



**HAL**  
open science

## Modélisation d'essais structuraux sur plaques entaillées

Joël Serra, Jean-Emmanuel Pierré, Jean-Noël Périé, Jean-Charles Passieux,  
Christophe Bouvet, Bruno Castanié

### ► To cite this version:

Joël Serra, Jean-Emmanuel Pierré, Jean-Noël Périé, Jean-Charles Passieux, Christophe Bouvet, et al..  
Modélisation d'essais structuraux sur plaques entaillées. Journées Nationales sur les Composites 2017,  
École des Ponts ParisTech (ENPC), Jun 2017, 77455 Champs-sur-Marne, France. hal-01623260

**HAL Id: hal-01623260**

**<https://hal.science/hal-01623260>**

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.

## Modélisation d'essais structuraux sur plaques entaillées

### *Modeling of structural tests of notched plates*

J. Serra<sup>1</sup>, J.E. Pierré<sup>1</sup>, J.N. Périé<sup>1</sup>, J.C Passieux<sup>1</sup>, C. Bouvet<sup>1</sup>, B. Castanié<sup>1</sup>

1 : Institut Clément Ader (ICA), Université de Toulouse, CNRS UMR 5312-INSA-ISAE-Mines Albi-UPS, Toulouse, France.  
e-mail : bruno.castanie@insa-toulouse.fr

#### Résumé

Des essais sous sollicitations combinées traction/cisaillement ont été réalisés à l'aide du moyen d'essai « VERTEX » de l'Institut Clément Ader dans le cadre d'une ANR éponyme. Les éprouvettes sont dites technologiques dans le sens où elles sont génériques et représentent soit une technologie, soit comme ici, une problématique scientifique : les grandes coupures. Grâce à une méthode dite FE-SDIC (pour Finite Element- Stereo Digital Image Correlation), il est possible de faire coïncider le maillage de régularisation de la mesure et celui d'un modèle éléments finis avancé de type DPM (Discrete Ply Modelling). Un protocole d'échange de données a été établi et les premiers résultats du dialogue essais-calcul sont présentés dans ce papier. Cette méthodologie montre qu'il est par cette manière possible de s'affranchir des complexités et redondances structurales des essais à ce niveau. D'une manière générale ces premières investigations montrent qu'un nouveau champ de recherche s'ouvre à l'échelle des structures avec de nouvelles complexités et mettent en avant la nécessité de développer un dialogue entre expériences, mesures, calculs intensifs et stratégies de modélisation des scénarios de ruptures des structures composites.

#### Abstract

Tests under combined tensile / shear stresses were carried out using the "VERTEX" test device of the Clément Ader Institute as part of an eponymous ANR. The specimens are called technological in the sense that they are generic and represent either a technology or as here, a scientific problem: large notches. Using a method known as FE-SDIC (for Finite Element, Stereo Digital Image Correlation), it is possible to have the measurement regularization mesh match an advanced finite element model known as Discrete Ply Modeling (DPM). A data exchange protocol has been established and the first results of the test-calculation dialogue are presented in this paper. This methodology shows that it is thus possible to overcome the complexities and structural redundancies of the tests at this level. In general, these initial investigations exhibit a new field of research at the scale of structures with new complexities and the need to develop a dialogue between experiments, measurements, intensive calculations and strategies for modeling scenarios of failure of composite structures.

**Mots Clés :** Stratifiés, Grande coupures, Essais traction/cisaillement, FE-SDIC

**Keywords :** Laminates, Large notches, Traction/shear tests, FE-SDIC

### 1. Etat de l'art et positionnement

La certification des structures composites aéronautiques repose sur la très connue pyramide des essais (Fig. 1 (a)). Cette démarche très pragmatique permet au premier niveau dit « des coupons », d'obtenir une batterie d'admissibles ainsi que leurs dispersions qui permettent le calcul des détails structuraux à l'échelle supérieure puis celui d'éléments de plus en plus complexes jusqu'à la structure complète. Toutefois, dans le détail, cette méthodologie repose pour l'essentiel sur des essais uniaxiaux comme le montre la fig 1 (b). Du point de vue académique, les études se sont pour l'essentiel concentrées sur les problématiques à l'échelle du coupon, d'une part pour des raisons pratiques, d'autre part, parce que dès cette échelle, les scénarios de rupture peuvent être très complexes et permettent d'évaluer et de renseigner de manière fine les stratégies de modélisation. Les cas de ruptures trouées [1, 2] ou habitées [3] illustrent parfaitement cette problématique. Toutefois, depuis quelques années, ces stratégies se révèlent de plus en plus pertinentes [1-4] et permettent d'envisager aujourd'hui de s'attaquer aux échelles supérieures. Si dans le monde industriel, ces études sont fréquentes, très peu d'études académiques sont dédiées à ces

problématiques. Classiquement, seules les études de décollement de raidisseur en postflambement ont retenu l'attention des chercheurs [5, 6]. Il existe très peu d'études où l'on s'intéresse aux problèmes couplés comme par exemple les interactions impact/postflambement [7] ou encore aux réponses des structures impactées ou non sous sollicitations complexes [8-9]. C'est dans le cadre de cette nécessaire évolution vers l'échelle de la structure que l'ANR VERTEX [10] s'est positionnée.

