



HAL
open science

Etude du comportement à l'impact et en compression après impact des stratifiés infusés cousus et non-cousus

K. Alvine Njionhou, Florentin Berthet, Bruno Castanié, Christophe Bouvet

► To cite this version:

K. Alvine Njionhou, Florentin Berthet, Bruno Castanié, Christophe Bouvet. Etude du comportement à l'impact et en compression après impact des stratifiés infusés cousus et non-cousus. 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17), Jun 2011, Poitiers-Futuroscope, France. pp.32. hal-00597896

HAL Id: hal-00597896

<https://hal.science/hal-00597896>

Submitted on 2 Jun 2011

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.

Etude du comportement à l'impact et en compression après impact des stratifiés infusés cousus et non-cousus

Study of the impact behaviour and compression after impact of stitched and unstitched infused laminates

Alvine Njionhou K.¹, Florentin Berthet¹, Bruno Castanié² et Christophe Bouvet³

1,2,3 : Université de Toulouse, INSA, UPS, Mines d'Albi, ISAE, ICA (Institut Clément Ader)

1 : Ecole des Mines d'Albi (EMAC), Campus Jarlard, F-81013 Albi cedex 09, France,
e-mail: anjionho@mines-albi.fr, florentin.berthet@mines-albi.fr

2 : INSA, 135 Avenue de Rangueil, 31077 Toulouse Cedex
e-mail: bruno.castanie@insa-toulouse.fr

3 : ISAE, 10 Avenue Edouard Belin, 31055 Toulouse Cedex
e-mail : christophe.bouvet@isae.fr

Résumé

Le contexte général du développement des procédés hors-autoclave dans l'industrie aéronautique conduit à s'interroger sur les liens possibles entre ces nouveaux procédés et le comportement mécanique à l'impact des pièces composites obtenues. Dans cette étude, un plan d'expérience a été utilisé pour établir ces liens éventuels. L'étude a porté sur le procédé d'infusion de résine liquide appliqué à des stratifiés de quadri-axiaux NCF cousus ou non cousus. Cinq paramètres procédés ont été retenus (couture, température de cuisson, position de préforme, nombre de tissus drainants, niveau de vide). Les plaques infusées ont été impactées à 35J et les paramètres d'étude retenus sont pendant et après l'impact : le déplacement maximal de l'impacteur, l'énergie absorbée, la profondeur d'indentation permanente, la surface délaminée. Puis des essais de compression après impact ont été réalisés et la contrainte moyenne correspondante mesurée. Les interactions trouvées par la méthode d'analyse statistique montrent une très forte sensibilité des paramètres d'impact à la présence de la couture, ce qui est attendu. Des influences de la température de cuisson et de la position de la préforme, sont aussi trouvées sur la profondeur d'indentation permanente. Au bilan, il a été démontré que le procédé d'infusion de résine lui-même n'implique pas de comportement spécifique à l'impact.

Abstract

The general context of the development of out-of-autoclave processes in the aeronautic industry raises to answer about the possible links between these new processes and impact behavior. In this study, an experimental plan was used to establish possible links. The study focused on the liquid resin infusion process applied to laminates made with quadri-axial carbon Non crimp Fabric (NCF) stitched or unstitched. Five process parameters were selected (stitching, curing temperature, preform position, number of high porous media, vacuum level). The impact energy was 35J. The parameters analyzed during and after impact were: maximum displacement of the impactor, absorbed energy, permanent indentation depth, delaminated area. Then, the after impact compression tests were performed and the corresponding average stress was measured. The interactions found by statistical analysis method show a very high sensibility of stitching which was of course expected. A very significant influence of curing temperature and a significant influence of preform position are also found on the permanent indentation depth. Globally, it was demonstrated that the resin infusion process itself does not influence the impact behavior.

Mots Clés : Infusion de résine liquide, Tissus NCF, Impact, Compression après impact

Keywords : Liquid Resin Infusion, Non Crimp Fabric, Impact, Compression after impact.

1. Introduction.

Le contexte général du développement des procédés hors-autoclave dans l'industrie aéronautique [1] conduit à s'interroger sur les liens possibles entre ces nouveaux procédés et le comportement mécanique à l'impact et en tenue résiduelle après impact des pièces composites obtenues. Ce sont en effet des comportements dont la connaissance est essentielle au dimensionnement des structures aéronautique. Dans cette étude le choix s'est porté sur le procédé d'infusion de résine (LRI : Liquid Resin Infusion) qui fait l'objet d'un intérêt croissant et sur des tissus quadri-axiaux NCF qui permettent des gains de productivité significatifs en terme de quantité de matière déposée par unité de temps. Enfin, les techniques de renforcements transversaux sont aussi des techniques amenées à se développer dans les années à venir car elles offrent a priori des gains en caractéristiques mécaniques et plus particulièrement en impact. Le piquage a été retenu car cette technologie apparaît plus prometteuse car moins intrusive et plus facile à mettre en œuvre [2].

Jusqu'à présent les études relatives au procédé LRI se sont focalisées essentiellement sur le procédé lui-même (nature de l'écoulement, perméabilités, formation des défauts) [3-9] et sur les effets que peuvent avoir les différents paramètres sur les caractéristiques morphologiques et mécaniques des pièces obtenues, par exemple [10-15]. Une étude bibliographique exhaustive [16] a permis de sélectionner 8 paramètres procédés qui sont susceptibles d'avoir une influence significative. Il a été montré que seuls certains d'entre eux ont une influence significative sur la tenue en compression [16] et ceux-ci ont été retenus dans cette étude afin de minimiser la taille du plan d'expérience. Ils sont au nombre de 5 et seront les paramètres d'analyse :

- La couture (C_o) de la préforme, en présence ou non,
- La température de cuisson (T_c), 160°C ou 180°C,
- Le côté de la plaque (C_p), du côté injection ou aspiration du vide,
- Le nombre de tissus drainants (t_d), 1 couche ou 2 couches,
- Le niveau de vide (N_v).

