on 9 Nov 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.

Intégrité et durée de vie de moules en HexTOOL™

Integrity and life cycle of HexTOOL™ composite molds

Yves-Henri Grunevald¹, Francis Collombet²

1 : SARL C.E.S.
Rue Georges Vallerey
F-31320 Castanet-Tolosan
e-mail : yh.grunevald@composites-expertise-solutions.com

2 : Université de Toulouse ; INSA ; UPS ; Mines Albi ; ISAE ;
ICA (Institut Clément Ader)
133c, avenue de Ranguéil, F-31077 Toulouse
e-mail : francis.collombet@jut-tlse3.fr

Résumé

La proportion de matériaux composites dans le domaine des transports en général et l'aviation en particulier est en pleine croissance. Les dimensions maximales des structures unitaires sont elles aussi en croissance. La maîtrise des outillages nécessaires à la production de telles pièces composites devient un enjeu stratégique car jouant un rôle direct sur leur coût et leur qualité. L'objectif de cette présentation est de faire un premier point sur les problèmes que rencontrent les solutions composites actuelles et les défis à relever puis de présenter les travaux que nous menons pour apporter une réponse aux questions que peuvent se poser les industriels.

Abstract

The proportion of carbon-composite content in new airplanes is growing fast, especially in commercial transport aircraft. Parts are also becoming larger, and the tooling to produce such large parts in composite is a key factor in their cost and quality. The objective of this presentation is to give first a progress report on the problems which encounter the current composite solutions and the challenges to take up then to present work which we carry out to bring an answer to the questions of industry.

Mots Clés : Moulage grande pièce ; Outillage composite; Relation mise en oeuvre propriété.

Keywords: Big piece molding, Composite tooling, Property processing relationship.

1. Introduction

Avec l'apparition du programme 787 (Boeing - 2004) et du programme A350 XWB (Airbus - 2006), l'utilisation des structures en matériaux composites à base de fibres de carbone dans l'aéronautique touche désormais la totalité des pièces primaires et en particulier les ailes et le fuselage. Ce sont des structures de très grandes dimensions devant présenter les surfaces aérodynamiques les plus proches possibles des profils théoriques afin d'optimiser le fonctionnement de l'appareil et permettre un assemblage de qualité (absence de gaps, transmission optimum des flux d'efforts...). Cette situation implique, entre autre, le respect de tolérances plus serrées sur la géométrie ca qui est antinomique avec l'accroissement des dimensions. Ce besoin est d'autant plus difficile à satisfaire que les pièces à fabriquer sont d'un seul tenant et de plus en plus grandes. De plus, cette situation accroît les contraintes internes dans la pièce composite avec l'utilisation d'un outillage métallique [1] [2]. Cette tendance est destinée à s'intensifier avec le lancement dans les prochaines années des programmes A320 et B 737 de nouvelle génération. La figure 1 montre l'influence de paramètres procédés mal maîtrisés sur la jonction de deux panneaux composites de grande dimension. Les dimensions importantes des pièces impliquent également des outillages de plus en plus lourds ce qui engendre une plus grande complexité de la manutention des déformations sous poids propre à froid et en température,

En parallèle, la nécessité de devoir réduire en permanence les coûts de production et les masses des structures oblige les concepteurs à accroître la démarche d'intégration. Le co-moulage de la peau et d'au moins une partie des renforts (cf. Fig. 1), la réalisation de zones sandwichs one shot, la mise en place d'inserts complexes comme ce pourrait être le cas pour les cadres de pare brise voire, à terme de hublots et la fabrication de barils complets contribuent à la réduction des coûts. Le moule est donc appelé à jouer un rôle qui dépasse nettement celui de simple surface de référence.

