

## Réparation de pièces structurales monolithiques aéronautiques

### *Repair of primary monolithic aeronautics structures*

Francis Collombet<sup>1</sup>, Laurent Crouzeix<sup>1</sup>, Yves-Henri Grunevald<sup>2</sup>, Yves Davila<sup>1</sup>, Bernard Douchin<sup>1</sup> et Nathalie Rocher<sup>1</sup>

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

Espace Clément Ader, 3 rue Caroline Aigle, 31400 Toulouse

francis.collombet@iut-tlse3.fr, laurent.crouzeix@iut-tlse3.fr, yves.davila@iut-tlse3.fr, bernard.douchin@iut-tlse3.fr, nathalie.gleizes@iut-tlse3.fr

2 : Composites, Expertise & Solutions

131 Traverse de La Penne aux Camoins, 13821 La Penne-Sur-Huveaune

yh.grunevald@composites-expertise-solutions.com

### Résumé

La réparation des structures composites primaires principales est un des grands défis dans le moyen terme avec l'entrée massive en service de la flotte des A350 et B787. Pour contribuer à y répondre, on présente la boîte à outils ETMI (Evalueur Technologique Multi-Instrumenté) qui est une approche dédiée à la conception de structures composites. Nous proposons d'étudier une réparation à bord d'un évalueur disposant des mêmes caractéristiques que la pièce industrielle en termes de fabrication, matériaux, champs de contraintes et qui est testé en utilisant divers moyens métrologiques avec l'appui d'un bâti d'essai modulaire original. Cet article décrit sur un exemple l'approche de la boîte à outils ETMI au travers des différentes étapes suivantes : choix de la zone d'intérêt, conception numérique de l'essai, fabrication, usinage et réparation, essais mécaniques et analyse post mortem.

### Abstract

Repair of main primary composite structures is a great challenge in the medium term with the entry into service of the A350 and B787 fleets. To address this question, the MITE Toolbox (Multi-Instrumented Technological Evaluator) is introduced for composite components design. For large bonded repairs of primary structure, we develop a representative specimen having the same characteristics as the original in terms of manufacture, materials, stress fields, and is tested using diverse metrological means with the support of an original multi-axial set-up. This paper presents an example the MITE Toolbox approach illustrated through the following steps: choosing critical zone, numerical design of the test, manufacturing, machining and repair, mechanical tests and post-mortem analysis.

**Mots Clés :** pièces structurelles monolithiques, réparation, usinage par jet d'eau, Evalueur Technologique Multi-Instrumenté

**Keywords:** monolithic structural part, repair, abrasive water jet milling, Multi-Instrumented Technological Evaluator

### 1. Introduction

Ce papier porte sur une méthodologie innovante basée sur le concept d'évalueur technologique multi-instrumenté (ETMI) [1]. Ce concept est né d'une association entre l'ICA et la TPE Composite Expertise & Solutions. L'ETMI est une structure (i.e. une pièce unique ou un assemblage de pièces) développée spécifiquement pour répondre à un ensemble de problématiques choisies. Le nombre de problématiques n'est pas limité mais nécessite généralement pour opérer de trouver un compromis. Dans les approches multi-échelles, l'ETMI permet de séparer les problèmes afin de mieux comprendre le rôle de chacun dans les interactions entre les phénomènes. L'ETMI est alors un séparateur d'influence. Il est aussi un intégrateur quand il permet la prise en compte de phénomènes présumés et/ou futurs ; e.g. l'influence de variabilités associées au futur processus industriel. Comparé à l'objet d'étude réel, l'ETMI est de dimensions et complexité réduite pour être produit et testé à un coût compétitif. Il devient alors possible de le produire en plus grand nombre ce qui permet de disposer de données statistiques et/ou d'étudier l'influence de certaines variabilités. Cette approche d'étude scientifique s'adosse en quasi statique à un bâti d'essai modulaire multiaxial, conçu au laboratoire à partir d'un cahier des charges attaché à cette problématique d'étude. La conception de ces essais s'effectue par l'utilisation d'outils numériques. Elle porte sur la gestion couplée du design de la géométrie des évalueurs et des conditions aux limites intégrant la cinématique des actionneurs

en lice (un à quatre vérins électriques dans la configuration actuelle). Par nature, l'approche étant dédiée à la réponse au cas par cas de problématiques multi-échelles, les applications intéressent un spectre large de situations comme celle de la tenue d'une réparation en escalier [2]. Une modélisation allégée adaptée est nécessaire pour la conception de l'essai et permet de faciliter la démarche croisée entre les calculs et les essais. Elle concerne les réparations quasi-flush avec une interface de collage constituée de marches d'escalier. On substitue à un modèle numérique 3D, une représentation plus légère grâce à la modélisation de la structure initiale ou parent ainsi que le patch de réparation, via des éléments coques composites. Le film adhésif est représenté par des éléments volumiques isotropes. La cinématique de l'ensemble est restituée via la jonction des plans du substrat composite par des éléments de poutres rigides. Le gain est significatif et autorise des modèles avec typiquement 14 fois moins de ddls pour un temps de calcul 11 fois plus court qu'un modèle équivalent volumique. Dans cette étude, les dimensions de l'évaluateur sont typiquement de l'ordre de 600 mm de long par 450 mm de large pour 16 plis d'UD dans l'épaisseur.

