



HAL
open science

Compréhension des mécanismes d'endommagement et de rupture des matériaux composites fabriqués par le procédé QSP® (Quilted Stratum process)

Yann Todeschini, Cédric Huchette, Cédric Julien, Denis Espinassou

► To cite this version:

Yann Todeschini, Cédric Huchette, Cédric Julien, Denis Espinassou. Compréhension des mécanismes d'endommagement et de rupture des matériaux composites fabriqués par le procédé QSP® (Quilted Stratum process). Journées Nationales sur les Composites 2017, École des Ponts ParisTech (ENPC), Jun 2017, Champs-sur-Marne, France. <hal-01623250>

HAL Id: hal-01623250

<https://hal.science/hal-01623250v1>

Submitted on 25 Oct 2017

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.



HAL Authorization

Compréhension des mécanismes d'endommagement et de rupture des matériaux composites fabriqués par le procédé QSP® (Quilted Stratum process)

Analysis of damage and failure mechanisms of Quilted Stratum Process composite Parts

Yann Todeschini¹, Huchette Cédric¹, Julien Cédric¹ et Espinassou Denis²

1 : DMAS/DMSC
Onera - The French Aerospace Lab
29 Avenue de la Division Leclerc, 92320 Châtillon
e-mail : yann.todeschini@onera.fr, cedric.huchette@onera.fr et cedric.julien@onera.fr

2 : CETIM Technocampus Composite, IPC
74 route de la Jonelière 44326 NANTES Cedex 3
e-mail : denis.espinassou@cetim.fr

Résumé

Ce travail de recherche repose sur l'étude des mécanismes d'endommagement et de rupture de stratifiés de patches unidirectionnels, et ce, en vue d'établir des règles de conceptions applicables aux stratifications QSP®. L'objectif est de pouvoir dégager ces règles de conception via l'utilisation d'une stratégie numérique adaptée à la réalisation d'essais virtuels. La stratégie de calcul développée à cet égard, permet en toute théorie d'étudier l'apparition et l'évolution de l'endommagement apparaissant au sein et entre les patches, et ce, jusqu'à la rupture finale de la stratification. De manière à valider la pertinence de la stratégie numérique pour établir de telles règles, deux éprouvettes modèles représentatives de stratifications de patches ont été testées mécaniquement lors d'essais de traction interrompus. L'utilisation d'un système de stéréo-corrélation d'image, d'une chaîne d'émission acoustique, et d'un microscope monté sur le bâti de la machine d'essais mécanique permet d'étudier finement le comportement et l'endommagement des éprouvettes et de comparer les mesures au modèle numérique.

Abstract

The research work proposed here aims at studying the damage and failure mechanisms of heterogeneous laminates made from the assembly of individual composite patches. This, in order to derive design rules adapted to composite parts made with the Quilted Stratum Process®. The main goal is to make easy the establishment of those design rules thanks to an adapted Virtual Testing strategy. The fully customizable finite element model developed to fulfill this goal should be able to render the initiation and evolution of damages, in and at the interfaces of patches until the layup final failure. In order to study the validity of such numerical approach, two samples having representative discontinuous layup have been tested in interrupted tensile load. The simultaneous use of stereo digital image correlation, acoustic emission monitoring and study of sample's *in situ* edge micrographs allows us to determine the validity of the model.

Mots Clés : Patch, Discontinuités de fibres, Renforts Locaux, Zones cohésives, Multi-instrumentation

Keywords : Patch, Fiber Discontinuity, Local Reinforcement, Cohesive zone, Multi-Instrumentation

1. Introduction

Les nouvelles politiques environnementales obligent les industries du transport tant aérien que terrestre à faire preuve d'innovation pour baisser leur empreinte carbone et augmenter la durée de vie et la recyclabilité de leurs pièces de structure. Une solution aujourd'hui privilégiée par ces industriels du transport repose sur une réduction du poids des véhicules pour en limiter leur consommation. L'utilisation de matériaux composites à grande échelle permettrait de répondre à de telles exigences. Cependant, la production de pièces composites structurelles respectant tant les cadences que les coûts de production de pièces de grandes série est un véritable défi, car elle implique de repenser toute la chaîne industrielle de conception-fabrication-recyclage.

C'est dans ce contexte de course à l'allègement et de transformation des chaînes de production que le CETIM de Nantes travaille depuis 2013 au développement d'une ligne pilote pour la production haute cadence de pièces composites structurales. La ligne est composée de plusieurs modules de fabrication dont le module pavage-nappage-estampage (QSP[®] : Quilted Stratum Process) qui constitue le maillon le plus innovant (Fig. 1). Il s'agit de venir estamper une préforme composée de patches à matrice thermoplastique présentant un renfort fibreux unidirectionnel ou tissé.



Fig. 1. Représentation de la ligne de production de pièces composites structurales hautes cadence QSP[®] (Quilted Stratum Process) développée au Cetim de Nantes

Outre l'augmentation des cadences de production offertes par le procédé, les stratifications réalisées par empilement de patches unidirectionnels possèdent d'autres intérêts. En effet, la pièce, au lieu de présenter une stratification homogène, serait constituée de patches individuels de différentes tailles et orientations qui seraient utilisés de manière à optimiser localement les transferts de charges ayant comme conséquence une diminution du poids des pièces de structure à performances égales.