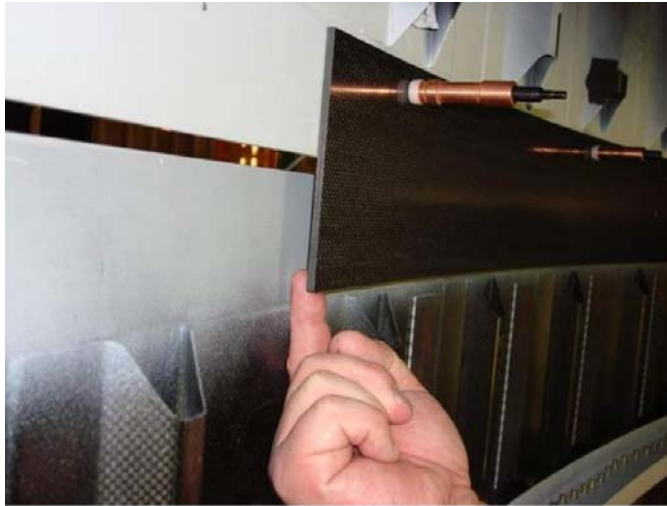


Fig. 1. Illustration du problème de raccord entre 2 panneaux composites.

Il faut également pouvoir concilier les influences des contraintes liées à la polymérisation des matériaux dans la plupart des cas à une température de 180°C. Dans ce domaine, sans être exhaustif nous pouvons citer les influences suivantes :

- des décalages en température dans les rampes, durant le début de la cuisson du fait des différences d'inerties thermiques (pièce, moule, environnements de vide) mais aussi du fait des variabilités liées aux échanges thermiques engendrés par une circulation plus ou moins aisée de l'air (étuve, autoclave) ou de l'azote autour du moule (autoclave) ;
- de l'exothermie du matériau en fonction des épaisseurs locales (de quelques mm à quelques dizaines de mm) sur une même pièce ;
- de la dilatation différentielle moule/structure et changement d'état durant la polymérisation ;
- des accessoires pouvant être utilisés pour la réalisation en co-moulage de renforts intégrés (vessies, noyaux, intensificateurs,...) et des appendices de mise en œuvre (prises de vide, points d'injection résine en infusion,...).

Il s'agit d'être en mesure de réparer un moule si celui-ci subit un dommage en utilisation et idéalement pouvoir adapter celui-ci lorsque l'on passe de la phase de présérie à la phase de production série, sans avoir à développer un nouvel outillage ce qui pénalise les coûts non récurrents.

Il faut aussi assurer une qualité de surface constante dans le temps et donc idéalement disposer de moules ayant des duretés de surface importantes à même de résister à des agressions mécaniques (cutters lors du moulage ou coins lors du démoulage par exemple).

Il faut garantir une longévité de moule qui puisse permettre, à minima, d'appliquer un amortissement acceptable¹ des NRC et si possible permettant de le réduire.

De nombreux points militent pour une utilisation plus importante des outillages et des moules en matériaux composites mais certains aspects comme le vieillissement en cyclage thermique et la dureté de surface peuvent aussi faire reculer les industriels même si les fournisseurs de matériaux composites ont clairement développé des solutions à plus forte valeur ajoutée comme l'HexTOOL™ chez Hexcel par exemple.

L'objectif de cette présentation est de faire un premier point sur les problèmes que rencontrent les solutions composites actuelles et les défis à relever puis de présenter les travaux que nous menons pour apporter une réponse aux questions que peuvent se poser les industriels.

2. Inadéquation des solutions composites « classiques » pour les outillages de grande dimension

De longue date, les outillages composites sont développés pour produire des pièces en composites. Dans le domaine des pièces précises et de petite ou moyenne dimension en carbone, l'utilisation de pré imprégnés carbone/époxy classe 180°C dit « d'outillage » est même fréquente.

¹ La notion d'acceptabilité est évidemment très variable en fonction du type de marchés, du type de pièces et de sa criticité.

Toutefois cette approche pose de gros problèmes quand on souhaite obtenir une pièce très précise (tolérances en $1/10^{\text{ème}}$ de mm). En effet, cette approche implique de devoir réaliser un maître modèle de très grande précision capable d'intégrer la fonction de transfert thermomécanique entre sa géométrie à 20°C et celle de la pièce industrielle à 20°C. Cette fonction doit bien entendu intégrer toute la phase de production du moule.

