

# **Analyse des effets des singularités induites par le procédé AFP au sein d'éprouvettes pleines et trouées en compression par dialogue essai/calcul**

## ***Analysis of the effects of singularities induced by AFP in plain and open hole coupons in compression by test/simulation dialog***

Loïc Marquet<sup>1</sup>, C. Huchette<sup>1</sup>, J-M. Garcia<sup>1</sup>, C. Fagiano<sup>1</sup>, F-H. Leroy<sup>1</sup>, A. Chiappini<sup>2</sup>, A. Rassineux<sup>3</sup>, S. Miot<sup>2</sup>

1 : DMAS, ONERA  
Université Paris-Saclay  
29 avenue de la Division Leclerc, F-92322 Châtillon Cedex 3  
e-mail : loic.marquet@onera.fr, cedric.huchette@onera.fr, juan\_manuel.garcia@onera.fr, christian.fagiano@onera.fr

2 : IRT Saint Exupéry  
4 rue Tarfaya, F-31405 Toulouse Cedex 3  
e-mail : attilio.chiappini@airbus.com, stephanie.miot@irt-saintexupery.com

3 : Laboratoire ROBERVAL, UTC  
Rue du docteur Schweitzer, CS 6039, 60203, Compiègne Cedex  
e-mail : alain.rassineux@UTC.fr

### **Résumé**

Le procédé AFP induit inévitablement des singularités de type *gaps* et *overlaps*. Lorsque ces singularités sont placées au sein d'éprouvettes en fibres de carbone continues imprégnées de matrice thermodurcissable, les propriétés à rupture en compression sont modifiées. Les essais expérimentaux de compression sont complexes à interpréter en raison de phénomènes de couplage liés à des effets de structures difficiles à caractériser malgré une instrumentation riche. Pour aider à l'exploitation des données d'essais, une démarche de dialogue essai-calcul est mise en place afin de simuler numériquement les essais. La démarche permet de comparer plusieurs géométries maillées et lois de comportement du pli afin de définir le niveau de détail de modélisation nécessaire pour simuler les effets des singularités.

### **Abstract**

The AFP process induces unavoidable singularities such as gaps and overlaps. When singularities are placed within coupons made of continuous carbon fibres impregnated with a thermoset matrix, the failure properties under compression are modified. Experimental tests results are difficult to analyse because of coupling effects that are probably due to structural effects that are difficult to characterise despite a rich multi-instrumentation. To better understand the test results, an approach based on a dialogue between the test results and the numerical simulations is developed. The method allows to compare several meshed geometries and ply material laws in order to define the level of modelling details required to simulate the effects of singularities.

**Mots Clés :** AFP, singularités, *gaps/overlaps*, dialogue essai-calcul

**Keywords :** AFP, singularities, *gaps/overlaps*, test-simulation dialog

## **1. Introduction**

Le placement de fibres automatisé (en anglais AFP pour *Automated Fiber Placement*) est un procédé de mise en forme de matériaux polymère renforcé par des fibres (CFRP) qui consiste en la dépose en parallèle de mèches de fibres de carbone continues, pré-imprégnés de matrice thermodurcissable appelé *prepreg*. Ce procédé robotisé et automatisé permet l'application des CFRPs à de nouvelles

pièces d'avion (fuselage, pointe avant ou structures d'ailes d'avions). Ses avantages sont notamment (i) d'arrêter et reprendre la dépose de chaque bande indépendamment et (ii) de contrôler la vitesse de dépose de chaque bande pour suivre des trajectoires courbes. Cependant par le design même de ces nouvelles pièces réalisables par AFP, ou par des événements involontaires lors de la dépose des mèches, le procédé AFP induit des singularités inévitables tels que des *gaps* (zone vide de matière) et des *overlaps* (chevauchement entre deux mèches appartenant au même pli).