Cette manière de voir la conception reste aujourd'hui très théorique, et n'est pas appliquée dans un contexte industriel. Ceci s'explique par le manque de connaissances concernant les modes d'endommagement et de rupture de telles stratifications. Si le scénario de rupture des stratifiés conventionnels est aujourd'hui bien connu, ce n'est pas le cas des stratifiés possédant des discontinuités de fibres. En effet, les patches unidirectionnels sont de dimension finie ce qui implique l'apparition de concentration de contraintes résultant des discontinuités de comportement entre les différents patches [1]. Ainsi, si les mécanismes d'endommagement des patches sont similaires à ceux de stratifiés conventionnels, ils seront exacerbés ou couplés entre eux du fait de ces singularités [2]. Les règles de conception empiriques [3] jusqu'alors utilisées pour des stratifications continues restent acquises mais ne sont *a priori* plus suffisantes pour concevoir des stratifications de patches. Il est donc nécessaire d'établir de nouvelles règles portant sur les différentes configurations d'empilement de patch qu'il est possible d'envisager, sans que cela ne mène à une rupture prématurée de la stratification. Les questions se

posant alors sont relatives à des considérations telles que la taille minimale de patch utilisable, la distance minimale à respecter entre discontinuités de fibres, où bien encore à la différence d'angle admissible entre patches adjacents.

Déterminer ces règles de conception de manière exclusivement expérimentale n'est pas envisageable dans un contexte industriel. Le recours à des méthodes numériques permettrait, à moindre frais, d'explorer plus aisément les différentes configurations et donc d'établir des règles de conception par essais virtuels. Cependant, il n'est pas établi que les discontinuités de contraintes et les couplages entre les différents mécanismes d'endommagement qu'elles entraînent soient traduits de manière efficace et robuste par les modèles numériques existants aujourd'hui pour les stratifiés.

Ainsi, ce travail de recherche possède deux objectifs. Le premier est d'associer à la réalisation d'essais mécaniques sur éprouvettes modèles, une instrumentation riche permettant de mieux comprendre les modes d'endommagement des stratifiés de patches. Le deuxième est de développer une stratégie de simulation paramétrique et adaptée aux mécanismes d'endommagement et de rupture de stratifications discontinues. Ces deux volets, numérique et expérimental, permettent à la fois de valider le modèle numérique développé, et d'utiliser celui-ci dans l'optique de réaliser des essais virtuels de manière à estimer les configurations néfastes entraînant un endommagement ou une rupture prématurée des stratifications de patches. On se propose ici de présenter dans un premier temps le matériau d'étude ainsi que la méthode mise en place pour répondre à la problématique de conception de stratifié de patch. Nous présenterons ensuite comment cette méthode a été appliquée dans le cadre de l'étude de deux éprouvettes modèles et les résultats obtenus pour chacune d'entre elles.

2. Matériel et Méthodes

2.1. Matériau d'étude

Le développement de la méthodologie d'étude des stratifiés de patches est réalisée sur un thermo-plastique (PA66) à renfort unidirectionnel de fibres de carbone (CF) commercialisé par la société Celstran-Ticona et fournit par le Cetim de Nantes. Les plaques sont fabriquées à l'Onera selon une procédure permettant de positionner précisément les patches dans la stratification. Les préformes sont chauffées à 290°C et consolidées pendant 15 minutes sous une pression de 8 bars. Les premières éprouvettes réalisées ont permis la caractérisation des propriétés mécanique du matériau d'étude (Tab.1).

Propriétés élastiques du pli		Propriétés de résistance du pli	
E_{11} [MPa]	104200	σ_{11}^t [MPa]	1930
E_{22} [MPa]	5420	σ_{22}^t [MPa]	35
G_{12} [MPa]	2022	σ_{12}^t [MPa]	40
ν_{12} [-]	0.34		

Tab. 1. Propriétés élastiques et de résistance du CF/PA66 de Celstran/Ticona

Les propriétés mécaniques du matériau sont inférieures à celles de stratifiés thermdurcissables carbone/époxy classiquement utilisés dans le domaine aéronautique. Les propriétés mécaniques de la matrice de PA66 sont en effet largement plus faibles que celles des matrices époxy de qualité aéronautique et présente également une adhésion relativement mauvaise avec les fibres de carbone [4]. Ces propriétés restent cependant acceptables pour les pièces susceptibles d'être fabriquées par le procédé QSP®.

2.2. Présentation de la multi-instrumentation des essais

Les stratifications réalisées par assemblage de patches ne peuvent *a priori* plus être considérées comme possédant un comportement et un endommagement homogènes dans le plan. Le recours à des moyens de mesure de champ est donc indispensable pour caractériser l'impact d'une discontinuité sur le comportement d'un stratifié. Aujourd'hui, la stéréo-corrélation d'images numériques apparaît comme le moyen de mesure le plus adapté au suivi global d'un champ de déformation non-homogène. L'état d'endommagement des éprouvettes est quant à lui observé (i) lors de palier permettant l'observation directe de l'état d'endommagement de la tranche de l'éprouvette à l'aide d'un microscope optique monté sur le bâti de la machine de traction et (ii) de manière continue par l'enregistrement des signaux acoustiques émis par l'éprouvette lors de son endommagement au cours de la montée en charge (Fig. 2).