## 2. Fabrication des évaluateurs composites

Les évaluateurs sont fabriqués à partir de pré-imprégnés de fibres de carbone T300 CHS et de matrice époxy M10.1 de classe 120. Ces matériaux sont utilisés dans le transport terrestre mais disposent de caractéristiques mécaniques équivalentes à ceux de classe 180 mis en œuvre pour la fabrication de pièces aéronautiques. Ils présentent l'intérêt d'être moins onéreux pour des conditions de polymérisation moins contraignantes en termes de température de polymérisation (120 °C au lieu de 180 °C) et de pression appliquée dans l'autoclave (5 bar au lieu de 7 bar). L'évaluateur destiné à l'étude de la réparation est constitué de 16 plis pour une épaisseur totale de 4.2 mm avec un échantillonnage défini par la séquence d'empilement [0,45,90,-45,-45,90,45,0]<sub>s</sub> qui est celle d'un quasi isotrope très utilisé en aéronautique. Il est polymérisé en autoclave avec un maintien en température à 120 °C pendant deux heures sous une pression 5 bar après un premier palier de 3 bar à 80 °C pendant 30 mn. Pour cette étude, on suppose arbitrairement la présence d'une zone endommagée de forme elliptique dont l'emprise correspond à une ellipse de grand axe 120 mm et de petit axe 60 mm (cf. Fig. 1 b). Les dimensions de l'évaluateur dans le plan sont respectivement de 600 mm pour la longueur et de 450 mm pour la largeur. En effet, elles sont choisies pour recevoir une réparation de contour fermé dont la forme est celle d'une ellipse de grand axe 408 mm et de petit axe 348 mm (cf. Fig. 1 a), dimension correspondant à l'exécution de 16 marches de 8 mm à partir de l'emprise du défaut elliptique (cf. Fig. 1 b).

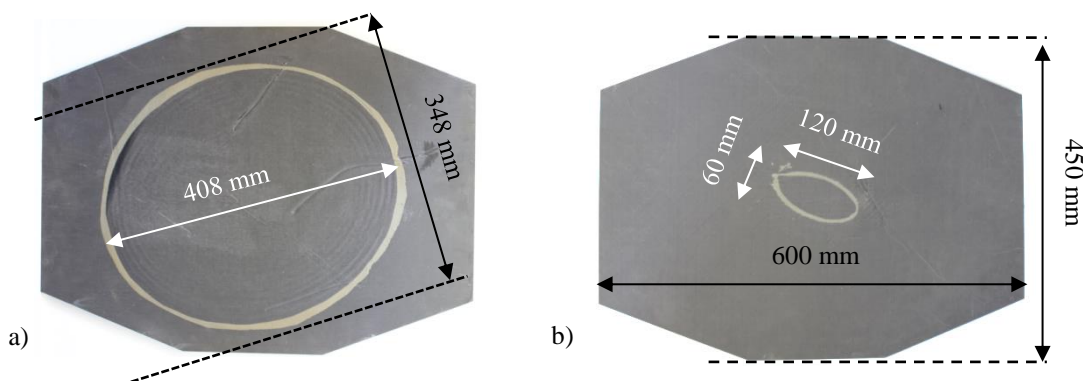


Fig. 1. Vues de la géométrie de l'évaluateur de réparation 16 plis d'UD avec son patch avec a) vue de dessus définissant l'emprise du patch et b) vue de dessous indiquant le caractère débouchant de la réparation.

Le mode d'enlèvement de matière choisi est celui d'une machine par Jet d'eau abrasif. Cette technique permet un usinage qui est indépendant d'une référence machine extérieure à la pièce (à la différence des machines conventionnelles par outils coupants). On parle d'enlèvement de matière offset. En effet, ce mode d'usinage présente l'intérêt de pouvoir traiter la présence de variabilités géométriques

comme l'ondulation des plis [3], variabilités inhérentes au caractère « composite » des matériaux utilisés. Il permet donc un enlèvement pli par pli de la matière. C'est la raison pour laquelle Airbus a choisi de qualifier ce type d'enlèvement matière, d'autant que les solutions par outils coupants concurrentes ne présentent pas la mobilité et la légèreté requises pour pouvoir opérer en n'importe quel endroit du fuselage ou de la voilure d'un aéronef. La société toulousaine Bayab Industries développe et commercialise une machine portable (REPLY.5) d'usinage par abrasion, machine qualifiée par Airbus pour la flotte des A350 [4]. Il s'agit du seul système portable de masse inférieure à 50 kg adapté à l'usinage de réparation automatisé des composites.