La présence de ces singularités au sein d'une éprouvette modifie localement l'épaisseur et induit des ondulations hors plan des plis adjacents. Lan *et al.* [1-2] ont étudié ces phénomènes et ont montré l'intérêt de la *Caul plate* pour annuler la variation d'épaisseur avec cependant l'inconvénient de conserver voire accentuer l'angle d'ondulation hors plan. En plus des effets sur la géométrie, les singularités ont un effet sur les propriétés à rupture des éprouvettes. Croft *et al.* [3] et Woigk *et al.* [4] ont testé en compression différentes configurations d'éprouvettes pleines et trouées intégrant des *gaps* orientés selon  $0^\circ/45^\circ$  ou  $90^\circ$ . Par rapport à une éprouvette sans singularité, la variation des propriétés à rupture d'une éprouvette avec singularité est influencée par l'orientation, le nombre, le positionnement et le type de singularité. De plus, cette influence peut s'avérer contraire suivant la considération d'éprouvettes pleines ou d'éprouvettes trouées. Il est alors difficile d'établir des tendances claires et de caractériser les effets des singularités. Des travaux expérimentaux de compression réalisés par Marquet *et al.* [5] sur diverses configurations de singularités positionnées au sein d'éprouvettes ont mis en évidence ces variations de propriétés à rupture sans toutefois permettre de clarifier les effets des singularités. Aucun endommagement n'est observable avant 95% de la charge à rupture malgré l'utilisation d'une instrumentation riche. L'observation des champs cinématiques mesurés par stéréo-corrélation d'images numériques met en évidence une hétérogénéité traduisant une flexion de l'éprouvette quel que soit son design. Cette flexion mène à un chargement qui n'est pas un chargement de compression pure. Il est alors difficile d'exploiter les résultats d'essais ou de comparer les différentes configurations de singularités car les effets des singularités doivent être étudiés comme des effets de structure à l'échelle de l'éprouvette et non plus comme des effets matériau.

Se pose alors la question de l'apport d'un dialogue entre les essais et le calcul pour surpasser ces difficultés d'exploitation et de compréhension des résultats d'essais et faciliter la caractérisation des effets des singularités sur les propriétés à rupture.

## 2. Matériel et méthodes

Cette étude porte sur des éprouvettes trouées sans et avec des singularités de type *gaps*. La stratification de l'éprouvette avec singularités est présentée dans la Fig. 1. Les *gaps* sont représentés par des mèches manquantes dans les plis à  $0^\circ$  (en vert), les plis à  $90^\circ$  (en bleu) et les plis à  $\pm 45^\circ$  (en rouge). Les éprouvettes sont extraites de plaques fabriquées par le procédé AFP avec des mèches de *prepreg* de 6.35 mm de largeur. La stratification quasi-isotrope de 16 plis et le positionnement des singularités respecte les règles de conception industrielle AIRBUS et les dimensions (115 mm de long, 25 mm de large) des éprouvettes respectent également la norme d'essais de l'avionneur [6]. Pour garantir une épaisseur constante, les plaques sont traitées thermiquement en autoclave et sous la pression d'une *Caul plate* en respectant le cycle de cuisson défini par le fournisseur. Les éprouvettes sont testées en chargement de compression monotone jusqu'à rupture dans une machine électromécanique Zwick-Roell de 150kN. Le montage expérimental, présenté dans la Fig. 2 *Montage expérimental de compression* est composé de quatre caméras optiques (en violet) qui forment deux systèmes de stéréo-corrélation d'images numériques. Une observation de la géométrie internes des éprouvettes à l'état initial est assurée par des scans *ex-situ* au microtomographe à rayons-X de l'IRT Saint Exupéry à Toulouse, avec une résolution spatiale de  $14 \mu\text{m}/\text{voxel}$ . C'est à l'aide de l'ensemble

de ces moyens de mesures que la démarche numérique présentée dans le paragraphe suivant est alimentée.

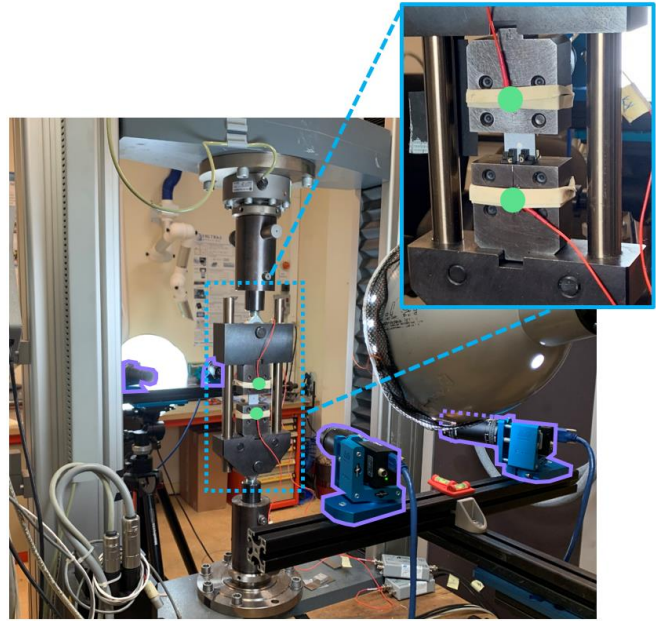
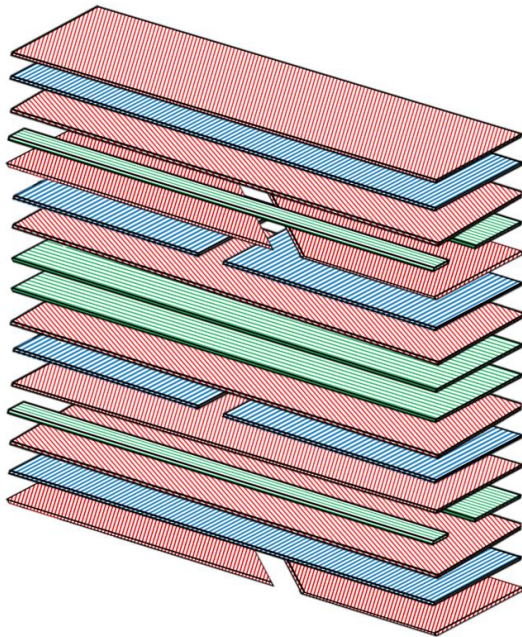