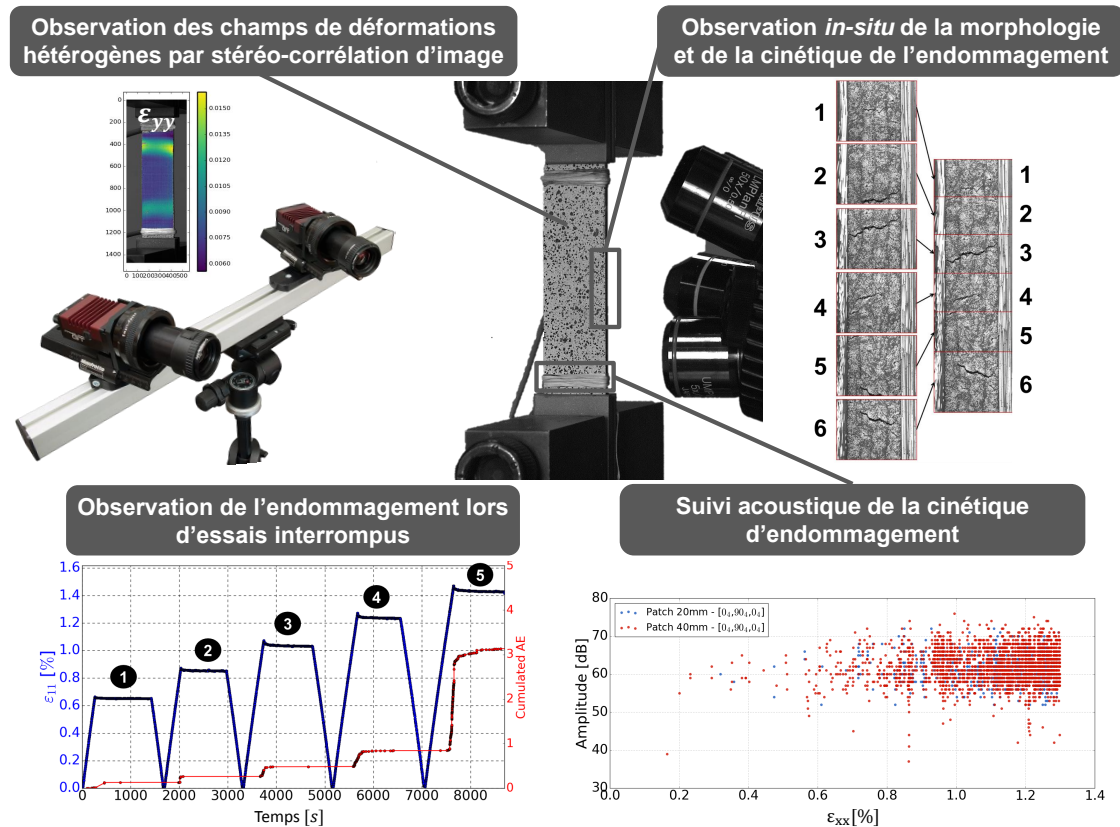


Fig. 2. Schéma présentant la multi-instrumentation utilisée lors des essais mécaniques.

L'utilisation complémentaire de ces différents moyens de mesures permet de mettre en lien les mécanismes d'endommagements aux comportements observés. Elle permet également de valider la stratégie numérique mise en place par une confrontation entre mesures expérimentales et prévisions du calculs.

2.3. Présentation de la stratégie numérique d'aide à l'établissement de règles de conceptions.

En amont des essais mécaniques, une méthodologie de calcul numérique dédiée a été mise en place sur le code de calcul éléments finis *ZéBuLoN*. Elle consiste en une représentation explicite de la stratification de patches via la réalisation d'un maillage sur la base d'une architecture de type tableau pour lequel chaque case (numérotée sur la Fig. 3) est maillée de manière régulière par des éléments hexagonaux. Une case, ou l'association de plusieurs cases permettent de définir la géométrie d'un patch et de lui assigner une orientation ou un comportement correspondant. Les endommagements classiquement observés dans les stratifiés de plis unidirectionnels ainsi que les discontinuités de fibres, sont représentés par des éléments de zones cohésives bilinéaires [5]. Ceux-ci sont placés aux interfaces entre les différents patches, pour rendre compte du phénomène de délaminage et représenter

les discontinuités de fibres, ou bien introduits au sein des patches pour représenter la rupture mode fibre ou la fissuration transverse d'un patch.

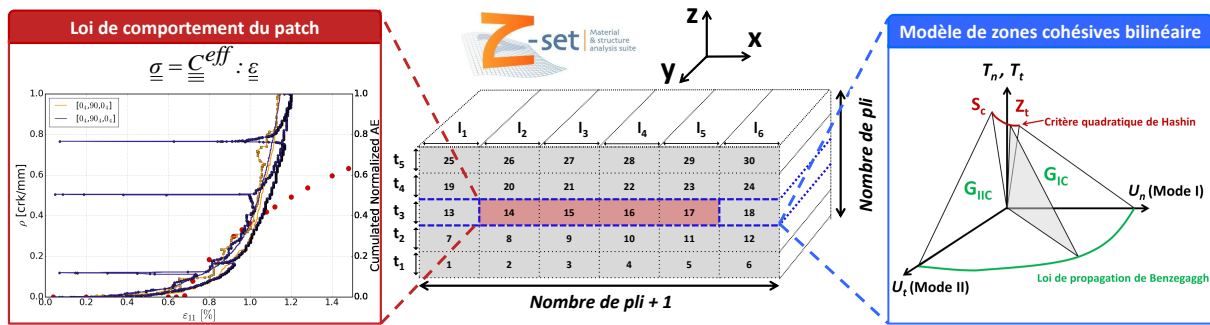


Fig. 3. Représentation schématique de la stratégie numérique de virtual testing développée