### 3. Conditions d'enlèvement de matière

Dans le cadre de cette étude, le matériau composite multicouche est usiné grâce à une machine industrielle par Jet d'eau abrasif de l'Institut Clément Ader de marque Flow de type Mach 4 (cf. Fig. 2 a), prévue initialement pour la découpe des matériaux. Du sable (de référence Topgarnet™ 120 mesh), dont la granulométrie est comprise entre 125 et 250 microns, est transporté à grande vitesse ( $400 \text{ m.s}^{-1}$ ) par de l'eau projetée à 800 bar, par l'intermédiaire d'une buse guidée par un robot, pour un débit d'abrasif de  $350 \text{ g.min}^{-1}$ . La buse réalise un balayage de la surface à usiner avec une vitesse constante et égale à  $8 \text{ m.min}^{-1}$  (cf. Fig. 2 a). Les trajectoires rectilignes définissant ce balayage sont distantes de 1 mm. Chaque pli est usiné avec une profondeur de passe de l'ordre de 0.3 mm correspondant à son épaisseur et de façon indépendante de la distance entre la pièce et la buse. Les zones concernées par le changement de direction du jet sont protégées par des masques en acier. Ces masques permettent d'imposer la géométrie d'usinage souhaitée (ici marche de 8 mm pour chacun des plis pour correspondre au ratio de 1/30 entre la longueur de recouvrement et l'épaisseur des plis, ratio préconisé en aéronautique pour le recouvrement par collage des composites UD).

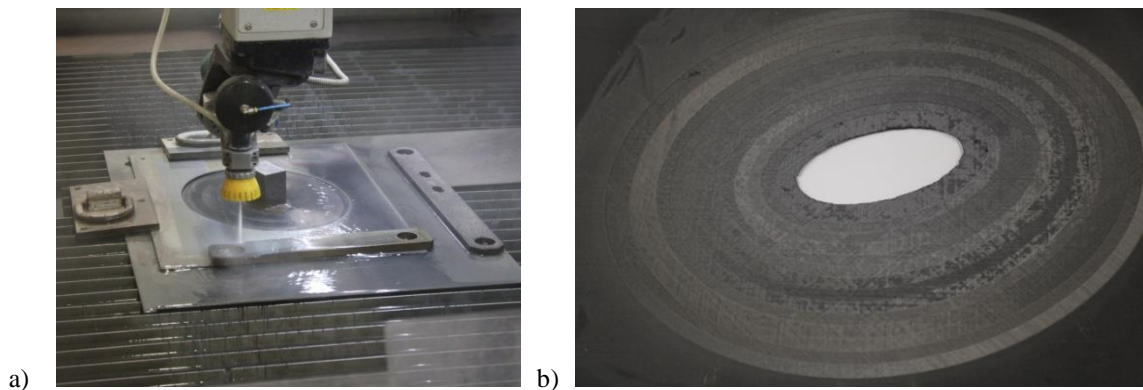


Fig. 2. Enlèvement de matière par jet d'eau abrasif avec a) vue de l'évaluateur recouvert par les masques d'acier durant l'usinage et b) vue de la zone en escalier après usinage et ces quinze marches.

Les différents masques sont préalablement découpés au Jet d'eau abrasif. En plus de leur fonction de protection des zones qui ne doivent pas être affectées par la présence du jet, ils ont aussi pour vertu d'assurer une bonne verticalité des contremarches, en évitant l'influence de la divergence du jet dans l'épaisseur du composite. En tout, 15 passes sont nécessaires pour obtenir l'interface en escalier destinée à accueillir le patch de réparation pour un temps, strictement circonscrit à l'usinage, de l'ordre de 4h30.

### 4. Fabrication d'un patch de réparation

Dans ce cas, le patch est constitué du même matériau que la partie parent ce qui est proche d'une situation industrielle mise en œuvre par Airbus. On utilise ici un film adhésif de type Redux® 609 de classe 120. On se place dans une situation de co-cuisson du patch avec, comme moyen de polymérisation, une valise de réparation commercialisée par la société Aéroform® permettant le

déploiement de tapis chauffants. Le patch de réparation est un ensemble de 17 ellipses de matériau composite HexPly® M10.1/38%/T300 CHS (cf. Fig. 3 a). Les ellipses constitutives du patch sont centrées et de tailles différentes pour créer une structure en escalier de marches 8 mm. La séquence d'empilement du patch de réparation est identique à celle de la structure parent mais avec un décalage d'un pli vers le haut et l'ajout d'un pli supplémentaire à 0° du fait du caractère débouchant de l'usinage soit [0/45/90/-45/-45/90/45/0/0/45/90/-45/-45/90/45/0/0]. Comme l'illustre la Fig. 3 b, l'assemblage de clichés aux rayons X laisse apparaître des défauts de collage liés notamment au drapage manuel du patch. Il semble donc pertinent, pour juger de la tenue de zone réparée, d'identifier par le calcul un trajet de chargement permettant de piloter la localisation des flux de cisaillement/pelage dans le joint collé, et ce jusqu'au décollement du patch.

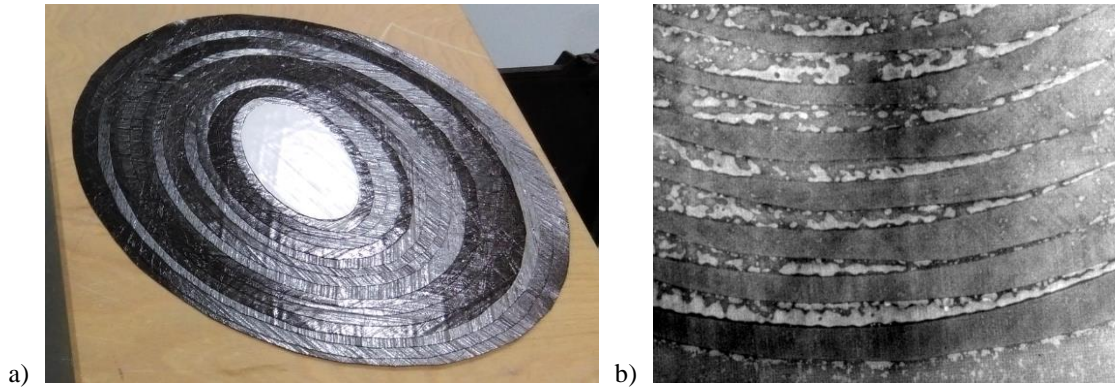


Fig. 3. Patch de réparation avec a) vue du patch après la phase de drapage manuel (avant polymérisation) et b) vue de clichés aux rayons X assemblés de la zone de collage (après polymérisation), mise en évidence de la présence de défauts de collage dus à la phase de drapage manuel.