Les autres paramètres dits de fabrications sont donc fixés : température de moule à 100°C, température d'injection de résine à 80°C. Les stratifiés seront tous constitués de 4 couches de NCF soit 16 plis car il faut une plaque assez résistante en pratique et l'objectif n'est pas ici de faire une étude spécifique sur le comportement à l'impact mais de détecter l'effet des conditions de fabrication. Le choix de la géométrie générale des éprouvettes d'impact et de compression après impact est imposé par la norme Airbus AITM 1-0010 [17]. L'étape suivante a consisté à choisir l'énergie d'impact. Celle-ci a été fixée en se donnant comme critère le BVID (Barely Visible Impact Damage). Cette notion correspond à une empreinte détectable en service par les compagnies et est la pierre angulaire de la philosophie de tolérance aux dommages. Il est admis qu'un enfoncement de 0,2 à 0,3 mm est détectable à 2 m de distance alors qu'un enfoncement de 0,1 mm n'est détectable qu'en inspection détaillée. Dans cette étude plusieurs essais successifs au poids tombant ont été réalisés pour obtenir des dommages significatifs et une empreinte résiduelle supérieure à 0.3 mm donc supérieure au BVID. Par cette méthode, l'énergie d'impact a été fixée à 35 Joules. Cette énergie correspond pour la masse de l'impacteur utilisé à une vitesse d'impact d'environ 4 m/s.

2. Méthodologie expérimentale

2.1 Plan d'expérience et fabrication des plaques.

Le plan d'expériences est une table de Taguchi de type $L_8(2^7)$ qui comporte 5 colonnes de paramètres procédés d'analyse et 8 lignes d'expériences de fabrication (Tab 1). 2 lignes supplémentaires sont ajoutées à cette table pour vérifier les résultats lors de l'analyse statistique. Après avoir découpé (à $400 \times 150 \text{ mm}^2$) et drapé les tissus de carbone NCF, certaines préformes sont cousues. La couture se fait en lignes droites parallèles dans le sens de la longueur des plaques en point noué modifié avec du fil kevlar à l'aide d'une machine à coudre industrielle. La longueur entre deux points successifs est de 8 mm et l'espacement entre deux lignes est aussi de 8 mm. Les

préformes cousues et non cousues sont disposées comme indiqué sur la fig. 1. La mise sous vide de l'enceinte bâche et moule est exécutée jusqu'à l'atteinte d'un niveau de vide inférieur à 2 mbar. L'injection et l'infusion de la résine est faite à 80°C et la polymérisation se fait suivant la condition du plan d'expériences. Le refroidissement est toujours à température ambiante. Aucune post-cuisson n'est réalisée pour ne pas estomper les effets de la température de cuisson dans le stratifié lors de l'analyse des résultats. Par la suite les plaques sont découpées au format de la norme *Airbus AITM 1-0010* (150 x 100 mm²). Au total 60 éprouvettes ont été réalisées de sorte à avoir 6 plaques par configuration.

Tab. 1. Plan d'expérience

Conditions de fabrication		Paramètres d'analyse				
N°	Exp.	Couture	Temp. Cuisson (°C)	Nombre de tissus drainant	Côté de plaque	Niveau de vide (mbar)
1	CAI 1V	Sans	180	1	Vide	1.3
2	CAI 1I	Sans	180	1	Injection	1.3
3	CAI 2V	Sans	160	2	Vide	1.4
4	CAI 2I	Sans	160	2	Injection	1.4
5	CAI 3V	Avec	180	2	Vide	1.6
6	CAI 3I	Avec	180	2	Injection	1.6
7	CAI 4V	Avec	160	1	Vide	1.4
8	CAI 4I	Avec	160	1	Injection	1.4
9	CAI 5V	Avec	170	2	Vide	1.3
10	CAI 5I	Avec	170	2	Injection	1.3