La caractérisation des propriétés d'amorçage et de propagation caractéristique des différents types de fissures est donc nécessaire pour la définition des éléments de zones cohésives (Fig. 4). Pour ce qui est des propriétés d'interface inter-patch (Fig. 4.1), les valeurs d'amorçage utilisées à ce jour sont estimées à partir des valeurs à rupture transverse et en cisaillement d'un pli unidirectionnel (Tab. 1). Les taux de restitution critique d'énergie ont quant à eux été caractérisés dans le cadre de travaux de la thèse de Y. Zhengrong (Thèse de l'Imperial College réalisée en commun avec le Cetim de Nantes). Ces valeurs ont été reprises pour représenter la fissuration matricielle aux niveaux des discontinuités de fibres (Fig. 4.2), la raideur de l'élément cohésif est elle diminuée pour rendre compte du comportement de la poche de matrice se formant au niveau de cette discontinuité. Les propriétés des éléments de zones cohésives représentant la rupture d'un pli unidirectionnel sont elles issues de la caractérisation mécanique du pli pour ce qui est de l'amorçage et de la littérature pour ce qui concerne les taux de restitution d'énergie des ruptures de fibres [6].

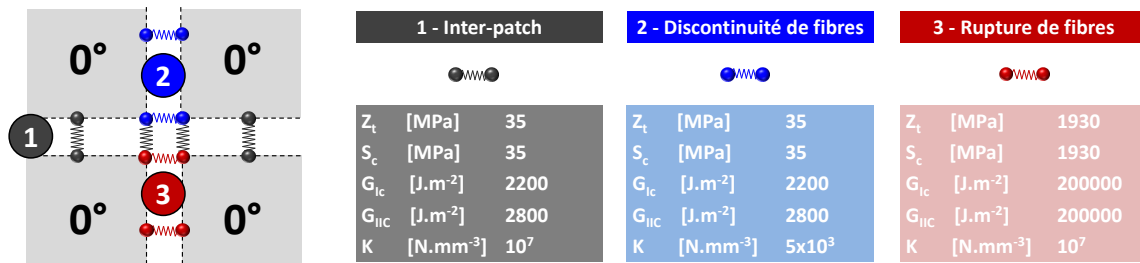


Fig. 4. Propriétés des différents éléments de zones cohésives utilisés au sein d'une stratification discontinue.

Cette stratégie de simulation numérique est totalement paramétrique (configuration géométrie, et paramètres matériaux) et permet donc d'étudier différentes stratifications résultant d'un assemblage de patches. Néanmoins, elle nécessite d'être validée sur des cas d'étude représentatif de stratifications de patches, avant d'être utilisée dans une optique d'essais virtuels pour déduire des règles de conception leur étant adaptées.

2.4. Proposition d'éprouvettes modèles adaptées au cadre de l'étude.

Il semble important dans le cadre de l'étude de stratifications discontinues d'être en mesure de déterminer (i) la taille minimale d'un recouvrement entre deux patches et (ii) être en mesure de déterminer si le comportement et l'endommagement d'un stratifié présentant une stratification hétérogène peut-être étudié de la même manière qu'une stratification homogène équivalente. Pour répondre à ces deux interrogations, on propose d'étudier deux éprouvettes modèles dont une représentation schématique est donnée Fig. 5.

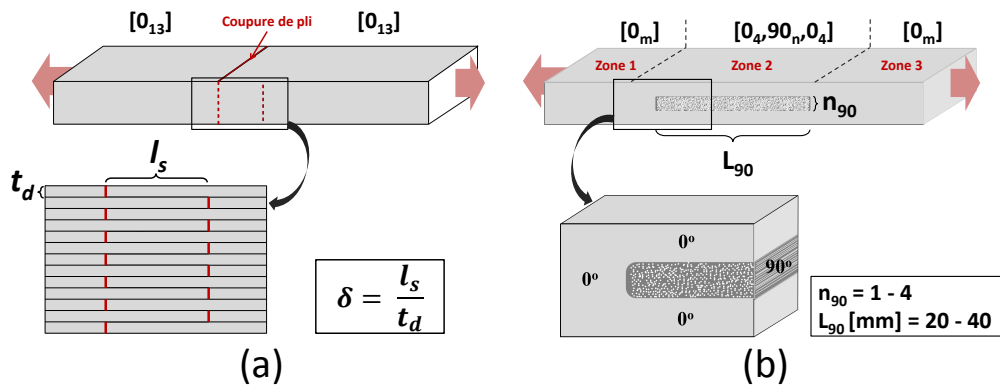


Fig. 5. (a) Unidirectionnel discontinu alterné (b) Stratification de patch multi-orientation

La première stratification étudiée correspond à un unidirectionnel $[0_{13}]$ dont les plis sont coupés de manière alternée. Cette éprouvette est décrite géométriquement par un ratio δ correspondant au rapport entre la distance inter-coupure l_s et l'épaisseur d'un patch t_d (Fig. 5.a). On cherche ici à étudier l'influence de ce ratio géométrique sur le mode de rupture. La deuxième éprouvette modèle a pour but d'étudier le comportement et l'endommagement d'une stratification de patches possédant deux séquences d'empilement (Fig. 5.b). Celle-ci correspond à une stratification composée d'un patch de dimension finie (1 et 4 plis de 0,16 mm ($n=[1,4]$) et longueurs de patches de 20 et 40 mm) orienté à 90° inséré dans une stratification d'unidirectionnel orienté à 0° . Ces éprouvettes sont donc divisées en 3 zones, une zone centrale où l'empilement est $[0_4, 90_n, 0_4]$, et deux zones extérieures correspondant à un empilement à 0° . On cherche ici à estimer si une stratification locale peut être considérée comme possédant le même comportement et endommagement qu'une stratification homogène équivalente.