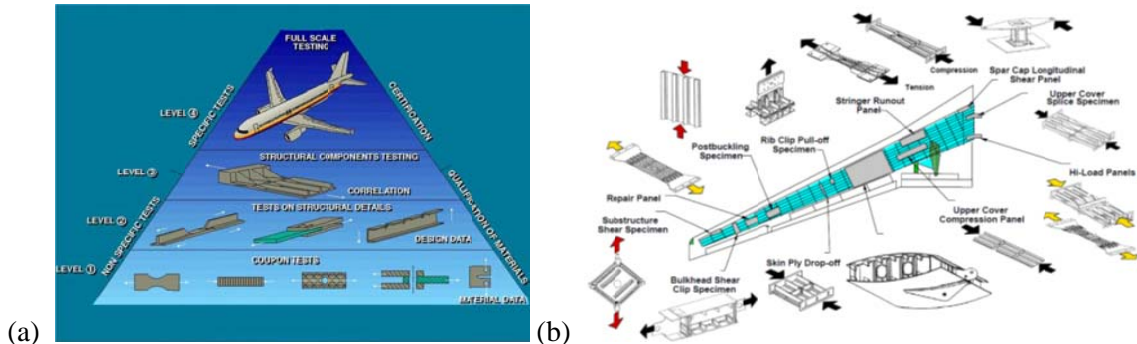


Figure 1 – (a) Pyramide des essais (source : Airbus); Essais de certification d'un caisson de voilure carbonée (source : NASA)

L'institut Clément Ader bénéficie d'un retour d'expérience sur ces problématiques suite aux études sur les sandwichs dissymétriques menées dans les années 90 [8-9] pour lesquelles un caisson avait été utilisé. Sur la face supérieure de sa partie centrale est fixé le spécimen à étudier. Le caisson est soumis à des efforts de flexion et de torsion, générant sur le spécimen des flux de traction/compression et des flux de cisaillement. Toutefois, en conclusion de [9], il était souligné que la zone d'intérêt de l'essai était trop petite et que les effets de Saint-Venant étaient prépondérant. Dans cet essai aussi, il est très difficile de maîtriser des flux d'efforts entrant réellement dans l'éprouvette à tester, problème déjà souligné par Klein [11]. Les conclusions de l'analyse de la littérature et l'expérience acquise montrent que la solution en caisson est pertinente pour la réalisation d'essais multiaxiaux, que la taille de l'éprouvette doit être augmentée par rapport à [8, 9] et qu'une solution doit être trouvée pour la maîtrise des efforts entrant réellement dans l'éprouvette.

Pour répondre à ces contraintes, une éprouvette dite « technologique » a été définie de taille  $400 \times 400 \text{ mm}^2$ , Fig. 2. On entend par éprouvette technologique, une éprouvette qui ne représente pas une zone spécifique d'un aéronef mais représente de manière générique une technologie ou une problématique scientifique. Cette éprouvette est boulonnée par 128 vis sur un nouveau montage d'essai « VERTEX » conçu et créé à l'Institut Clément Ader capable de générer 3000 N/mm en traction/compression, 1000 N/mm en cisaillement et 1.6 bars de pression interne (Fig. 2).

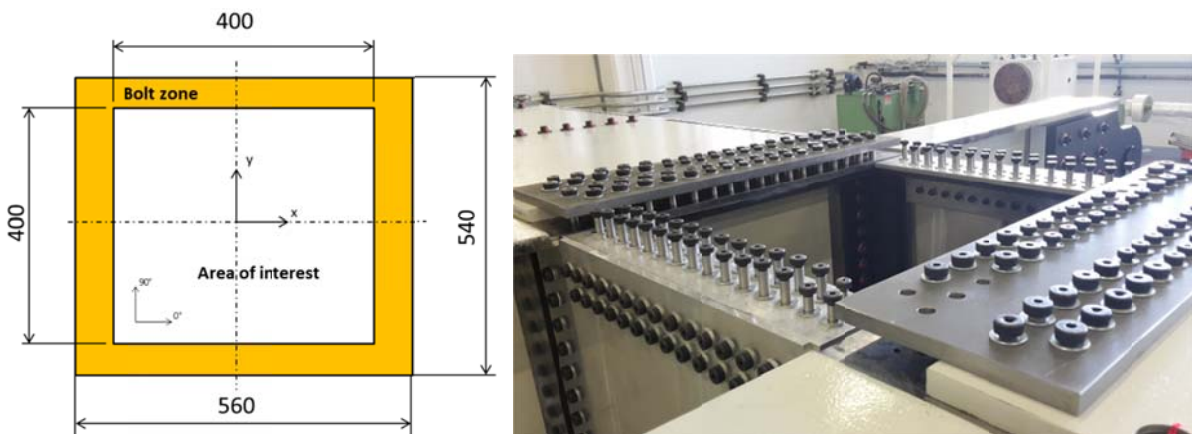


Figure 2 – Epreuve technologique et zone de fixation par 128 Vis-Axe sur le montage VERTEX.