Afin de faciliter une démarche croisée entre calculs et essais, une modélisation allégée est proposée dans le cadre de la démarche par évaluateurs technologiques multi-instrumentés. De plus, cette approche ouvre la possibilité de rendre compatible un modèle de zone réparée dans un modèle avion.

### 5. Modélisation allégée de la zone de réparation

Elle concerne les réparations quasi-flush avec une interface de collage en marches d'escalier. On substitue à un modèle numérique 3D, une représentation plus légère (cf. Fig. 4).

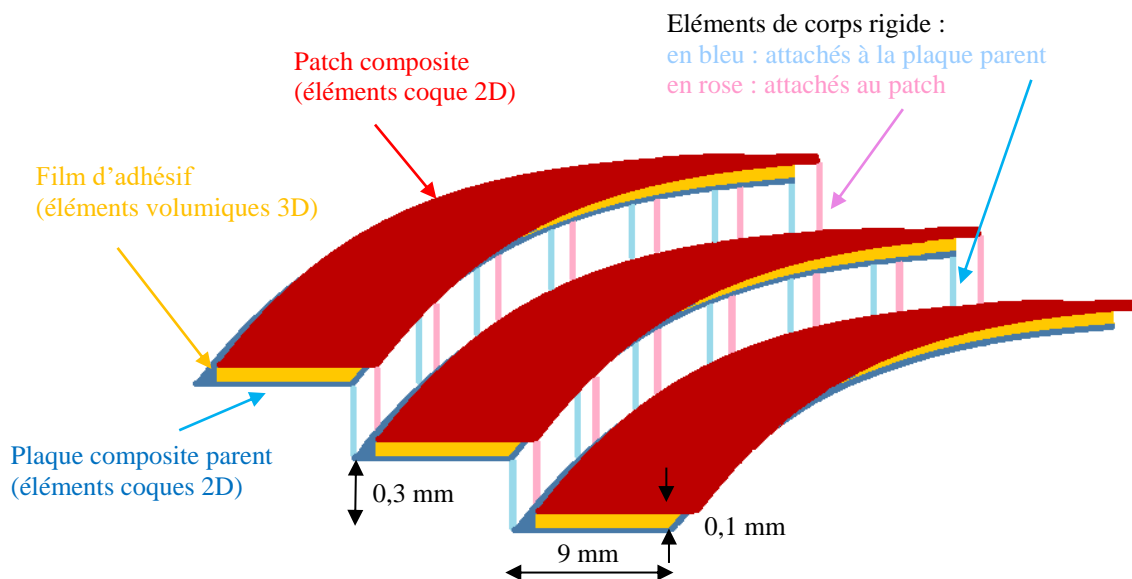


Fig. 4. Stratégie de modélisation allégée de la zone de collage en escalier (échelles non respectées).

La représentation de la structure initiale ou parent ainsi que le patch de réparation est réalisée via des éléments coques composites. Le film adhésif est représenté par des éléments volumiques isotropes. La cinématique de l'ensemble est restituée via la jonction des plans du substrat composite par des éléments de poutres rigides. Plus précisément, les substrats composites parent et patch sont modélisés par des éléments coques composites localisés sur la surface de contact avec le joint de colle, donc ici sur 16 surfaces non coplanaires différentes pour chaque partie (parent et patch). Le film adhésif est modélisé par des éléments volumiques possédant un élément dans l'épaisseur du joint. Les éléments poutres rigides sont utilisés pour relier les différentes parties non-jointives de chacun des substrats. Les fibres neutres de chaque substrat sont replacées dans leur position réelle, différente de la position de modélisation. On estime que le recours à une représentation des interfaces de l'adhésif par des éléments cohésifs, non seulement n'est pas nécessaire puisque le mode de rupture est essentiellement cohésif et non adhésif, mais viendrait alourdir inutilement l'approche numérique dont la vertu première est d'être légère. En effet, il s'agit de réaliser un nombre important d'itérations pour la conception de l'essai puis, après essais, un nombre important de croisements calculs essais en englobant la représentation du bâti d'essais lui-même.