3. Résultats

3.1. Influence de la taille de recouvrement entre patch sur le mode de rupture

La fabrication d'éprouvettes discontinues de manière alternée est réalisée à l'aide de ciseaux à bois qui permettent l'insertion de coupures de fibres, aux positions voulues dans les plis, mais aussi de faire des éprouvettes possédant plusieurs ratios géométriques dans une même plaque. Ces éprouvettes ont ensuite été testées en traction jusqu'à rupture. De manière à pouvoir comparer les simulations aux résultats expérimentaux, la stratification discontinue de treize plis a été maillée explicitement grâce à la méthodologie développée pour cette étude (Fig. 6). Ainsi, des éléments de zones cohésives ont été placés aux interfaces potentiellement délaminantes (interfaces inter-patch et zones de discontinuité de fibres) ainsi qu'au sein des patches de manière à représenter la rupture en mode fibre. Les propriétés utilisées sont celles données Fig. 4.

On observe numériquement et expérimentalement une augmentation de la contrainte à rupture de la stratification avec le ratio géométrique δ . Cela, jusqu'à un ratio de transition δ_t au-delà duquel la résistance apparente de l'empilement atteint un plateau (Fig. 6). En dessous de ce ratio de transition, une rupture par délaminage catastrophique est observée tant numériquement qu'expérimentalement. Pour des ratios supérieurs à cette valeur, la rupture est pilotée par la rupture des fibres de la section possédant le moins de plis continus. Le modèle numérique semble ici particulièrement adapté comme outil permettant d'établir des règles de pré-dimensionnement. En effet il permet d'établir plus aisément la règle portant sur un ratio géométrique minimal δ_t à utiliser entre deux discontinuités de fibres de manière à éviter une rupture catastrophique de la stratification par coalescence du délaminage aux interfaces inter-patch [7] (Fig. 6).

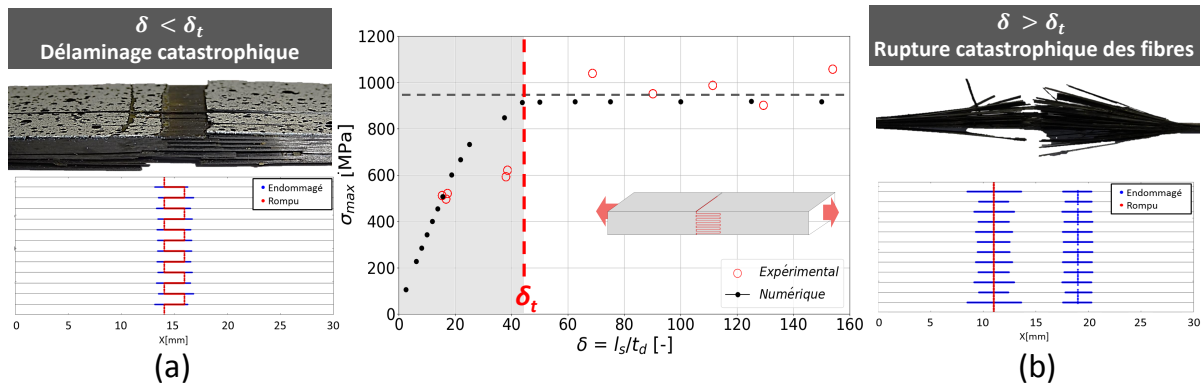


Fig. 6. Etude de la contrainte à rupture et du mode d'endommagement en fonction du ratio géométrique δ caractérisant une stratification discontinue alternée.

3.2. Comportement et état d'endommagement d'une stratification de patch multi-orientation.

Contrairement à la configuration précédente où les calculs ont pu être réalisés avant les essais mécaniques, l'étude de cette stratification de patch multi-orientation nécessite dans un premier temps, une analyse expérimentale plus poussée de son endommagement et de son comportement et dans un second temps, de comparer ceux-ci à celui des stratifiés croisés (conventionnels) équivalents.

3.2.1. Comparaison du comportement local

Les flux d'efforts traversant la section de cette éprouvette étant les mêmes, il est possible de comparer les réponses contraintes/déformations obtenues pour chacune de ces zones à celles de stratifiés homogènes possédant la même stratification. Pour cela, la corrélation numérique d'image est nécessaire car elle permet un suivi global du champ de déformation de l'éprouvette, et de définir des jauges virtuelles zones par zones (Fig. 7).