La simulation des phénomènes associés est multidisciplinaire. On peut noter les domaines de :

- l'aérodynamique et la thermique pour les échanges air/moule et air/environnement de vide ;
- la thermique pour les phénomènes de convection/conduction ;
- la thermique et la chimie pour l'exothermie et les retraits liés à la polymérisation ;
- la mécanique des composites pour les dilatations différentielles ;
- ...

Cette simulation doit aussi pouvoir prendre en compte certaines variabilités liées à la reproductibilité de fabrication du pré imprégné et de sa mise en place par exemple.

S'il est possible de réaliser une estimation de ces phénomènes, il est illusoire de pouvoir à ce jour être en mesure de simuler l'ensemble du cycle constitué de :

- la fabrication du maître modèle ;
- la fabrication du moule à partir du maître modèle ;
- la fabrication de la structure à partir du moule.

Tous ces éléments concourent à l'extrême difficulté de garantir une précision élevée de la géométrie d'une structure après polymérisation et refroidissement sans passer par un ré usinage de plis sacrificiels. Ceci complique la fabrication de l'outillage et fragilise la surface active réduisant la durée de vie du moule ce qui pénalise drastiquement son amortissement.

3. Apparition d'une approche innovante

Ces constatations ont bien entendu été faites par tous les professionnels du domaine et donc par les fabricants de matériaux eux-mêmes. Dans ce cadre plusieurs sociétés ont proposé des approches innovantes [3] [4] [5] mais la plus prometteuse est celle de la société Hexcel avec l'HexTOOL™ [6].

L'HexTOOL™ est un SMC² obtenu en découpant, dans un UD³ pré imprégné carbone HR (T700S) et matrice BMI⁴, des patches de 50 mm de long et 5 mm de large qui sont répartis de façon quasi « aléatoire » dans le plan.

Avant polymérisation, l'épaisseur du semi produit obtenu est comprise entre 1,5 mm et 2 mm. Le fait de partir d'un pré imprégné permet d'obtenir en final un volume de fibres ($V_f\%$) de 60%. L'épaisseur moyenne après polymérisation est de 1,3 mm (+/-0,3mm).

Cette répartition «aléatoire» confère à ce matériau un caractère « quasi isotrope » dans le plan. Le $V_f\%$ de 60% lui donne une excellente stabilité dimensionnelle en température puisque le coefficient de dilatation est de $3 \cdot 10^{-6}$ pour la gamme en température : 0-100°C.

L'utilisation d'une matrice BMI permet d'obtenir une T_g^5 après vieillissement humide de 250°C. Cette valeur garantit théoriquement une grande longévité par rapport aux cycles thermiques y compris pour des cuissons à 180°C, ce qui est majoritairement le cas pour les pièces primaires aéronautiques.

Bien que le semi produit soit assez épais et que la viscosité de la BMI chute très vite dès que l'on atteint une température de 30 à 40°C, il est extrêmement aisé de pouvoir réaliser des formes complexes avec ce matériau.

Enfin l'avantage majeur de ce matériau réside dans le fait qu'il est usinable tout en conservant un état de surface ne nécessitant pas l'utilisation de « bouche pores ». Commercialisé depuis 3 ans, le potentiel encore majoritairement non validé de ce matériau nous paraît dépasser les attentes initiales de la société Hexcel et être en mesure de révolutionner le monde du composite tant sur le plan de la conception que sur celui de la production, si les hypothèses émises sont validées.

En résumé, ce matériau présente à l'échelle de la structure une quasi-isotropie dans le plan, un faible coefficient de dilatation thermique, une bonne résistance au vieillissement thermomécanique et une très bonne usinabilité (cf. Fig. 2).

² SMC : Sheet Molding Compound.

³ UD : Uni Directionnel.

⁴ BMI : Bismaléimide.

⁵ T_g : température de transition vitreuse.