## 6. Bâti multi-axial modulaire

Un bâti multi-axial modulaire est disponible au sein de l'Institut Clément Ader. Cette machine originale est destinée à recevoir des structures composites afin de considérer l'influence de différentes échelles sur la réponse des pièces. Le principe de fonctionnement de ce banc d'essais multi-axial repose sur deux ensembles mécaniques principaux et quatre vérins (cf. Fig. 5 a). La pièce centrale, de forme rectangulaire, reçoit le mors mobile de l'évaluateur. Les tiges de quatre vérins sont guidées par des liaisons rotules sur ce « rectangle » et sont fixées au bâti par des rotules à doigt. Cette configuration rappelle le principe des hexapodes mais avec seulement quatre vérins pour des raisons de coût. Pour rendre le système pilotable, une pièce appelée « bras » est intercalé entre le rectangle et le bâti fixe. Ce bras est en liaison rotule avec le rectangle et en liaison pivot d'axe horizontal transverse avec le bâti.

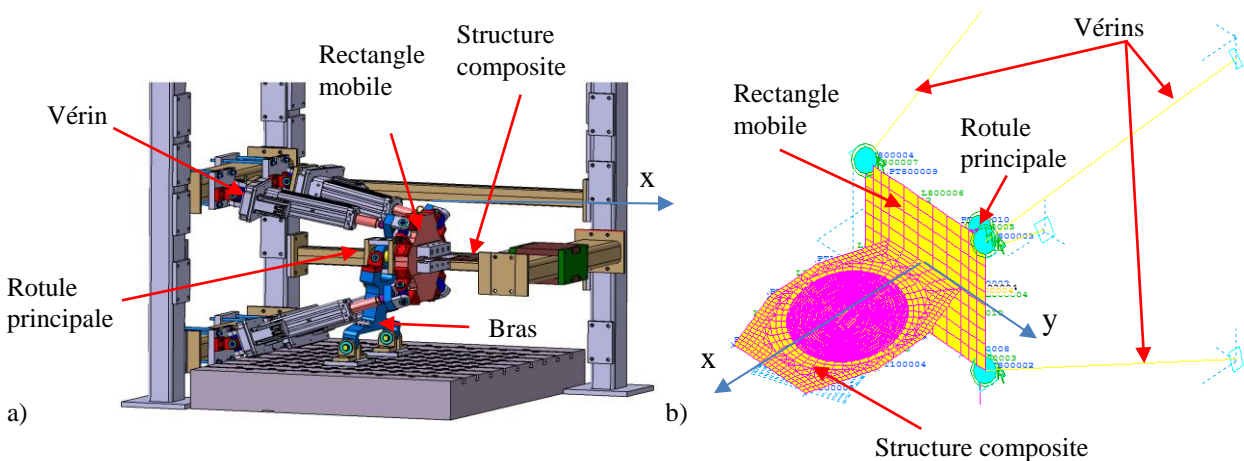



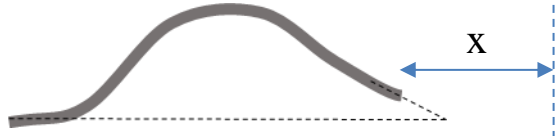
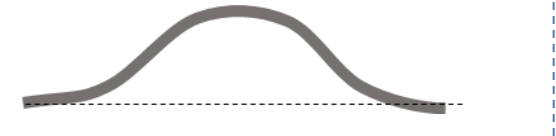
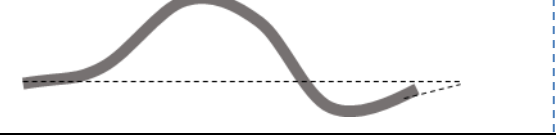
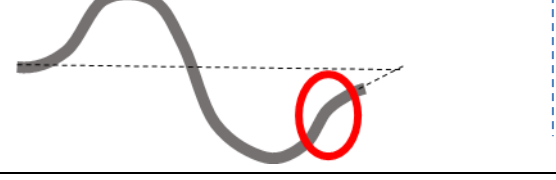
Fig. 5. Evalueur et bâti multi-axial avec a) CAO de la vue générale et b) modèle numérique associé (121634 ddls pour 12146 éléments).

L'évaluateur composite est attaché sur deux côtés opposés respectivement, au rectangle mobile et à une zone fixe du bâti d'essais. Ce rectangle est déplacé grâce au mouvement combiné des quatre vérins dont la position est pilotée en fonction du temps. Il est possible d'imposer un chemin de déplacement, numériquement défini en fonction des attendus du cahier des charges, pour imposer une nature de sollicitation en un endroit choisi de l'évaluateur (Fig. 5 b).

## 7. Design de la cinématique de l'évaluateur

La procédure d'identification de la cinématique de l'évaluateur est réalisée en devant tenir compte de toutes les contraintes technologiques liées à la machine d'essai (amplitude des mouvements, charges maximales appliquées aux vérins) et de certains choix de conception, notamment le fait qu'il ne faille pas atteindre un état critique pendant le trajet de chargement dans une autre zone de l'évaluateur que la zone d'intérêt. De plus, ici on souhaite limiter les déplacements hors plan de l'évaluateur afin de faciliter les mesures in situ par corrélation d'images numériques. Pour contrôler efficacement toutes ces contraintes, un modèle éléments finis de la machine d'essai est utilisé pendant toutes les phases de la conception de la cinématique (cf. Fig. 5 b). Les résultats finaux de cette longue procédure d'optimisation itérative sont présentés dans Tab. 1. Ce chargement original impose une déformée en forme de S (en vue de côté) de l'évaluateur. Il permet d'aboutir, via un trajet de chargement complexe, à un flambage en générant une double flexion (cf. Tab. 1). La déformée finale est obtenue par le biais de 5 étapes différentes de chargement. Une première phase, pour placer le système en flexion, est suivie d'une seconde phase de compression pour générer un premier flambage vers le haut. Ensuite dans une troisième phase, le mors mobile est remplacé en position horizontale grâce à une translation du rectangle vers l'arrière pour limiter des efforts excessifs dans les vérins, suivie d'une quatrième phase associée à une flexion dans la direction opposée (vers le bas). Une cinquième phase est associée à une flexion dans la direction opposée (vers le bas).