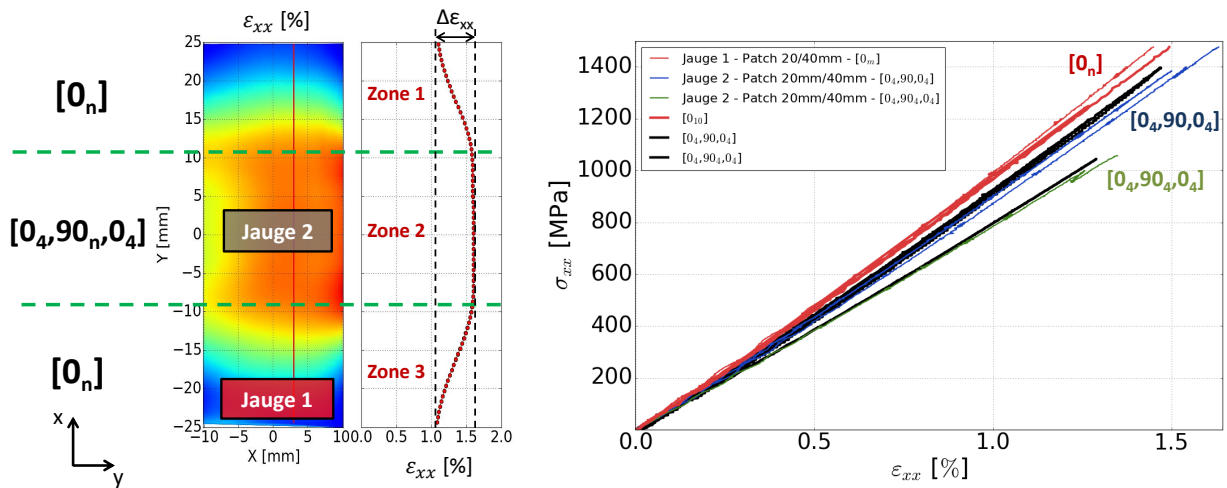


Fig. 7. Etude de la réponse contrainte-déformation d'éprouvettes de type patch - Comparaison avec le comportement d'éprouvettes conventionnelles possédant le même empilement

Il est intéressant d'observer que les réponses contraintes-déformations des différentes zones de l'éprouvette patch correspondent à celles de stratifications homogènes équivalentes. L'étude du champ de déformation révèle une longueur de reprise de charge dans les zones 1 et 3 de la stratification. L'interprétation faite de cette longueur est la même que pour des considérations de type shear-lag dans le cas d'une coupure de pli présente au sein d'un stratifié unidirectionnel [8].

3.2.2. Comparaison des cinétiques et morphologies de l'endommagement au sein du patch

Dans l'optique du dimensionnement d'une stratification de patch, il est nécessaire d'être en mesure de déterminer si la cinétique d'endommagement d'un patch est impactée par un effet structurel intrinsèque à la stratification. Pour cela, notre analyse est basée sur l'utilisation de manière couplée (i) d'une mesure acoustique de l'évolution de l'endommagement et (ii) d'une observation *in-situ* de l'endommagement de la tranche des éprouvettes conventionnelles et patchées.

L'évolution de l'énergie acoustique cumulée pour des éprouvettes croisées conventionnelles ($[0_4, 90_n, 0_4]$ ($n=1$ et 4)) et éprouvettes de type patch ($[0_4, 90_n, 0_4]$ ($n_{90} = 1$ et 4) et $L_{90} = 20$ et 40 mm)) a été normée pour une déformation de 1,30% de manière à s'affranchir de l'effet lié au volume de matière endommagé (Fig. 8). On remarque que les tendances des différentes courbes sont relativement similaires ce qui caractérise une similarité de l'endommagement des différentes éprouvettes.

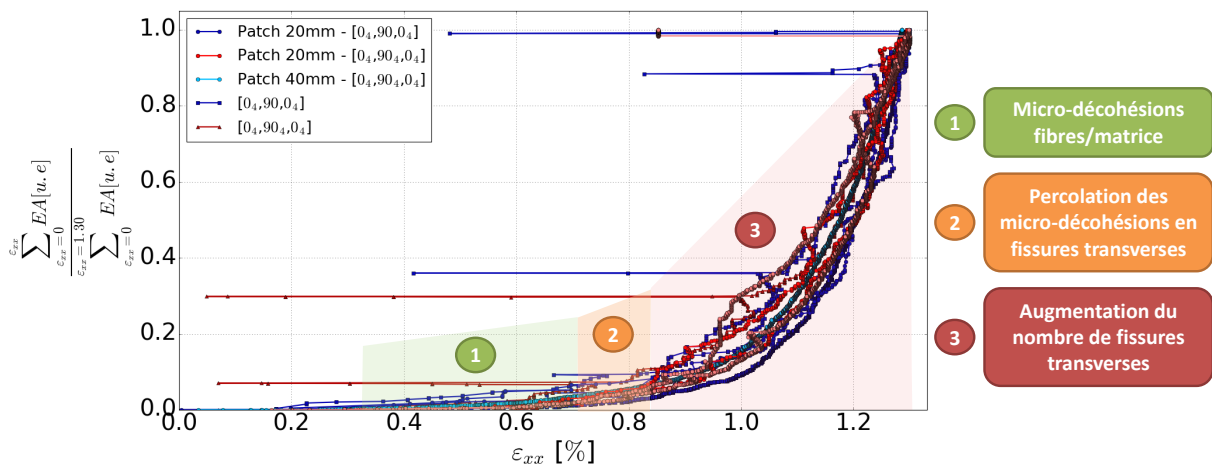


Fig. 8. Evolution de l'énergie acoustique cumulée normée en fonction de la déformation appliquée pour des éprouvettes croisées conventionnelles et éprouvettes de type patch

L'observation de l'état d'endommagement des patches à 90° sur le chant poli des l'éprouvette le confirme. La réalisation d'une corrélation d'image 2D à partir des micrographies faite de ces chants à différents niveaux de déformations permet de mettre en évidence cette similarité dans le schéma de fissuration des plis orientés à 90° d'une stratification de type patch par rapport à un stratifié croisé conventionnel (Fig. 9). On remarque également que le schéma de fissuration semble peu perturbé en bord de patch.