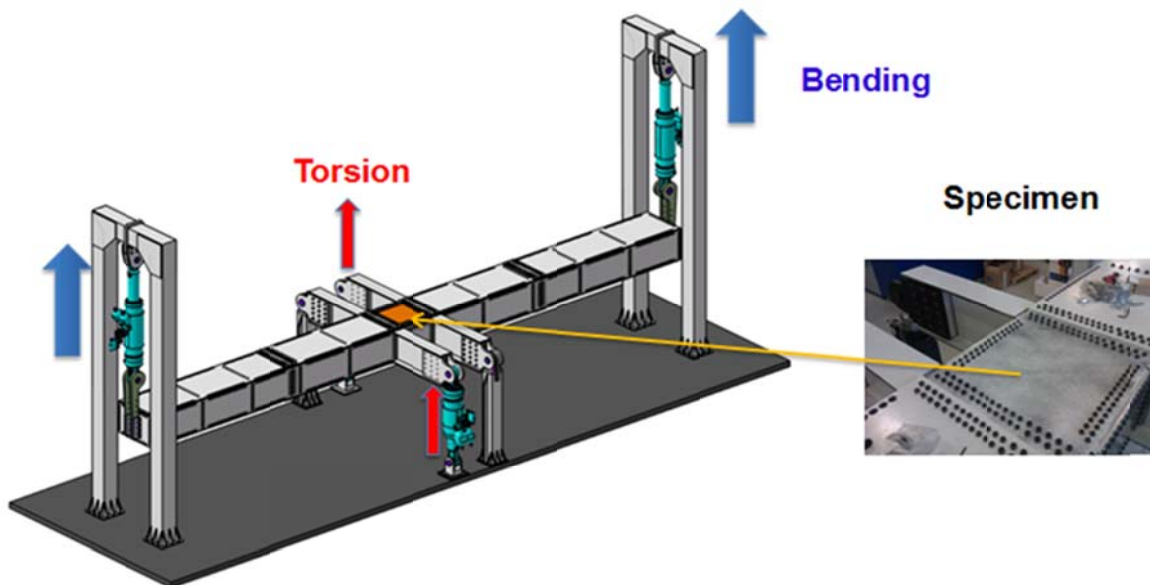


Figure 3 – Vue CAO du montage VERTEX, mode de chargement et montage de l'éprouvette.

Pour tester cette nouvelle approche, une problématique scientifique difficile, celle des grandes coupures a été retenue par les partenaires de l'ANR VERTEX [10]. Au total, une quinzaine d'essais sur éprouvettes entaillées ont été réalisés sous sollicitations de traction, cisaillement, combiné traction/cisaillement et en suivant un chemin spécifique (essais dits « enveloppes »). Dans le paragraphe suivant, les méthodologies de mesures seront explicitées puis la modélisation des éprouvettes entaillées sera présentée. La méthodologie de dialogue calcul/essai sera ensuite explicitée et un dialogue essai/calcul dans le cas d'un essai en cisaillement sera présenté avant de présenter un certain nombre de conclusions.

## 2. Instrumentation

La Stéréo Corrélation d'Images Numériques (Stéréo-CIN ou SCIN) permet de fournir (a) des champs cinématiques mesurés à comparer aux champs cinématiques calculés en vue de la validation et (b) une information (partielle) des conditions aux limites à imposer au modèle. Les champs fournis par les codes commerciaux de SCIN et d'analyse par éléments finis (FEA) sont très différents. Par exemple, les logiciels éléments finis expriment le déplacement comme les degrés de liberté aux nœuds d'un maillage éléments finis. De leur côté, les logiciels de CIN commerciaux expriment le déplacement comme des valeurs ponctuelles sur un nuage de point dans un repère différent de celui de maillage. La difficulté supplémentaire réside dans le fait que les domaines de définition de ces champs diffèrent, puisque, par exemple, les logiciels actuels en CIN ne permettent pas de s'approcher des bords, ou tout simplement parce que des contraintes expérimentales conduisent parfois à n'observer qu'une partie seulement de l'éprouvette. Quantifier la distance entre un champ mesuré par SCIN et un champ simulé n'est de fait pas une tâche évidente. Dans ce projet, une méthode de SCIN basée sur les éléments finis a été développée pour permettre d'unifier les descriptions des champs simulés et mesurés. Une formulation du problème de conservation des niveaux de gris est écrite dans le repère du maillage en se basant sur des modèles non-linéaires de caméra [12].