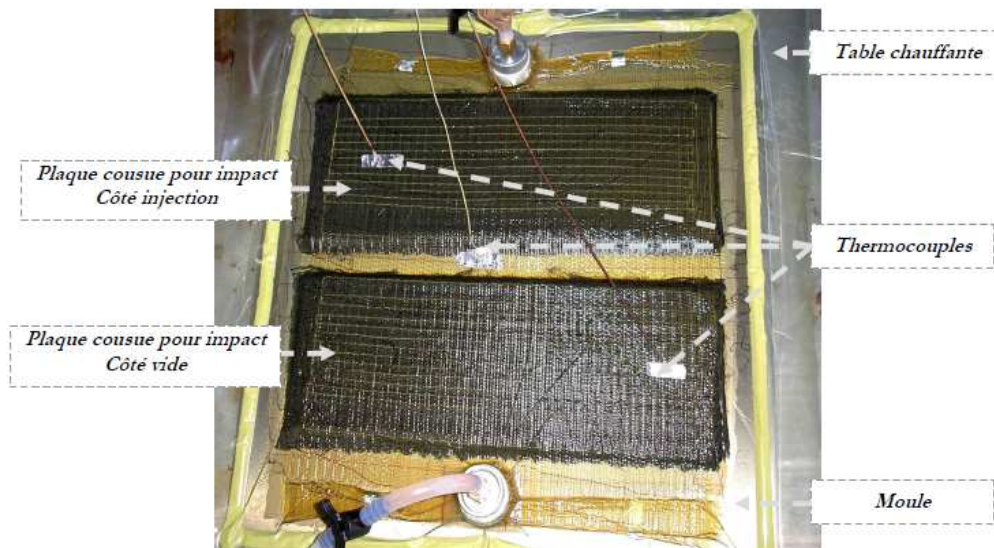


Fig. 1. Fabrication par LRI de deux plaques cousues

2.2 Essais et mesures

Les essais d'impact sont réalisés sur le dispositif d'impact par poids tombant de l'ISAE. La masse est guidée dans un tube et la plaque à impacter est maintenue par une fenêtre de bridage (fig. 2). Lors de cet essai, les vitesses et forces instantanées sont mesurées. A partir de ces données on calcule le *déplacement maximal* de l'impacteur durant l'impact et l'*énergie absorbée par la*

structure. Après l'impact, l'indentation maximale est mesurée à l'aide d'un comparateur au 1/100^{ème} de mm. La surface endommagée projetée est aussi mesurée par C-scan.

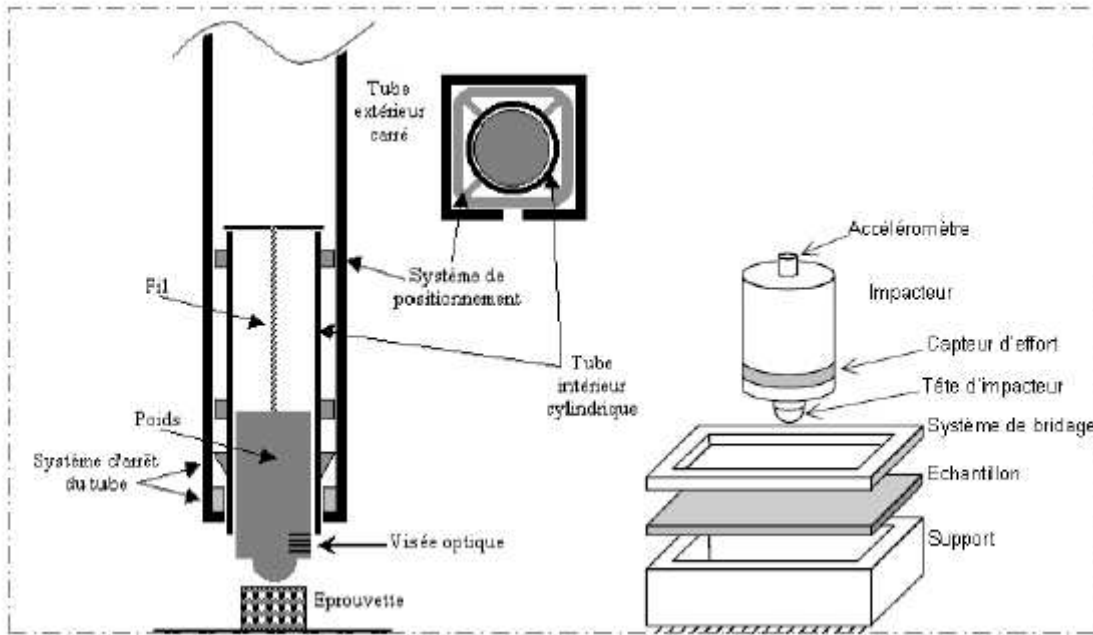


Fig. 2. Dispositif d'essai par poids tombant.

Les éprouvettes sont caractérisées en CAI sur une machine de compression SCHENCK de 45 tonnes (fig. 3). Les éprouvettes sont insérées dans un montage spécifique permettant à la fois d'appliquer la compression et d'éviter le flambage général. Les deux faces inférieures et supérieures des éprouvettes ont été rectifiées après impact pour assurer une bonne qualité de l'essai. Les éprouvettes sont instrumentées de 3 jauges extensométriques collées sur les deux faces pour permettre le contrôle de l'application de l'effort. La *contrainte moyenne de compression après impact* est mesurée.

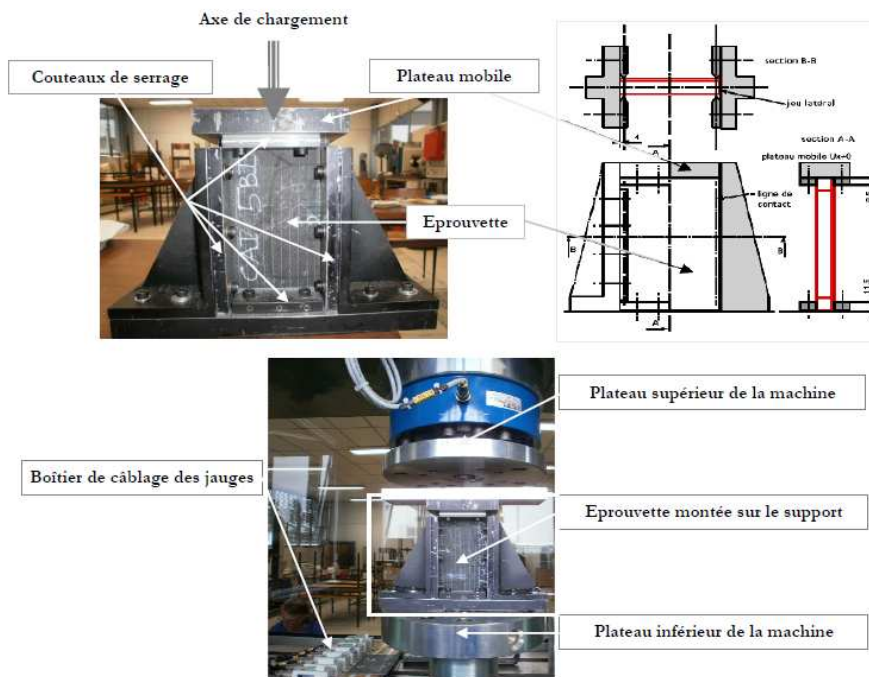


Fig. 3. Essai de compression après impact.