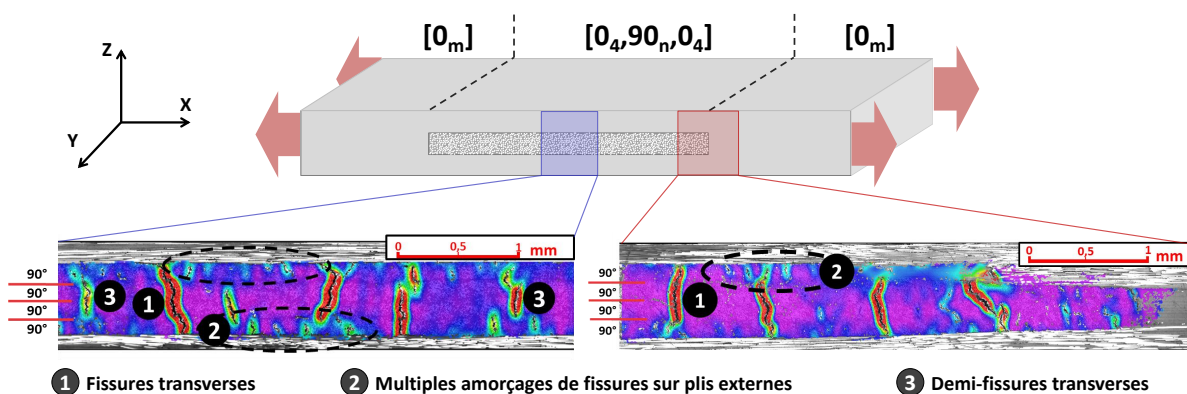


Fig. 9. Corrélation numérique d'image 2D réalisées à partir de micrographie faite sur le chant de l'éprouvette, au sein du patch et en bord de patch $[0_4, 90_4, 0_4]$ - $L_{90} = 20$ mm

Pour le CF/PA66 étudié, la mauvaise qualité de l'interface entre fibre et matrice, ainsi que le comportement plus ductile de la matrice de PA66 entraîne un schéma de fissuration moins classique que pour

des composites carbone/époxy de qualité aéronautique. On observe effectivement que la fissuration, transverse à la direction de chargement, est progressive et s'établit à plusieurs échelles.

- L'échelle de la stratification, avec des fissures transverses présentes sur toute leur épaisseur des 4 plis orientés à 90° (Fig. 9.1)
- L'échelle du pli, avec de multiples fissures contenues dans un pli (Fig. 9.2)
- Une échelle intermédiaire traduisant l'apparition progressive des fissures (Fig. 9.3).

Ces observations permettent de justifier la tendance similaire obtenue pour les différentes courbes d'énergie acoustique cumulée normée (Fig. 8). En effet, les observations micrographiques révèlent une fissuration relativement hétéroclite dont la mauvaise adhésion entre fibre et matrice est supposée responsable. Cette hypothèse permet également d'expliquer que l'amorçage et la cinétique d'évolution de la fissuration transverse ne sont pas impactés par l'épaisseur du pli comme cela a pu être observé pour les stratifiés aéronautiques carbone/époxy [9].

3.2.3. Endommagement spécifique observé en bord de patch

L'observation en cours d'essai de la tranche d'autres éprouvettes montre que la périphérie des bords de patchs ne possède pas systématiquement un schéma de fissuration similaire à celui d'un stratifié croisé classique. En effet, il existe une différence de comportement entre une stratification unidirectionnelle orientée à 0° et une stratification croisée de type $[0_4, 90_n, 0_4]$ ($n_{90} = 1$ et 4). La différence de déformation transverse (effet Poisson) entre les deux stratifications peut entraîner l'amorçage d'une fissure de délaminage entre le patch à 90° et la stratification adjacente orientée à 0° (Fig. 10.a).

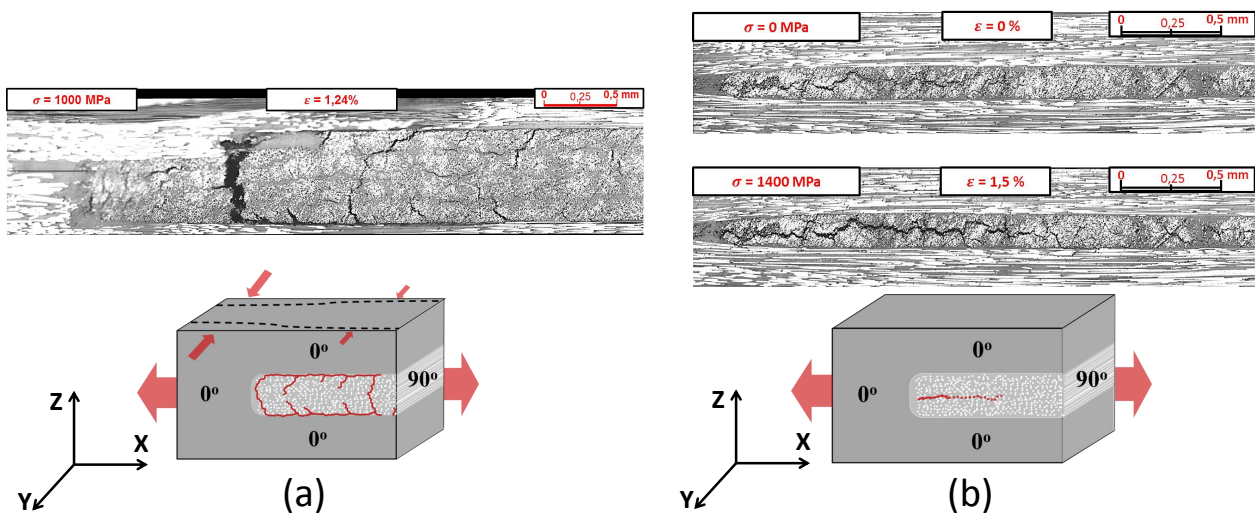


Fig. 10. Micrographie présentant deux états d'endommagements différents obtenus en bords de patch (a) Déchaussement du patch par effet Poisson et (b) Fissure hors-plan intra-ply due au procédé (effets thermique)