Dans Vertex, l'idée était de déterminer les conditions aux limites à partir de la corrélation d'images numériques. Or, en SCIN, seul le déplacement de la peau visible est mesuré. Le déplacement à cœur n'est donc pas accessible directement. La méthode proposée par [15] permet d'imposer des conditions aux limites réalistes pour une théorie des plaques à partir de mesures en surfaces. L'idée est d'appliquer « directement » des déplacements mesurés en surfaces au niveau du plan moyen de

la plaque. Dans le cadre de l'ANR Vertex, pour aller plus loin dans le dialogue essais/calculs, il a été démontré qu'il était possible de mesurer directement les conditions aux limites à appliquer à la simulation à partir de la SCIN (déplacements et rotations ou déplacements dans l'épaisseur selon la modélisation). Pour ce faire, on se propose de s'appuyer sur un modèle EF basé sur la théorie des stratifiés (réputé fiable) pour régulariser la mesure Stéréo-CIN [15]. La région dans laquelle la régularisation est effectuée peut être vue comme un corps d'épreuve. Les conditions aux limites sont alors admissibles.

Pour estimer ces conditions aux limites, le champ de vision doit impérativement visualiser la plus grande partie de l'éprouvette. Cependant, à définition de capteur CCD donnée, ce choix détermine la résolution de mesure dans toute la région d'intérêt. Dans le cas présent, et en général pour des structures de grande taille, cette résolution s'avère souvent insuffisante pour envisager une comparaison essai calcul autour de détails. On se propose donc d'instrumenter l'essai avec au moins deux bancs de deux caméras [12], ce qui permet de lever ce compromis et réduire les incertitudes de mesure et d'identification. La Fig. 4 présente l'instrumentation retenue sur le banc Vertex. Trois paires de caméras sont installées au-dessus du spécimen (les trois zones imagées sont symbolisées par les rectangles). Le formalisme FE SDIC proposé permet de tirer naturellement partie des images saisies en champ proche (en particulier en pointe d'entaille, dans la région encadrée en vert) pour améliorer fortement la résolution de mesure.

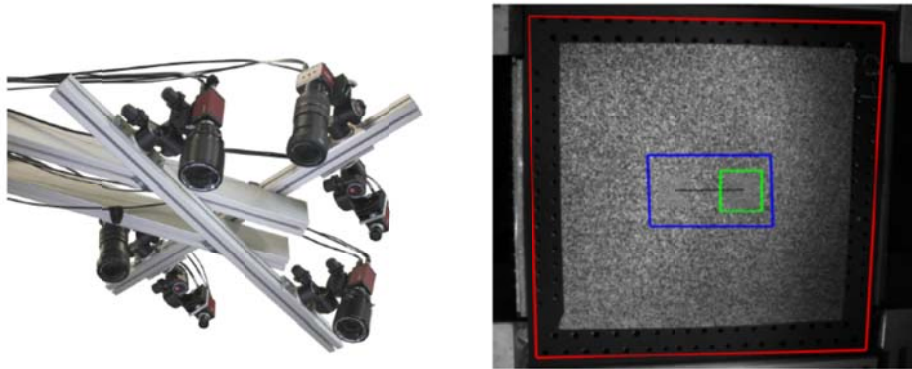


Figure 4 - Instrumentation de l'essai par Stéréo CIN : grappe de 6 caméras et 3 régions d'analyses correspondantes

### 3. Description de l'éprouvette et modélisation DPM.

L'éprouvette est visible Fig. 5. Elle est d'épaisseur constante même dans les zones de boulonnages car un essai préliminaire a démontré que pour cette problématique il n'était pas nécessaire d'ajouter des plis de renfort locaux. Une coupure de 100 mm de long et de 2 mm de large a été usinée au centre.

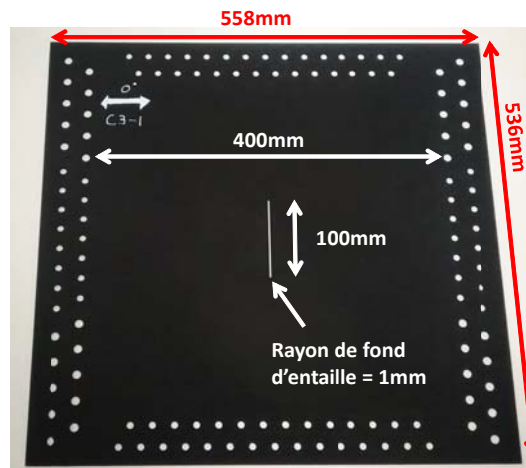


Figure 5 – Eprouvette composite entaillée

Les stratifiés composites étudiés sont élaborés à partir de plis unidirectionnels carbone/époxy (T700/M21) d'épaisseur 0.125 mm. Trois drapages ont été étudiés mais seul le suivant a été utilisé pour le dialogue essais/calculs [45/-45/X/X/X/90/0/90/X/X/X/-45/45]. La confidentialité nous empêchant de révéler complètement le drapage utilisé, l'orientation de certains plis est masquée (symbole « X »). Chaque stratifié comporte 13 plis, l'épaisseur globale est donc de 1.625mm. La simulation du comportement des éprouvettes entaillées est réalisée à l'aide du « *Discrete Ply Model* », dont les caractéristiques sont détaillées en [1, 13]. Le maillage adopté comprend trois zones différentes (Figure 5) :