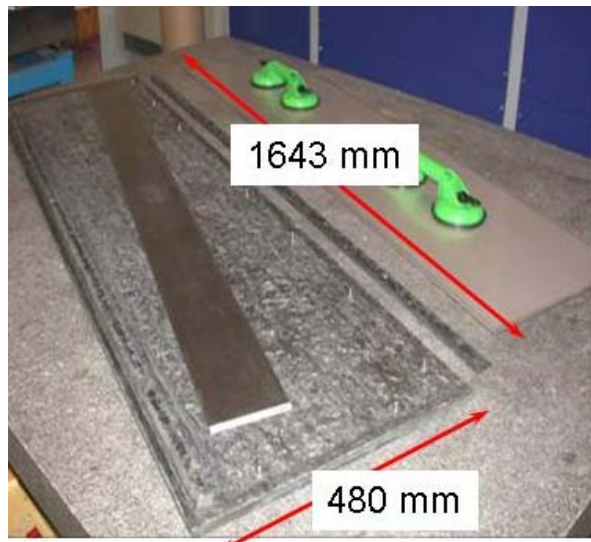


Fig. 2. Projet EUDET - Moule HexTOOL™ pour structure alvéolaire mince (source : Laboratoire Leprince-Ringuet – IN2P3).

Ce dernier point constitue une avancée majeure dans la conception d'outillages puisque la précision géométrique et la qualité de surface sont obtenues par usinage, donc sans nécessiter un maître modèle précis d'où une réduction notable du coût global des outillages [7].

4. Intérêt de cette approche innovante

De fait, les moules confectionnés avec ce matériau sont aisément rechargeables et ré usinables. Il est alors possible de réaliser des réparations, des corrections géométriques (compensation du springback par exemple), des modifications. Cela autorise l'utilisation du même moule pour les prototypes (cf. Fig. 3) et la présérie, voire la série.



Fig. 3. Moule HexTOOL™ en cours d'usinage (Projet EUDET, source : CES – Courtesy of LLR – IN2P3).

La masse surfacique importante de HexTOOL™ permet de draper un brut autoporteur plus rapidement qu'avec un procédé classique (prépreg d'outillage par exemple). Le suivi de géométries complexes est relativement aisé du fait que ce soit un SMC BMI (cf. Fig. 4).



Fig. 4. Moule HexTOOL™ pour élément de structure d'hélicoptère (source : CES – Courtesy of ATN International).

Si les règles de mise en œuvre de ce matériau sont parfaitement définies par la société Hexcel, il reste des champs d'étude assez vastes comme l'influence sur les paramètres déterminants d'un moule de facteurs comme : le taux de fibres, les variations d'épaisseur, le nombre de compactages intermédiaires, le cycle de cuisson et post cuisson (...). On peut relever la Tg et son évolution au fur et à mesure des cuissons, le taux de polymérisation, les coefficients de dilatation thermique, la présence de contraintes résiduelles de cuisson, la présence de micro porosités et de micro cracks, l'état de surface après usinage (...) afin de pouvoir répondre de façon précise aux questions des clients potentiels.

5. Travaux en cours et futurs

Ces travaux viennent en complément de l'importante campagne de validation menée par la société Hexcel depuis le début du développement de ce matériau. Si certains de nos essais sont proches ou similaires, ils n'ont néanmoins pas la même motivation. Hexcel devait s'assurer de la qualité industrielle de son matériau [5], de la reproductibilité du procédé associé et être en mesure d'aider ses clients à l'utiliser de façon correcte.

Notre premier objectif est de pouvoir, à terme, modéliser l'influence des variabilités (quelles soient volontaires ou subies) associées à la réalisation d'un outillage en HexTOOL™ afin de disposer d'un modèle technico-économique aussi complet que possible destiné à optimiser le ratio coût d'outillage/performance.

Notre second objectif est de pouvoir, à terme, apporter un certain nombre de réponses aux paramètres limitatifs de la solution « outillages composites ». Il s'agit par exemple et de façon non exhaustive : de la réduction des coûts de production, d'une surface active autodémoulante permanente présentant, en plus, une dureté beaucoup plus élevée, d'une conductivité thermique paramétrable, d'une instrumentation en température, en pression et en déformations ainsi que d'un pilotage localisé.

Les travaux en cours se déclinent en plusieurs volets. Le premier (2009-2010) a pour objectif de répondre à la question de l'influence du cycle de cuisson sur différentes propriétés du matériau et donc du moule. A ce titre plusieurs pistes sont explorées.