L'apparition et la propagation de cette fissure de délaminage est progressive et localisée au bord de patch, elle n'entraîne donc pas de rupture catastrophique du stratifié. Ce mode d'endommagement avait été anticipé et justifiait même le choix de cette éprouvette. Aussi, l'observation de la tranche d'éprouvette de type patch possédant un seul pli à 90° a permis de révéler un mode d'endommagement peu commun et présent avant même que l'éprouvette n'ait été sollicitée. Cet endommagement correspond à une fissure hors-plan située au coeur même du pli à 90° (Fig. 10.b). Sa présence avant même de solliciter mécaniquement l'éprouvette indique qu'il a pour origine les contraintes résiduelles de cuisson de l'éprouvette. Une observation du chant de l'éprouvette à un niveau de charge important (1400 MPa), révèle que ce défaut initial ne semble pas nocif à la tenue structurale d'une éprouvette sollicitée en traction. La présence de ce type de défaut semble néanmoins nocif pour une sollicitation en compression de l'éprouvette, ce qui n'a pas été investigué dans le cadre de cette étude. La présence

de ce type de défaut montre également la nécessité de prendre en compte les effets du procédé de fabrication dans l'étape de dimensionnement.

L'apparition et l'évolution de ces différents modes d'endommagement pendant le procédé de fabrication et lors d'un chargement mécanique restent difficiles à appréhender. Le recours à des simulations numériques réalisées à l'aide du modèle développé est donc nécessaire en vue d'une compréhension fine de leurs origines et de leurs effets sur le comportement. Le rôle des contraintes thermiques, et le couplage entre mécanismes d'endommagements inter et intra-patch nécessite une identification fine d'un modèle de mécanique de l'endommagement continu permettant de traduire le comportement thermo-visco-élastique endommageable du CF/PA66. Cette identification est en cours de réalisation. Une fois réalisée, le modèle paramétrique pourra être confronté aux observations expérimentales et sera utilisé pour mieux comprendre les mécanismes d'endommagements et estimer les paramètres géométriques et physiques à respecter afin d'éviter un endommagement prématuré des stratifications de patch.

4. Conclusions et Perspectives

Une stratégie adaptée à l'étude des composites stratifiés réalisés à partir de patches de dimensions finie a été mise en place. Celle-ci repose sur l'utilisation d'une stratégie numérique paramétrique adaptée et sur la réalisation d'essais multi-instrumentés sur éprouvettes modèles représentatives des stratifications de patches. La stratégie a notamment permis d'établir une règle portant sur un ratio géométrique δ_l caractérisant la taille d'un recouvrement entre deux patches à respecter afin d'éviter une rupture catastrophique par coalescence de fissures de délaminage aux interfaces inter-patch. L'établissement de cette règle a été facilitée par l'utilisation du modèle numérique développé à cet effet. L'étude expérimentale d'une stratification de patch multi-orientation et multi-zones a permis d'établir une similitude entre le comportement et l'endommagement de chacune des zones des éprouvettes et celui d'éprouvettes conventionnelles homogènes possédant le même empilement. Néanmoins, les observations microscopiques réalisées en bord de patches révèlent des mécanismes d'endommagement plus complexes à appréhender. Il s'agira donc, de comprendre le rôle des contraintes thermiques et le couplage entre mécanismes d'endommagements inter et intra-patch à l'aide de la stratégie numérique présentée mais intégrant le comportement visqueux et endommageable du patch. La méthodologie développée doit permettre à terme l'établissement de règles de conception pouvant être utilisées par un bureau d'étude.

Références

- [1] M. R. Wisnom « On the Increase in Fracture Energy with Thickness in Delamination of Unidirectional Glass Fibre-Epoxy with Cut Central Plies », *Journal of Reinforced Plastics and Composites* .
- [2] A. C. Orifici, P. Wongwichit, N. Wiwatanawongsa « Embedded flaws for crack path control in composite laminates », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* Vol. 66, pp. 218 – 226, 2014, ISSN 1359-835X.
- [3] D. of Defense, COMPOSITE MATERIALS HANDBOOK vol.3 : Polymer matrix composites usage, design and analysis, USA - Department of Defense, 2002.
- [4] D. Nakaami, A. Nakai, H. Hamada « Fabrication and Mechanical Properties of Textile Reinforced Thermoplastic Composite Using Braiding Technique », in : Proceeding of the tenth US-Japan Conference on Composite Materials, , pp. 429–438, 2002.
- [5] T. Vandellos « Développement d'une stratégie de modélisation du délaminage dans les structures composites stratifiées », Ph.D. thesis, Université de Bordeaux 1, 2011.
- [6] M. Laffan, S. Pinho, P. Robinson, A. McMillan « Translaminar fracture toughness testing of composites : A review », *Polymer Testing* Vol. 31 n° 3, pp. 481 – 489, 2012, ISSN 0142-9418.
- [7] Y. Todeschini, C. Huchette, C. Julien, D. Espinassou « Analysis of damage and failure mechanisms of Quilted Stratum Process Composite parts », in : ECCM17 - 17th European Conference on Composite Materials, 2016.
- [8] M. I. Darby, J. M. Richards, B. Yates « Effect of discontinuous plies on the tensile strength of CFRP laminates », *Journal of Materials Science Letters* Vol. 4 n° 2, pp. 203–206, 1985, ISSN 1573-4811.
- [9] J. A. Nairn, S. Hu, J. S. Bark « A critical evaluation of theories for predicting microcracking in composite laminates », *Journal of Materials Science* Vol. 28 n° 18, pp. 5099–5111, 1993, ISSN 1573-4803.