3. Résultats expérimentaux et analyse.

3.1 Résultats bruts des essais d'impact et de compression après impact.

Les propriétés mesurées à la suite des 60 essais d'impact et de compression après impact sont synthétisées dans les tableaux suivants. Chaque valeur est la moyenne des 6 essais et l'écart type est donné. Dans ce tableau, on donne en outre l'énergie élastique, ce qui permet de vérifier la validité des essais car la somme $E_a + E_e$ doit être égale aux 35 Joules de l'énergie d'impact (aux dispersions près). Une analyse rapide de ces résultats brut montre que les caractéristiques à l'impact sont meilleures pour les stratifiés cousus ce qui est attendu. Seule une analyse statistique plus fine peut mettre en évidence des liens moins triviaux.

Tab. 2. Résultats expérimentaux moyens des stratifiés infusés à l'impact.

Conditions de fabrication		Propriétés moyennes d'impact										
N°	Exp.	Dépl. δ_{max} (mm)	Ecart type (δ_{max})	Empr. α_p (mm)	Ecart type (α_p)	Energie absorbée E_a (J)	Ecart type (E_a)	Energie élastique E_e (J)	Ecart type (E_e)	Surface endom. S_e (mm ²)	Ecart type (S_e)	
Non cousus	1	CAI 1V	5.98	0.30	0.45	0.10	20.25	0.99	15.71	0.77	6916.00	639.56
	2	CAI 1I	5.85	0.44	0.46	0.04	19.29	0.87	15.99	1.05	6057.33	1273.70
	3	CAI 2V	6.34	0.30	0.56	0.08	20.37	1.25	15.76	1.08	6727.67	834.30
	4	CAI 2I	6.28	0.30	0.50	0.07	19.60	1.33	15.61	1.29	7686.33	578.37
Cousus	5	CAI 3V	6.36	0.67	0.42	0.09	18.75	0.67	17.20	0.64	5801.33	1308.07
	6	CAI 3I	5.92	0.21	0.38	0.07	18.33	1.41	17.00	1.22	6259.83	1536.98
	7	CAI 4V	5.95	0.03	0.50	0.03	18.77	1.34	17.72	1.02	4942.00	690.82
	8	CAI 4I	5.77	0.06	0.40	0.06	19.13	0.87	15.93	0.65	5603.83	488.94
	9	CAI 5V	5.89	0.08	0.43	0.06	19.02	1.04	17.28	0.84	4837.83	190.46
	10	CAI 5I	6.07	0.16	0.42	0.05	19.69	1.75	16.50	1.09	5199.83	922.06
Moyennes sur 8 lignes		6.06	/	0.45	/	19.29	/	16.36	/	6154.72	/	

Tab. 3. Résultats expérimentaux moyens des stratifiés infusés en compression après impact.

Conditions de fabrication		Propriétés moyennes de CAI	
N°	Exp.	RCAI (MPa)	Ecart type (RCAI)
1	CAI 1V	148.11	6.23
2	CAI 1I	154.19	15.49
3	CAI 2V	146.42	12.24
4	CAI 2I	138.75	3.33
5	CAI 3V	189.58	5.73
6	CAI 3I	182.44	22.48
7	CAI 4V	182.42	6.87
8	CAI 4I	188.36	7.46
9	CAI 5V	183.12	10.59
10	CAI 5I	187.31	22.64
Moyennes sur 8 lignes		166.89	/

3.2 Analyse statistique.

L'expression linéaire du modèle général du plan d'étude est l'équation 1. Elle est obtenue par régression multilinéaire. Les équations 2 à 7 représentent les modèles réduits trouvés pour chaque propriété étudiée à savoir le déplacement maximal de l'impacteur (δ_{\max}), l'empreinte ou l'indentation permanente (α_p), l'énergie absorbée (E_a), l'énergie élastique (E_e), la surface endommagée (S_e) et la résistance en compression après impact (RCAI). Elles sont constituées chacune de ses paramètres d'analyses influents de manière très significatives (TS) ou significatives (S) sur le résultat. Les paramètres influents sont en valeurs codées (-1 et 1) et affectés de leur coefficient chacun dans les équations (a_p). Pour un codage à -1 pour les valeurs basses des paramètres influents, l'on obtient des réponses minimales tandis que pour un codage à 1 (valeur haute de paramètre), les valeurs des propriétés étudiées sont maximales. C'est ainsi qu'un stratifié infusé non cousu absorbe une énergie de 19.86 J et a une résistance maximale en compression après impact de 147.21 MPa par rapport à 18.74 J et 185.67 MPa respectivement pour un stratifié infusé cousu (Eq. 4 et 7). Les résultats de l'analyse sont représentés ci-après :

$$Y = C + a_{C_o} C_o + a_{T_c} T_c + a_{N_{td}} N_{td} + a_{C_p} C_p + a_{N_v} N_v \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\delta_{\max} = 6.06 + 0.16 N_{td} - 0.10 C_p \quad (\text{Eq. 2})$$

$$\alpha_p = 0.46 - 0.03 C_o - 0.03 T_c - 0.03 C_p \quad (\text{Eq 3})$$

$$E_a = 19.30 - 0.56 C_o \quad (\text{Eq 4})$$

$$E_e = 16.35 + 0.59 C_o \quad (\text{Eq 5})$$

$$S_e = 6135.47 - 533.42 C_o + 433.63 N_{td} \quad (\text{Eq 6})$$

$$\text{RCAI} = 166.44 + 19.23 C_o \quad (\text{Eq 7})$$

Le tableau de synthèse des sensibilités est donné ci-après :

Tab. 4. Synthèse de l'influence des paramètres procédés sur les propriétés à l'impact et en CAI.