La première piste est l'étude du couplage entre les paramètres du cycle et l'épaisseur du matériau (éprouvette type 01, cf. Fig. 5). Les cycles étudiés sont « avec » et « sans » post cuisson. Dans le second cas, cette situation est possible si le maître modèle est à même de résister, sur une période d'une vingtaine d'heures, à une température élevée voisine de la température de cuisson. Cela restreint le champ des matériaux applicables pour fabriquer le maître modèle. Par contre l'intérêt direct⁶ est une réduction globale du temps et du coût du cycle de cuisson. Dans les 2 cas, les paramètres que nous faisons varier sont : la température de cuisson, la durée de cuisson et de post cuisson quand elle existe. Les paramètres qui restent fixes sont : le taux de pompage, la géométrie de l'éprouvette (éprouvette type 01), celle du maître modèle et particulièrement son inertie thermique, la rampe de montée et celle de refroidissement, la pression autoclave et l'inertie thermique de l'environnement de vide.

⁶ Deux moules ont d'ores et déjà été réalisés selon cette approche en partenariat avec la société ATN International.

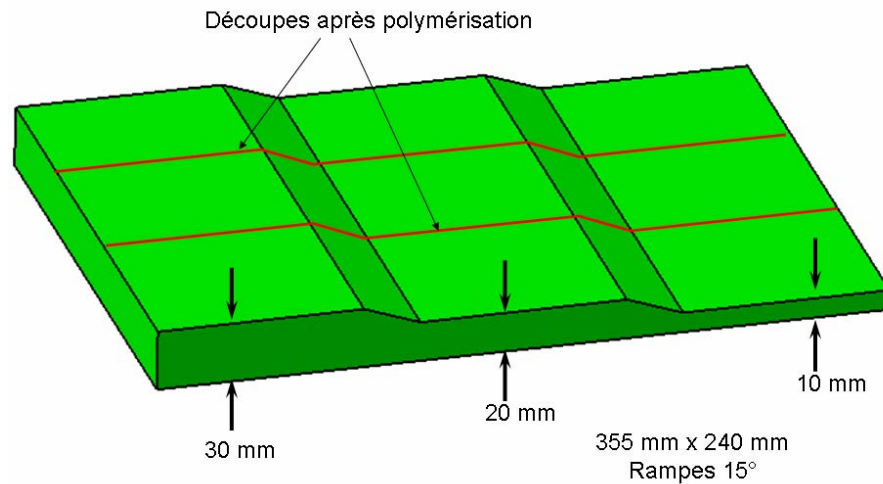


Fig. 5. Géométrie de l'éprouvette type 01.

Les paramètres que nous étudions sont le degré de polymérisation ainsi que la présence de porosités et micro-cracks à cœur et en surface avant et après usinage (cf. Fig. 6).

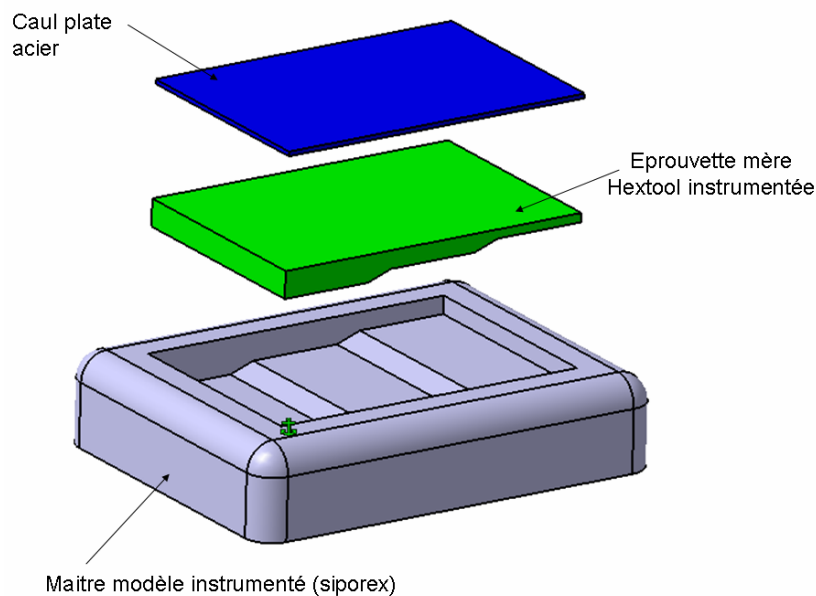


Fig. 6. Ensemble éprouvette type 01, maître modèle et caul plate associés.