Tab. 1. Résultats du design de la cinématique de l'évaluateur avec différentes phases.

Etapes principales de la cinématique	Schémas de la déformée de l'évaluateur (vue latérale)	Rotation $\alpha$ (°) autour de la direction y du rectangle mobile	Déplacement horizontal x (mm) du centre de la rotule principale
1 : flexion + compression		7	4
2 : compression conduisant au flambement		7	7
3 : flexion avec un retour à la configuration initiale		0	5
4 : flexion dans la direction opposée à la précédente		-5.7	7
5 : compression pour déclencher un double-flambement		-5.7	12

Enfin, une compression est appliquée dans une cinquième phase grâce à une translation horizontale du mors mobile pour créer une deuxième courbure vers le bas, proche du mors mobile, tout en conservant la courbure vers le haut présente près du mors fixe (cf. Fig. 6 a). La zone d'intérêt, proche du mors mobile (mise en évidence par un cercle rouge dans le Tab. 1, phase 5) présente un

déplacement hors plan suffisamment faible pour être compatible avec une prise d'information par corrélation d'images numériques. L'adhésif dans cette zone est soumis à un état de contrainte mixte de pelage cisaillement. Le modèle numérique met en évidence une saturation du critère de défaillance cohésif de l'adhésif [5] [6] (critère non présenté ici) pendant la dernière phase de chargement (cf. Fig. 6 b).

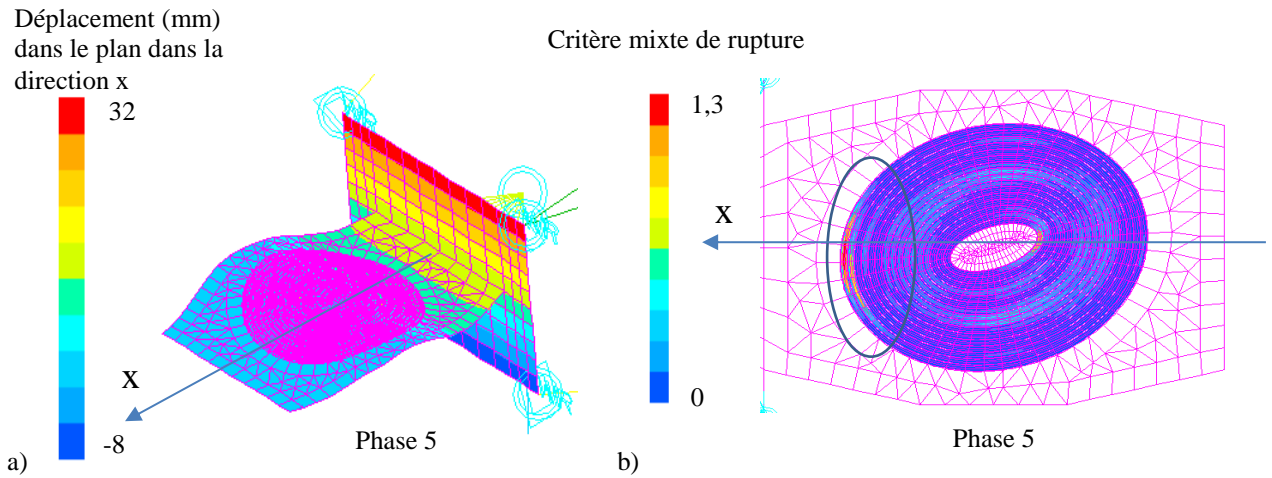


Fig. 6. Modélisation E.F. avec a) déplacement dans le plan dans la direction x lors du double flambement final et b) critère mixte de rupture au sein de l'interface collée lors du double flambement final dans la zone d'intérêt (entourée en bleu).

## 8. Réalisation de l'essai sur l'évaluateur de réparation à partir de la cinématique de vérins

Avant le test, l'évaluateur est équipé de talons moulés en HexTool® et collés qui permettent de placer l'évaluateur dans les mâchoires des mors fixe et mobile, ainsi que des jauges extensométriques en différents points de la surface. Il est aussi recouvert d'un mouchetis pour la mesure du champ de déplacements par corrélation d'images numériques (cf. Fig. 7 a). Le chargement identifié numériquement est appliqué de façon quasi-statique sur une durée d'environ 15 minutes entre le début du test jusqu'à la défaillance de la zone de collage de l'évaluateur. Le chargement complexe en cinq phases produit bien une déformée de l'évaluateur en accord avec la forme attendue (cf. Fig. 7 b).