Paramètres d'analyses	Propriétés en l'impact et après l'impact					
	δ_{\max}	α_p	E_a	E_e	S_e	RCAI
Couture (C_o): De « sans » à « avec »		TS (-)	TS (-)	TS (+)	TS (-)	TS (+)
Nombres de tissu drainant (N_{td}): De 1 à 2	TS (+)				TS (+)	
Côté de plaque (C_p): Du côté vide au côté injection	S (-)	S (-)				
Niveau de vide (N_v): Du poussé au moins poussé						
Température de Cuisson (T_c): De 160°C à 180°C		TS (-)				

Ce tableau montre de manière attendue que l'effet de la couture est très significatif sur les propriétés mécaniques et morphologiques liées à l'impact avec aussi un apport de la méthodologie des plans d'expériences en termes de sens de variation. Ces résultats sont cohérents par rapport à la littérature et seront détaillés dans le paragraphe suivant. D'autres paramètres procédés apparaissent de manière plus inattendue en particulier sur la profondeur d'indentation permanente. Cette problématique sera traitée de manière spécifique.

3.3 Influence de la couture

Les résultats de l'analyse statistique trouvés au paragraphe précédent sont synthétisés fig. 4. La couture provoque une diminution de la profondeur d'empreinte de 0.07mm (-14%), de l'énergie absorbée de 1.13 J (-5.6%), et de la surface endommagée d'environ 10.67cm² (-16%). En revanche les stratifiés infusés cousus ont une résistance maximale en compression après impact supérieure de 38.45 MPa (+26%) par rapport aux non cousus. Ces résultats relèvent d'un effet « structure » donné par le renforcement des pièces dans l'épaisseur par couture, ce qui est tout à fait attendu. Les résultats trouvés par analyse statistique sont logiques du fait qu'une structure qui absorbe moins d'énergie sera moins apte à la propagation de dommages au travers de son volume.

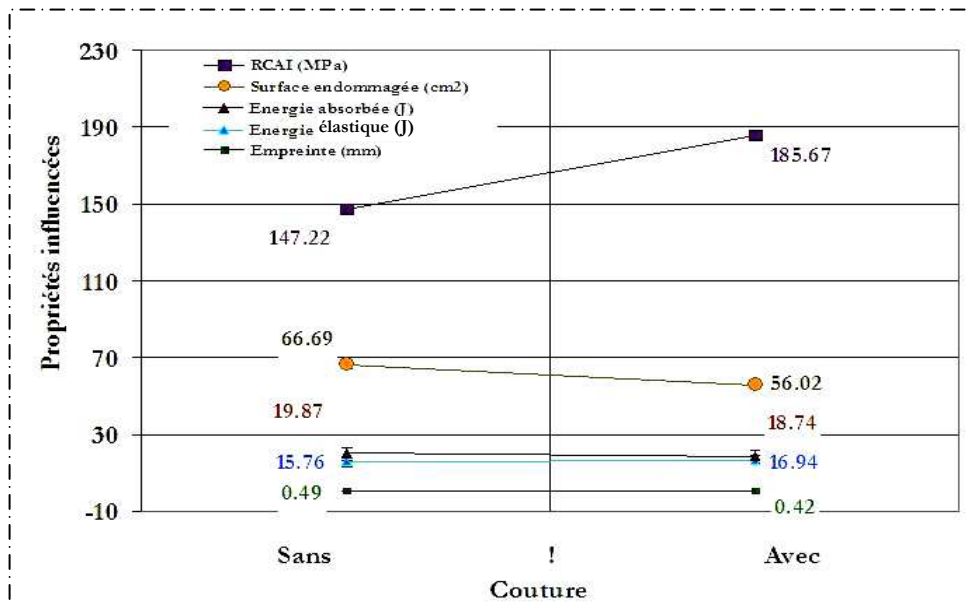


Fig. 4. Résultats statistiques liés à l'influence de la couture sur les propriétés à l'impact en post-impact.

En outre, il est intéressant de relier la surface délaminée à la RCAI (fig. 5). On constate bien une diminution de la résistance résiduelle quand la surface délaminée augmente et ce sans effet significatif direct apparent de la couture. Ce résultat est aussi conforme à la littérature.