- Zone 1 : éléments SC8R (non-endommageables) aux dimensions  $300 \times 300 \text{ mm}^2$  : un seul élément dans l'épaisseur du stratifié.
- Zone 2 : éléments C3D8R (non-endommageables) aux dimensions un seul élément dans l'épaisseur du pli.
- Zone 2 : éléments C3D8 et COH3D8 (endommageables) : un seul élément dans l'épaisseur du pli.

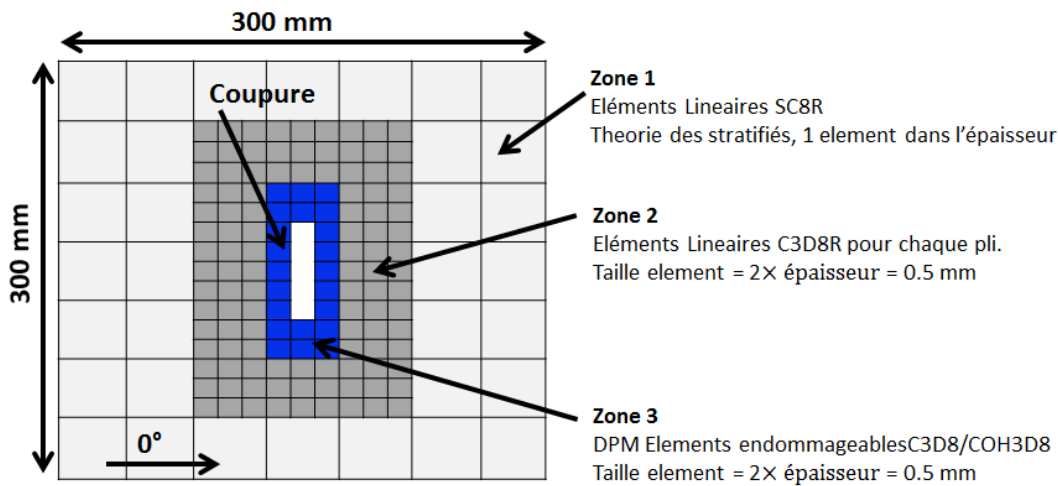


Figure 6 – Modélisation DPM de l'éprouvette composite entaillée.

La taille de la modélisation est légèrement plus faible que la zone d'intérêt et ce point est expliqué par les nécessités du dialogue calcul/essais.

#### 4. Dialogue Essai/calcul.

##### 4.1 Principe

La mesure du champ de déplacement est alors effectuée dans une zone de  $350 \times 350 \text{ mm}^2$  plus petite que la zone d'intérêt pour s'affranchir des effets locaux du boulonnage (Fig. 7). Le maillage utilisé pour la mesure FE-SDIC est celui exploité pour le calcul éléments finis DPM (Zone 1, Fig. 6). Dans un premier temps, des conditions aux limites de Dirichlet ont été imposées sur le modèle DPM (cf. Fig. 6) selon la méthode proposée dans [14]. En pratique, les trois composantes du déplacement mesuré sont appliquées sur le bord de la Zone 1 représentée par une ligne blanche (voir Fig. 7), tandis que seule la composante hors plan du déplacement mesuré est imposé sur 3 rangées de nœuds supplémentaires (en vert). La zone utile utilisée pour le calcul par éléments finis (Figure 6) est plus petite ( $300 \times 300 \text{ mm}^2$ ) que la portion de la plaque observée. En effet, comme évoqué précédemment, il est également possible d'identifier des conditions aux limites admissibles (SA et CA) à en régularisant mécaniquement la mesure par FE-SDIC [15]. Ces mesures et leur exploitation ne sont pas présentées ici.