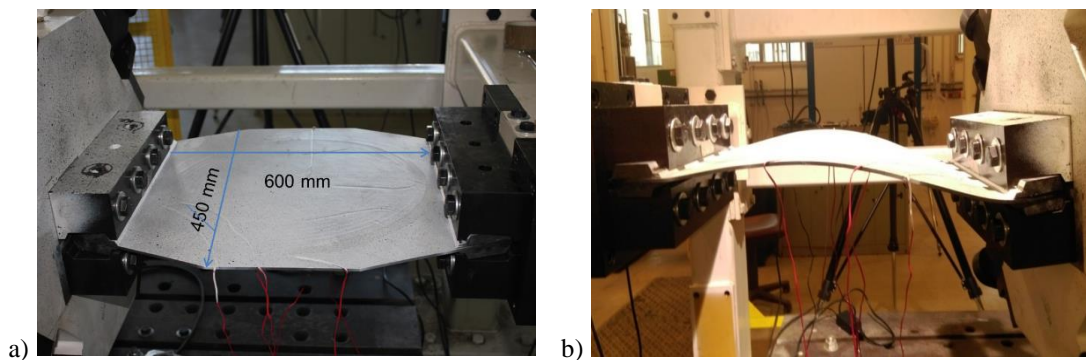


Fig. 7. Vue de l'évaluateur de réparation avec a) état de l'évaluateur au début de l'essai et b) déformée de l'évaluateur durant la 4<sup>ème</sup> phase du test mécanique.

Il est noté durant l'essais que les valeurs réelles dans les vérins sont un peu plus basses que celles calculées. De plus, la défaillance de la zone de collage de l'évaluateur se produit légèrement avant la charge prévue numériquement c'est-à-dire plutôt vers la fin de la quatrième phase. Ceci est notamment dû au fait que l'analyse E.F. est réalisée sur un modèle sans présence de défaut de réparation. Malgré cela, la défaillance de la zone de collage s'est produite dans la zone d'intérêt déterminée numériquement. L'observation des champs de déformation, obtenus à l'aide de l'instrumentation

optique, confirme que la cinématique sollicite bien la zone d'intérêt choisie dès la phase de conception, à savoir le contour de la dernière marche de collage, dans l'axe de l'évalateur et coté mors fixe (cf. Fig. 8). Juste avant la rupture, on note des déformations en compression de l'ordre de  $9.10^{-3}$  à la limite du patch, et une zone très localisée du même ordre de grandeur à la séparation entre la première et la deuxième marche. C'est de ce dernier point que se déclenche la rupture de la pièce. Dans cette zone, on note en effet quelques instants plus tard l'apparition d'une fissure le long du contour de la première marche qui a traversé la couche supérieure de la pièce (cf. Fig. 9 a). Une analyse aux rayons X post-mortem confirme que la rupture finale est causée par la présence de défauts inhérents à la procédure de réparation (cf. Fig. 9 b). On observe que la ligne de la fissure suit la ligne d'une poche en absence de résine présente au niveau de l'adhésif généré par un mauvais alignement des couches supérieures de la pièce de réparation. Ainsi, il est très intéressant de confirmer que la cinématique de test choisie permet de mettre en évidence une réponse sensible à la qualité de la réparation. À moyen et à long terme, cette méthodologie pourrait être utilisée pour comparer les réponses aux différents paramètres du procédé comme la procédure d'enlèvement du matériau, le type d'adhésif, la fabrication de la pièce de réparation, etc.

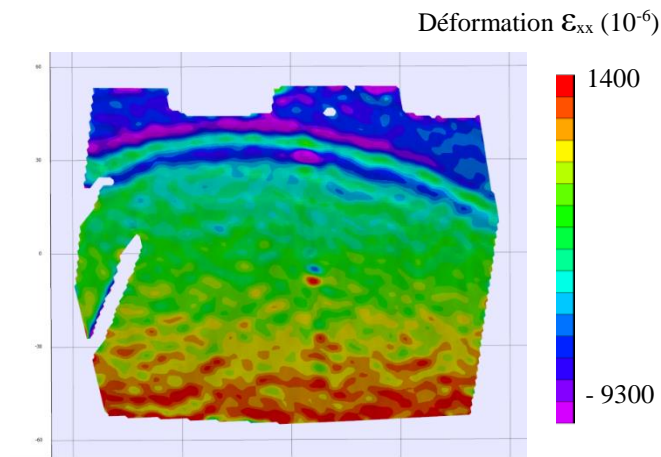


Fig. 8. Champ de déformations  $\epsilon_{xx}$  issu de la mesure de champs dans la zone d'intérêt sur l'évalateur juste avant la rupture.

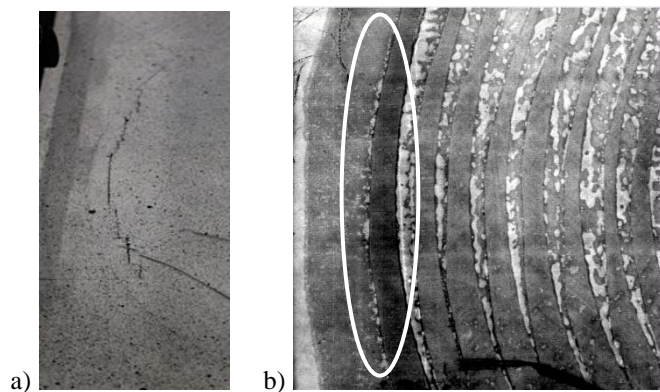


Fig. 9. Zone d'intérêt sur l'évalateur avec a) vue de la fissure traversant le mouchetis et b) assemblage de clichés aux rayons X soulignant le rôle des défauts initiaux dus aux conditions de fabrication du patch de réparation sur l'initiation de la fissure (entourée en blanc).