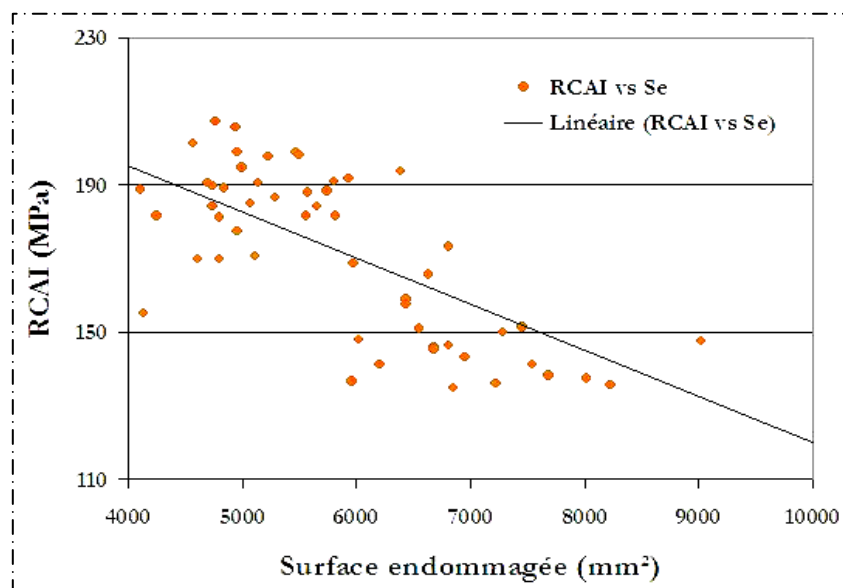
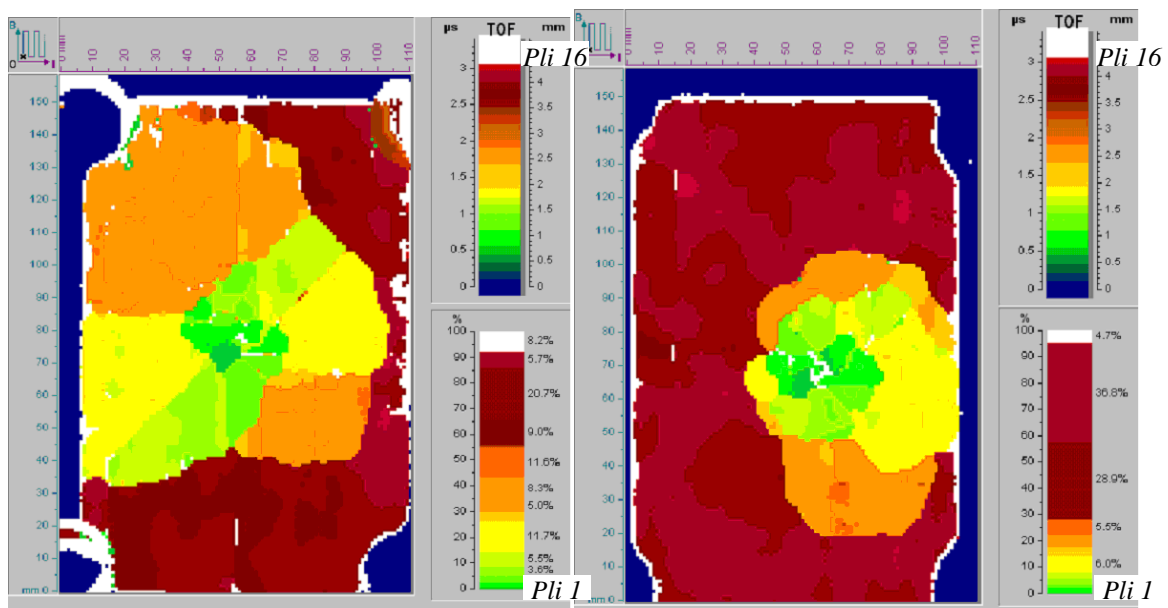


Fig. 5. Résultats expérimentaux en RCAI fonction de la surface endommagée.

L'analyse par C-Scan des surfaces délaminées illustre bien les différences entre les plaques cousues et non cousues. Dans la majorité des cas, les dommages créés par impact sur ces stratifiés infusés sont étendus jusqu'au bord de la pièce des plaques impactées. Ce phénomène est encore plus accentué pour des plaques avec des préformes non cousues par rapport à celles à préformes cousues (fig. 6). On remarque quand même une perte de symétrie de la cartographie des délaminages quand ceux-ci « touchent » le bord de la plaque. D'une manière générale les dommages observés dans ces quadri-axiaux NCF infusés sont de grandes dimensions par rapport à un équivalent en UD polymérisé à l'autoclave. Des augmentations importantes de surfaces délaminées se produisent aux interfaces entre quadri-axiaux. Il a été montré par des observations microscopiques [16] que ces interfaces sont des zones riches en résine ce qui doit favoriser la croissance locale des délaminages. De ce fait, il est logique que la présence des fils de couture renforce cette interface ce qui limite globalement l'étendue de la surface délaminée. La présence de ces zones riches en résines se retrouve aussi dans les process autoclave, il s'agit d'un phénomène lié à la rigidité intrinsèque des quadriaxiaux [3; 7].



Plaquette de stratifié non cousu

Plaquette de stratifié cousu impactée

Fig. 6. Faciès des délaminages plaques cousues et non cousues.

3.3 Effets sur l'indentation permanente.

L'analyse statistique a révélé que les paramètres procédés coté plaque et température de cuisson avaient des effets significatifs ou très significatifs sur la profondeur d'indentation permanente. L'application de la formule (Eq. 3) obtenue par régression multilinéaire montre que les empreintes sont plus profondes coté vide de 13% et diminue de 10.4% quand la valeur de la température de cuisson passe de 160°C à 180°C. Le lien peut sembler difficile à établir mais nous proposons l'explication suivante liée à un résultat précédent du laboratoire. En effet, il a été montré que dans le cas d'un stratifié fortement orienté, un phénomène de blocage de débris dans les fissures matricielles se produisait et empêchait le retour élastique après impact [18]. Or dans une autre partie liée à cette étude [16], les paramètres procédés identifiés généraient une présence significative de macros porosités du côté vide par rapport au côté injection et lorsque la température de cuisson était plus élevée (voir fig. 7). De plus, ces macros porosités se trouvaient en grande partie dans les zones riches en résine. Enfin, ces cavités de vide à l'intérieur des structures étaient plus accentuées lorsque les stratifiés comportaient 4 couches de NCF. Si l'on suit l'hypothèse que l'indentation résiduelle est liée à un phénomène de blocage de débris dans les vides laissés par les fissures

matricielles, il y a une forte présomption que la présence de ces cavités initiales favorise ce phénomène et génère par conséquent des indentations plus profondes.