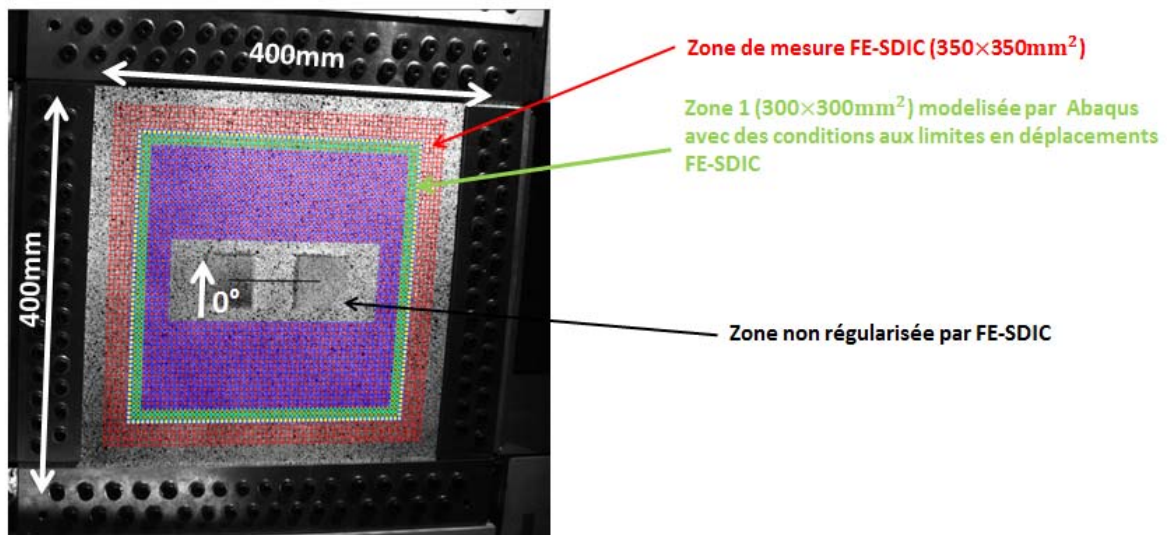


Figure 7 – Modélisation DPM de l'éprouvette composite entaillée.

La mesure par stéréocorrélation peut s'effectuer à plusieurs stades (Figure 8). D'abord la mesure de forme initiale peut être réalisée (courbure de la plaque). Ensuite les déformations associées à la fixation de la plaque sur le bâti peuvent être déterminées en comparant les images avant et après serrage. Enfin les déplacements liés aux véritables étapes de chargement sont évaluées.

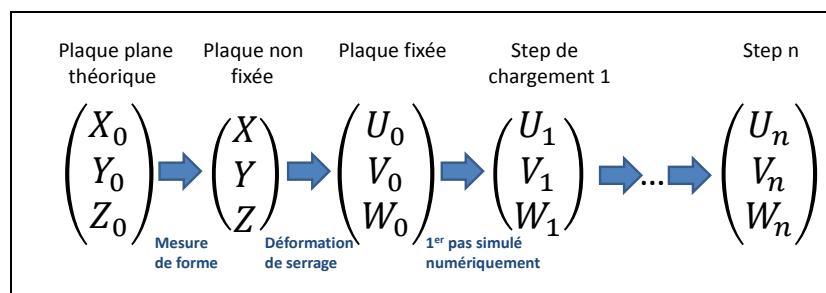


Figure 8 - Les différentes étapes de mesure d'un essai VERTEX

Le passage de la plaque non fixée à la plaque fixée inclut un mouvement de corps solide non négligeable. De plus, un changement dans l'éclairage entre les deux photos (plaque non fixée et plaque fixée) a souvent été observé lors des différents essais. Cette variation d'intensité lumineuse est très probablement due à un léger déplacement du spot lumineux utilisé pour éclairer la plaque, survenu lors des nombreuses manutentions nécessaires à son installation (serrage de nombreuses vis et câblage des jauges de déformation). Ces deux facteurs ont généré des erreurs de mesure. L'image de « référence » choisie pour la détermination des conditions limites utiles à la simulation numérique est donc l'image de la plaque fixée.

Numériquement, le calcul est donc divisé en « n » pas de calcul correspondant aux « n+1 » images fournies par les caméras de stéréocorrélation. Une variation linéaire des déplacements est appliquée entre les différents états déterminés. Une approximation du chargement (discrétisation en « n » segments de droite) est donc inhérente à la méthode proposée.

## 4.2 Résultats

La courbe Contrainte/Déformation déterminée numériquement est très similaire à celle déterminée expérimentalement (Fig. 9) jusqu'au point **F** dans le cas de l'essai de cisaillement. Les valeurs de contraintes et de déformations sont normées en utilisant comme références les valeurs maximales obtenues lors des essais de traction lisse [13]. Un film de l'essai est accessible via le site [10].