La seconde piste est l'influence de la pression autoclave et du pompage sur la santé matière. La pression recommandée par Hexcel est de 7 bar pour un faible pompage (quelques pourcents bien que cette valeur ne soit pas directement précisée). Avec ce jeu de paramètres nous savons que le résultat est satisfaisant. Toutefois il est intéressant d'examiner ce que peuvent donner des pressions plus basses (entre 5 et 7 bar) particulièrement si elles sont associées à un pompage un peu plus important. En effet de nombreuses réalisations par le passé ont montré que le flow aide à l'évacuation des porosités sans pour autant nuire à l'intégrité matière. Une pression plus faible est intéressante en termes de diminution des risques d'endommagement de l'environnement de vide lors de la cuisson. Les éprouvettes de type 02 sont des éprouvettes planes de 200 x 400 mm en différentes épaisseurs (10, 20 et 30 mm). Le cycle appliqué résultera des conclusions obtenues sur la campagne d'essais précédente.

Les paramètres que nous faisons varier sont : la pression autoclave et le pompage (donc indirectement l'inertie thermique de l'environnement de vide) et l'épaisseur de l'éprouvette. Les paramètres qui restent fixes sont : l'inertie thermique du maître modèle, le cycle de cuisson, le nombre de plis déposés entre deux précompactages. Les paramètres que nous étudions sont la présence de porosités et micro-cracks à cœur et en surface avant et après usinage et le coefficient de dilatation dans les trois directions de l'espace.

La troisième piste concerne l'étude des facteurs influençant le springback. Dans cette partie, l'objectif sera de quantifier l'influence de différents sets de paramètres sur le springback pouvant survenir sur le moulage d'une équerre *HexTOOL™* (cf. Fig. 7).

Les paramètres que nous souhaitons faire varier sont :

- l'épaisseur de l'éprouvette (10, 20 et 30 mm), cette épaisseur étant considérée dans la partie centrale sur une valeur incluant 98 % des minima locaux ;
- le rayon intérieur de cornière (10, 20, 30 et 40 mm) et ceci pour les trois types d'éprouvettes précédentes. On observera l'effet du cycle de cuisson sur le rayon extérieur associé dans chaque configuration ;
- le niveau d'inertie thermique du maître modèle associé (épaisseur constante, épaisseur évolutive et face inférieure plane) ainsi que le niveau d'inertie thermique de l'environnement de vide placé au dessus (minimal, moyen et élevé) en créant artificiellement une couche isolante plus ou moins épaisse au dessus de l'ensemble des périphérique de vide et de pompage ;
- le niveau de pompage en limitant ou au contraire favorisant le flot dans l'environnement de vide.