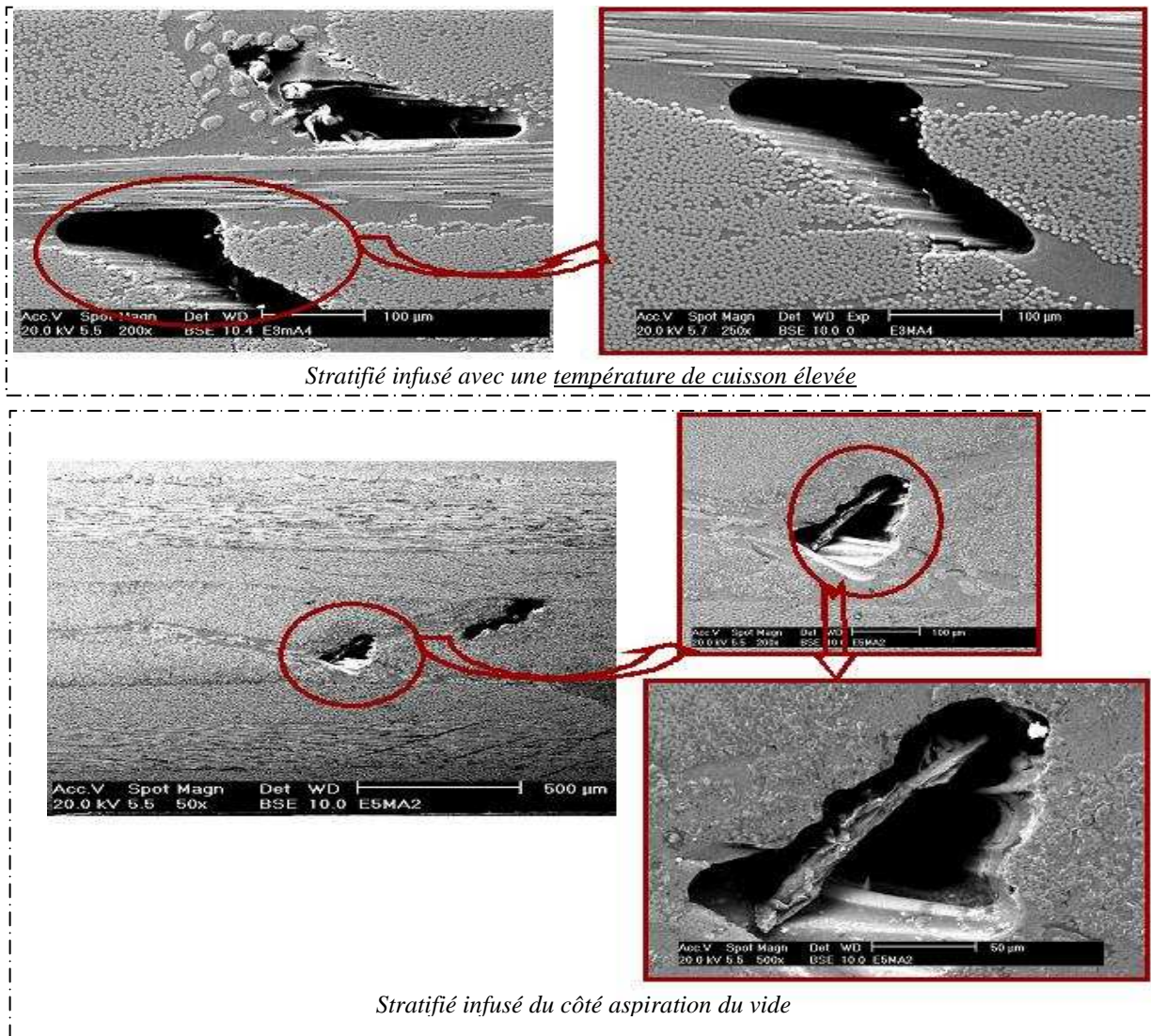


Fig. 7. Exemple de macroporosités obtenues coté vide et à température de cuisson élevée.

4. Conclusions

Une étude dans le but d'établir des liens entre les paramètres procédés de fabrication de stratifiés en tissus de fibres de carbone NCF et de résine époxy RTM 6, et leur propriétés en impact et en compression après impact (CAI) a été effectuée. Un plan d'expériences de la table de Taguchi de type $L_8(2^7)$ a été mené à bien. Les stratifiés infusés ont été impactés à l'aide d'un système de poids tombant à basse énergie (35 J) permettant d'avoir une profondeur d'empreinte autour de 0.3 mm (supérieure au BVID) et une basse vitesse de l'ordre 4 m/s. Les propriétés en impact et en CAI des stratifiés infusés ont par la suite été analysées statistiquement et des analyses morphologiques complémentaires des plaques endommagées ont permis de comprendre les phénomènes et modes de propagation des dommages.