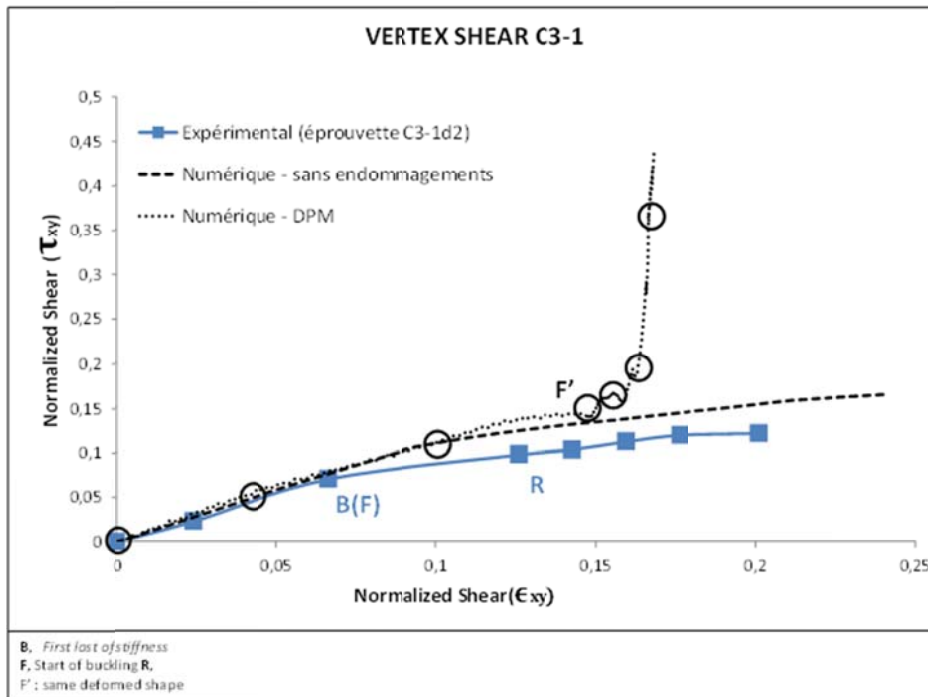


Figure 9 – Comparaison calcul-essai dans le cadre d’un essai de cisaillement VERTEX.

Une divergence probablement d’origine numérique apparaît dans le calcul explicite au-delà du point **F**. La première inflexion de la courbe est due au phénomène de postflambement en cisaillement de la plaque. Malgré le fait que les courbes contraintes déformations expérimentales et numériques soient proches, la cloque de flambement numérique est symétrique de la réelle et ce avec ou sans endommagements simulés. Ceci montre que la méthode d’introduction des déplacements choisie est encore perfectible avec en particulier une meilleure prise en compte des imperfections initiales, ce qui est crucial pour une bonne modélisation des phénomènes de postflambement. Malgré tout, le modèle DPM permet d’identifier correctement l’initiation des endommagements observée au point **R** (Fig. 10) ainsi que les faciès de ruptures finaux (Fig. 11). De bonnes comparaisons sont aussi obtenues en ce qui concerne les déformées au point **F** mais ne sont pas présentées dans cet article. De même, les résultats associés à la modélisation du comportement en traction sont aussi très cohérents avec l’expérience mais ne sont pas non plus présentés ici.

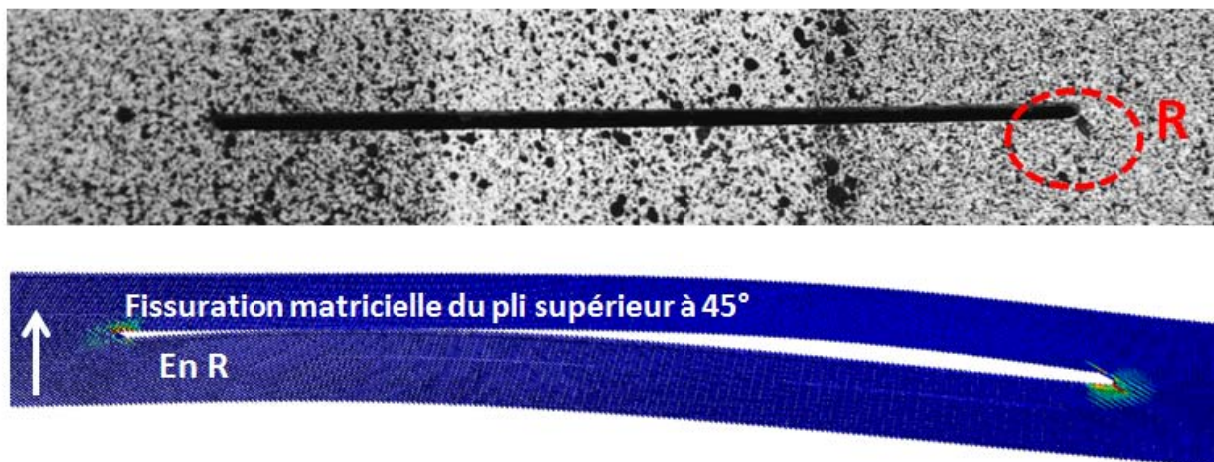
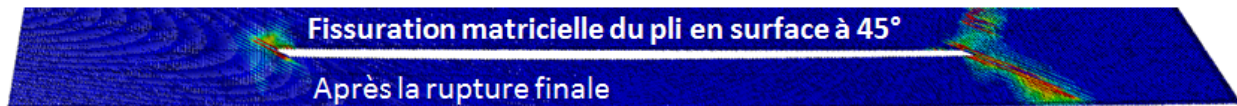


Figure 10 – Premier endommagement détecté en surface du stratifié composite. Comparaison numérique/expérimental.