Fig. 1 Schéma de la stratification de l'éprouvette avec singularités de type gaps

Fig. 2 Montage expérimental de compression

### 3. Démarche numérique

La démarche numérique a pour objectif d'aider à la compréhension et la caractérisation des effets des singularités. Pour se faire, il est nécessaire d'intégrer des conditions aux limites représentative de l'essai expérimental mais également d'évaluer le niveau de détails nécessaire et suffisant pour représenter les singularités et simuler leurs effets. La démarche est donc fondée sur la résolution d'un problème aux éléments finis à l'aide du solveur implicite d'ABAQUS 2022. Une approche de type *submodelling* (zoom structural) [7] permet de piloter en déplacement un modèle local détaillé à partir d'un modèle global. Notre approche se propose d'intégrer au modèle global les déplacements expérimentaux mesurés par corrélation d'images numériques. Le modèle local permet la comparaison entre différentes descriptions géométrique de l'éprouvette et plusieurs lois de comportement matériaux.

#### 3.1 Modèle global

Le modèle global consiste en un maillage grossier avec un unique élément volumique solide dans l'épaisseur. La largeur et l'épaisseur du volume représenté sont définies par des mesures expérimentales de l'éprouvette et la longueur du volume est définie à partir de la longueur de la zone utile. Les champs de déplacement calculés expérimentalement sur chaque face de l'éprouvette par stéréo-corrélation d'images numériques sont projetés sur le maillage du modèle globale à chaque nœud par interpolation suivant la méthode des plus proches voisins. Cette méthode permet de combler les zones où l'indicateur de corrélation du logiciel VIC 3D n'est pas satisfaisant. En effet, la Fig. 3-A montre le nuage de points issu des mesures de déplacement hors plans repositionnés dans l'espace réel par rapport aux mors et met en évidence certaines zones peu denses en nombre de points de mesure pour cause de corrélation insatisfaisante. Au final, le modèle global agit comme un filtre passe-bas en lissant les gradients de déplacement dus au bruit de mesure de la corrélation d'images numériques.