En accord avec la littérature, la couture est le paramètre principal ayant un effet sur chacun des paramètres liés à l'impact à l'exception du déplacement de l'impacteur. La couture réduit globalement l'absorption d'énergie du stratifié. Ce phénomène se traduit par la limitation de la propagation des dommages à l'intérieur du matériau et la diminution de la surface endommagée. Ceci concourt à l'augmentation de la résistance en CAI des stratifiés infusés. Il est montré aussi que

la RCAI diminue en moyenne quelque soit le stratifié impacté lorsque sa surface endommagée augmente, et ce sans effet direct apparent de la couture. Des analyses microscopiques par des observations et des contrôles non destructifs (ultrasons C-scan et microscope binoculaire) sur les stratifiés impactés ont été faites afin d'étayer ces remarques. Des propagations importantes de dommages sont observées dans ces stratifiés infusés créant ainsi une perte de symétrie de la cartographie des délaminages car ils touchent dans la plupart des cas le bord de la pièce impactée.

Il est admis que la fissuration matricielle est le premier type de dommage à être créé puis les endommagements se poursuivent par délaminage entre les plis. D'après l'expérience du laboratoire, l'indentation permanente serait due à un phénomène de blocage de débris dans ces fissurations matricielles. Or le plan d'expérience a relevé une sensibilité de la profondeur d'indentation aux paramètres procédés coté plaque et température de cuisson. Ce point peut s'expliquer dans ce cas par la création de macroporosités qui favoriseraient la création et la coalescence de fissures et par voie de conséquence maximiseraient le phénomène de blocage de débris. Au global, à part cet effet sur l'empreinte, l'étude a permis de montrer que le mode de fabrication par infusion de résine lui-même n'a pas d'effet significatif sur le comportement à l'impact des stratifiés réalisés par ce procédé hors-autoclave.

Références

- [1] Takeda, Nishiyama, Hayashi and al., "Research in the Application of the Vartm Technique to the Fabrication of Primary Aircraft Composite Structures." Mitsubishi Heavy Industries, Technical Review Vol. 42 (No. 5), 2005.
- [2] Javier Toral Vasquez. Identification et modélisation du comportement des structures composites assemblée par cloutage. Thèse Université de Toulouse, 2009. <http://oatao.univ-toulouse.fr/4181/>
- [3] Lundström, "The Permeability of Non-Crimp Stitched Fabrics." Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 31, (12), 2000, 1345-1353.
- [4] Trochu, Ruiz, Achim et Soukane, "Advanced Numerical Simulation of Liquid Composite Molding for Process Analysis and Optimization." Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 37, (6), 2006, 890-902.
- [5] Celle, Drapier et Bergheau, "Numerical Modelling of Liquid Infusion into Fibrous Media Undergoing Compaction." European Journal of Mechanics - A/Solids 27, (4), 2008, pp. 647-661.
- [6] Govignon, Bickerton, Morris et Kelly, "Full Field Monitoring of the Resin Flow and Laminate Properties During the Resin Infusion Process." Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 39, 2008, 1412-1426.
- [7] Klunker, Aranda, Ziegmann et al., Permeability and Compaction Models for Non Crimped Fabrics to Perform 3d Filling Simulations of Vacuum Assisted Resin Infusion. The 9th International Conference on Flow Processes In Composite Materials, 2008, Montréal (Québec), Canada.
- [8] Yenilmez, Senan et Sozer, "Variation of Part Thickness and Compaction Pressure in Vacuum Infusion Process." Composites Science and Technology Vol. 69, (11-12), 2008, 28 pages.
- [9] Lawrence, Neacsu et Advani, "Modeling the Impact of Capillary Pressure and Air Entrapment on Fiber Tow Saturation During Resin Infusion in LCM." Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 40, (8), 2009, 1053-1064.
- [10] Teemer, Okoli et Liang, "The Effect of Processing Parameters on the Mechanical Properties of Components Manufactured Using the Resin Infusion between Double Flexible Tooling Process, ." SAMPE '06 Long Beach, Vol. 51, 2006, 9 pages.
- [11] Donadon, Falzon, Iannucci et Hodgkinson, "Intralaminar Toughness Characterisation of Unbalanced Hybrid Plain Weave Laminates." Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 38, (6), 2007, 1597-1611.
- [12] Mattsson, Joffe et Varna, "Methodology for Characterization of Internal Structure Parameters Governing Performance in NCF Composites." Composites Part B: Engineering 38, (1), 2007, 44-57.
- [13] Timms, Mulchandani, Govignon et Bickerton, Identifying Sources of Variability in the Mechanical Performance of Resin Infused Textile Composites. The 9th International Conference on Textile Composites (TexComp9), 2008, Newark, DE.
- [14] Wei et Zhang, "Characterization of Microstructure in Stitched Unidirectional Composite Laminates." Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 39, (5), 2008, 815-824.
- [15] Liotier, Vautrin et Delisée, "Characterization of 3d Morphology and Microcracks in Composites Reinforced by Multi-Axial Multi-Ply Stitched Preforms." Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 41, (5), 2010, 653-662.
- [16] Alvine Njionhou Kepnang, « Contribution à l'étude des variabilités des propriétés des stratifiés fabriqués par infusion de résine liquide ». Thèse, Université de Toulouse, 2011.
- [17] Aminanda, Castanié, Barrau, Thevenet, "Experimental and numerical analysis of the compression-after-impact of metal-skinned sandwich structures. Composites Science and Technology 69 (2009), pp. 50-59
- [18] Abdallah E., Bouvet C., Rivallant S., Barrau J.J., "Experimental Analysis of Damage Creation and Permanent Indentation on Highly Oriented Plates." Composites Science and Technology 69, 2009.