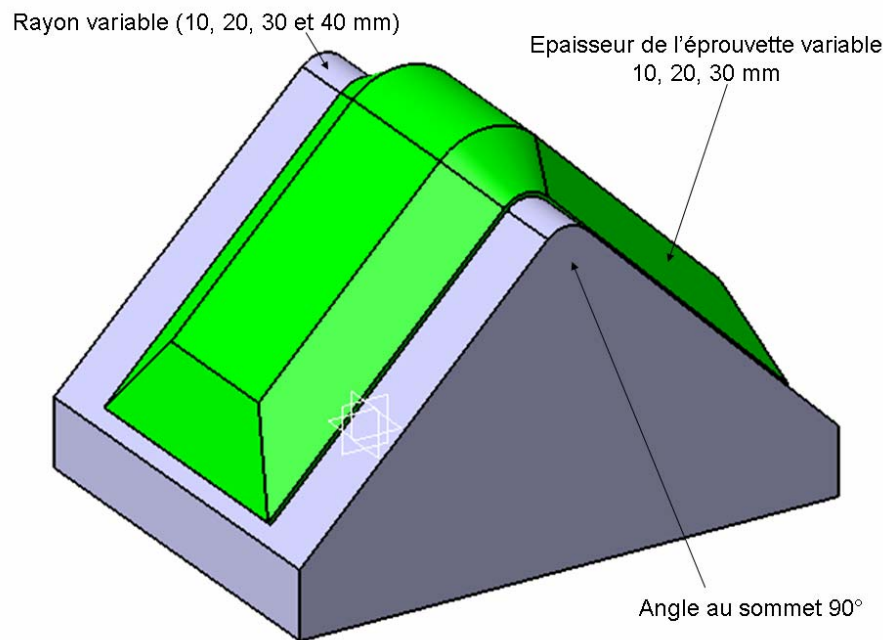


Fig. 7. *Equerre HexTOOL™* et maître modèle associé.

Pour chaque essai, une instrumentation du maître modèle et de l'éprouvette sera réalisée à l'aide de thermocouples et de fibres optiques à réseau de Bragg afin de suivre les champs de température et les déformations au cours de la polymérisation puis ensuite après usinage sur face maître modèle ou face externe ce qui permettra de quantifier les mécanismes mis en jeu en cuisson et l'état de contrainte résiduelle après polymérisation.

Ceci nous permettra aussi de recalibrer des modèles numériques développés sous SAMCEF et destinés à décrire le comportement en cuisson et l'interaction maître-modèle / outillage

6. Conclusion

Si cette étude a malheureusement débuté avec un peu de retard, les premiers résultats obtenus sont très encourageants et confirment le potentiel de ce matériau pour les industriels tout particulièrement dans le domaine des pièces de grande dimension.

Nos travaux ne pourront pas contribuer à mieux comprendre les problématiques associées à la conception et l'exploitation de moules en général et de moules composites en particuliers. Ils permettront de disposer à terme d'outils et méthodologies robustes et industrielles pour concevoir et valider ces types d'outillages.

Travaillant de façon croisée dans le domaine de la recherche et celui du développement industriel, cela nous offre en plus l'opportunité de tester au fur et à mesure la validité de nos modèles sur des applications industrielles réelles et par là même d'assurer un recalage éventuel.

Enfin avec un délai un peu plus long, les travaux menés avec de grands industriels de l'aéronautique dans le cadre d'un partenariat franco-canadien devraient nous permettre de proposer une solution très intéressante en termes de propriété de surface (dureté et anti-adhésion permanente non polluante).

Références

- [1] G. Twigg, A. Poursartip, G. Fernlund, "An experimental method for quantifying tool-part shear interaction during composites processing". *Composites Science and Technology*, Vol. 63, 2003, pp. 1985-2002.
- [2] K.E. Tarsha-Kurdi, P. Olivier, "Thermoviscoelastic analysis of residual curing stresses and the influence of autoclave pressure on these stresses in carbon/epoxy laminates". *Composites Science and Technology*, 2002, Vol. 62, N°4, pp. 559-565.
- [3] M. Anghelescu, M. Khairul Alam, "Carbon Foam Tooling for Aerospace Composites Manufacturing". *SAMPE Journal*, Vol. 44, January/February 2008, pp. 6-13.
- [4] David Cloud, John Norton, "Low-cost tooling for composite parts: the LCTC process". *Assembly Automation*, 2001, Vol. 21, Issue 4, pp. 310 – 317.
- [5] L. Carver, "New Solutions for Composite Tooling". *SAMPE Journal*, Vol. 45, N°1, January/February 2009, pp. 48-54.
- [6] B. Boursier, R. Callis, J. Porter, "HexTOOL™: opening new possibilities in composites tooling". *JEC composites*, 2006, N° 27, pp. 78-82.
- [7] P. Christou, "High Temperature Resistant Tools and Master Models: Seamless Molding Paste (SMP) Technology". *SAMPE Journal*, Vol. 42, November/December 2006, pp.7-13.