## Essai de Cisaillement VERTEX

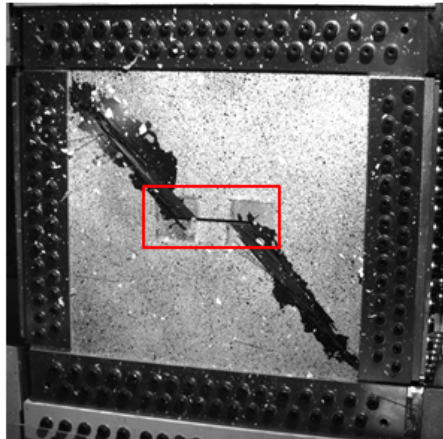


Figure 11 – Faciès de rupture Final – Comparaison numérique/expérimental

## 5. Conclusions

Des essais structuraux sous sollicitations complexes ont été réalisés et ont démontré leur efficacité. Une méthodologie de mesure par FE-DIC spécifique à cette problématique a été développée et permet un dialogue essai/calculs cohérent car utilisant le même maillage. Enfin, une méthode de calcul des endommagements composites qui a démontré son efficacité sur un grand nombre de problématiques à l'échelle du coupon (Impacts, CAI, Impact sur champ, rupture trouée et entaillée) a pu être étendue à des problématiques structurales. Ce travail ouvre des perspectives en termes de modélisation à des échelles supérieures mais aussi ouvre la possibilité de modifier profondément la pyramide des essais actuelle en développant le « Predictive Virtual Testing ».

## Remerciements

Les recherches et résultats présentés dans ce papier ont été financés par l'Agence Nationale de la Recherche, projet VERTEX, MATETPRO (ANR - 12 - RMNP-0001).

## Références

- [1] V. Achard, C. Bouvet, B. Castanié, and C. Chirol, "Discrete ply modelling of open hole tensile tests," *Compos. Struct.*, 113:369–381, 2014.
- [2] E. Abisset, F. Daghia, and P. Ladevèze, "On the validation of a damage mesomodel for laminated composites by means of open-hole tensile tests on quasi-isotropic laminates," *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, 42(10):1515–1524, 2011.
- [3] B. Castanié, S. Crézé, L. Risse, J.J. Barrau and F. Lachaud. Experimental analysis of failures in filled hole compression tests of carbon/epoxy laminate. *Composite Structures*. 92(5):1192-99. 2010.
- [4] F. Laurin, N. Carrere, C. Huchette, and J.-F. Maire, "A multiscale hybrid approach for damage and final failure predictions of composite structures," *J. Compos. Mater.*, 47, (20–21):2713–2747, 2013.
- [5] J. Bertolini, B. Castanié, J.-J. Barrau and J.-P. Navarro. Multi-level experimental and numerical analysis of composite stiffener debonding Part 2 : Element and panel level. *Composite Structures*. 90(10):392–403. 2009
- [6] Chiara Bisagni, Carlos G. Dávila. Experimental investigation of the postbuckling response and collapse of a single-stringer specimen. *Composite Structures* 108 (2014) 493–503
- [7] Chiara Bisagni, Riccardo Vescovini, and Carlos G. Dávila. "Single-Stringer Compression Specimen for the Assessment of Damage Tolerance of Postbuckled Structures", *Journal of Aircraft*, 48(2) :495-502, 2011.
- [8] B. Castanié, J.-J. Barrau and J.-P. Jaouen. Theoretical and experimental analysis of asymmetric sandwich structures. *Composite Structures*. 55(3):295-306. 2002
- [9] B. Castanié, J.-J. Barrau, J.-P. Jaouen and S. Rivallant. Combined shear/compression structural testing of asymmetric sandwich structures. *Experimental Mechanics*. 44(5):461-472. 2004
- [10] <http://www.institut-clement-ader.org/vertex/>.
- [11] Klein, H., "General About Buckling Tests With Thin-walled Shells," Rapport DLR- Mitt, 89-13.

- [12] J.-C. Passieux, F. Bugarin, C. David, J.-N. Périé and L. Robert. Multiscale displacement field measurement using digital image correlation : Application to the identification of elastic properties. *Experimental Mechanics*. 55(1)121-137. 2015.
- [13] Serra J., Bouvet C., Castanié B. and Petiot C. Scaling effect in notched composites: The Discrete Ply Model approach. *Composite Structures*. 148, 127-143. 2016
- [14] Sztetek P., Olsson R. (2008). Tensile stiffness distribution in impacted composite laminates determined by an inverse method. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. Vol. 39, n°8, p. 1282-1293.
- [15] J.-E. Pierré, J.-C. Passieux and J.-N. Périé. Finite Element Stereo Digital Image Correlation: framework and mechanical regularization. *Experimental Mechanics*. 53(7)443-456. 2017