## 9. Conclusions et perspectives

La faisabilité de l'étude des réparations composites à l'aide d'une méthodologie par évaluateurs technologiques, à des échelles plus grandes que celles autorisées par les coupons élémentaires, est



démontrée. Elle permet de placer les zones réparées dans des situations qui peuvent être proches des conditions réelles de travail ou des conditions choisies à l'avance [2]. La méthodologie proposée permet au concepteur une étude des conditions de réparation à partir de la définition a priori d'un besoin. De plus, la faisabilité d'une modélisation E.F. d'une géométrie complexe (ici 15 surfaces non coplanaires) à l'aide de stratégies numériques légères et facilement utilisables du point de vue industriel a été démontrée. L'évaluateur présenté ici a été conçu pour un cas précis, c'est à dire la défaillance d'une réparation en escalier de contour fermé d'une surface initialement plane dans le cadre d'une sollicitation en mode mixte (cisaillement pelage). La méthodologie présentée est utilisable pour d'autres géométries et chargements mécaniques dans le cadre de la conception de systèmes composites assemblés par collage ou non. L'essai conçu dans cette étude permettra à terme la comparaison de différents processus de réparation, et en même temps, d'observer l'influence de la présence de variabilités sur la résistance mécanique d'une interface collée en escalier (par exemple l'influence de zones non collées, d'une rugosité élevée, de cratères, etc.). Il permettra de souligner l'intérêt d'un brevet conjointement détenu par l'Institut Clément Ader, la PME Composites Expertise et Solutions et la TPE Bayab Industries [7]. Ce brevet est basé sur l'idée simple qu'une longueur nominale de recouvrement n'est nécessaire que strictement dans la direction des fibres des plis UD. On montre que cette approche permet de réduire l'emprise des patches de réparation de plus de 70 % [2], rendant le patch collé certifiable par les organismes de certification aéronautiques. Toutes ces actions se poursuivent au sein de l'atelier Réparation (depuis 2010) du GDR 3371 Mise en œuvre des Composites et propriétés induites.

## Remerciements

Les auteurs remercient la Région Occitanie sans qui ces études sur la réparation composite n'auraient jamais pu être engagées et dont le soutien a permis le développement d'innovations d'une part, dans le domaine de l'enlèvement de matière par jet d'eau abrasif [8] (conduisant à la qualification par Airbus d'une machine mobile [4] développée et commercialisée par la TPE Bayab Industries) et d'autre part, pour le développement d'un moyen modulaire d'essai à l'ICA dans le cadre d'une collaboration de longue date avec la PME Composites Expertise et Solutions et avec le soutien du Réseau thématique de recherche avancée Sciences et Technologies pour l'Aéronautique et l'Espace.

## Références

- [1] M. Torres, F. Collombet, B. Douchin, L. Crouzeix and Y.-H. Grunevald. Numerical and experimental value added of Multi-Instrumented Technological Evaluator for the analysis of thick monolithic composite structures with singularity details. *Composite Structures*, 127, pp 41-50. 2015.
- [2] F. Collombet, Y.-H. Grunevald, L. Crouzeix, B. Douchin, R. Zitoune, Y. Davila, A. Cerisier and R. Thévenin, Chapter No.: 10 Repairing composites. *Advances in Composites Manufacturing and Process Design*, Ph. Boisse Editor, © 2015 Elsevier Ltd. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-1-78242-307-2.00010-5>.
- [3] Y. Davila, L. Crouzeix, B. Douchin, F. Collombet and Y.-H. Grunevald. Spatial Evolution of the Thickness Variations over a CFRP Laminated Structure. *Applied Composite Materials*, Springer Verlag (Germany), 24(5), p.1201 – 1215.
- [4] S. Hanser, G. Ferrer and S. Dupouy. A350 XWB composite bonded repair, New technology for new aircraft, pp 11-18, *Fast#61*, 2018.
- [5] J-Y. Cognard. Development of an Improved Adhesive Test Method for Composite Assembly Design. *Composites Science and Technology* 65.3-4, pp 359-368, 2005.
- [6] A. Cerisier. Prédiction du comportement d'une réparation structurale collée en escalier : application d'une méthodologie par évaluateurs technologiques, Ecole doctorale : Mécanique, énergétique, génie civil, procédés (MEGeP), Institut Clément Ader, Thèse de l'université Paul Sabatier, 2017.
- [7] Brevet ca 2769668. Procédé de réparation d'une paroi constituée de plusieurs couches, date de dépôt : 28-07-2010, date de publication : 17-02-2011. Titulaires : Jedo Technologies (maintenant Bayab Industries), Composites Expertise & Solutions (C.E.S.), Université Paul Sabatier (France), <http://bases-brevets.inpi.fr/en/document-en/FR2949092.htm>.
- [8] F. Cénac, F. Collombet, M. Délérís, R. Zitoune. Chapter 4. Abrasive Water Jet Machining of Composites, pp 167-180, *Machining Composite Materials*, Paulo Davim, J., ed., ISTE Ltd 2010.