### 3.2 Modèle local

Le modèle local est défini selon trois approches différentes à savoir (i) un modèle coque, (ii) un modèle volumique « théorique » et (iii) un modèle volumique « haute-fidélité ». Les modèles locaux sont pilotés en déplacement à partir du modèle global. En effet, les déplacements dans les trois directions de l'espace sont appliqués sur les nœuds présents sur les surfaces supérieures et inférieures surlignées en rouge dans les Fig. 3-C et Fig. 3-D. La première approche est un modèle hybride volumique/coque se basant sur les travaux de Marouene *et al.* [8]. La zone centrale est modélisée par des éléments coques qui ne peuvent pas être pilotés en déplacement par un modèle global. Cela impose l'utilisation d'éléments volumiques solides en haut et en bas de la zone centrale, reliés par une liaison charnière aux éléments coques, pour transmettre les déplacements imposés par le *submodelling* ainsi que les rotations. Dans la zone centrale coque, différentes sections colorées sur la Fig. 3-C sont délimitées pour pouvoir définir les différentes stratifications locales, en fonction des configurations de singularités au sein de l'éprouvette. Les *gaps* sont définis par des plis avec les propriétés matériau de la matrice seule et les *overlaps* sont représentés par un pli supplémentaire dans la stratification. Afin de garantir une épaisseur constante du modèle locale, l'épaisseur d'un pli est redéfinie localement comme l'épaisseur totale de l'éprouvette mesurée expérimentalement divisée par le nombre local de plis. Pour toutes les différentes approches du modèle local, une loi élastique ou une loi d'endommagement et de rupture progressive OPFM [9] est utilisée pour décrire le comportement des plis. La méthode « théorique » est une approche volumique avec un élément par pli dans l'épaisseur basée sur la description analytique de la stratification d'après les travaux de Chiappini *et al.* [10]. La Fig. 3-D montre le maillage associé à cette approche volumique pour une éprouvette sans singularités. Dans le cas d'une éprouvette avec singularités, les arrêts et reprises de plis sont intégrés dans le maillage d'après le design des. L'ondulation des plis ainsi que la variation d'épaisseur induits par les singularités sont définies par des lois analytiques empiriques. La troisième méthode « haute-fidélité » est également une approche volumique. Celle-ci se base sur une méthode de segmentation des scans obtenues par micro-tomographie à rayons-X. En effet, ces scans sont post-traités pour isoler chaque pli et les labeliser. Le résultat de ce post-traitement permet d'obtenir une voxelisation labélisée qui est ensuite maillée [11]. Bien que visible sur les résultats de microtomographie, les poches de matrice ne sont pas prises en compte et une seule phase de pli est considérée. Cette méthode permet de prendre en compte la géométrie réelle des plis et des singularités au sein de la stratification dont les ondulations hors plan et dans le plan. L'orientation matériau est définie localement pour chaque élément.

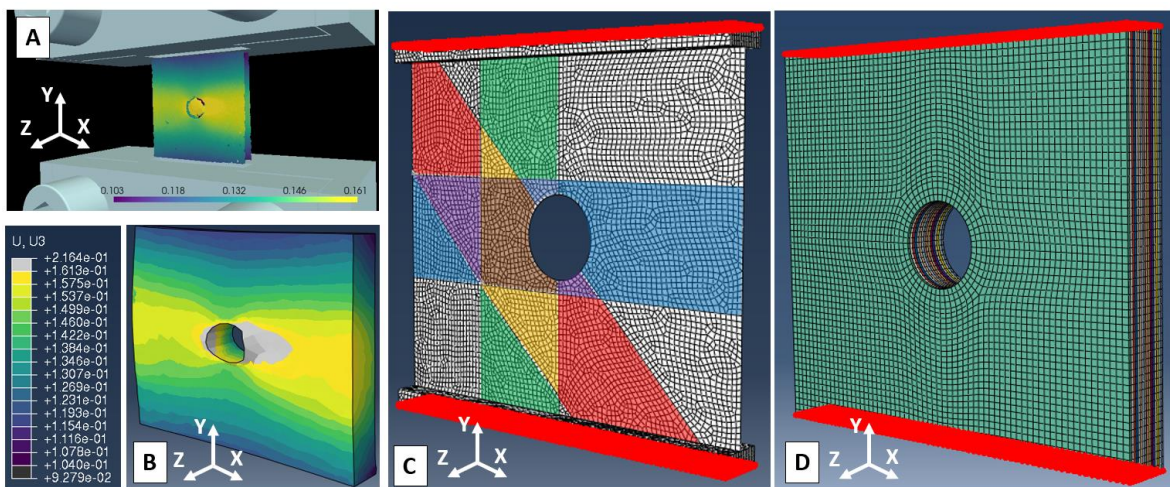


Fig. 3 Champs de déplacement hors plan calculé par stéréo-corrélation d'image numérique (A), Déplacement hors plan résultant du modèle global (B), modèle local 3D/shell (C) et modèle local 3D analytique (D)

### 3.3 Résultats

La Fig. 4 présente les résultats pour une éprouvette trouée de référence sans singularité. Cela permet de comparer les courbes force/déplacement mesurées expérimentalement (en bleu) et calculées numériquement avec le modèle coque et une loi élastique (en orange), avec le modèle coque et OPFM (en vert) et avec le modèle « théorique » et OPFM (en rouge). Pour un déplacement vertical de 1.32 mm imposé correspondant à l'instant avant la rupture, le modèle coque avec la loi élastique prédit un chargement avec 19% d'écart au chargement mesuré expérimentalement. L'utilisation de la loi OPFM réduit cet écart à 7% pour le modèle coque et 6% pour le modèle « théorique ».

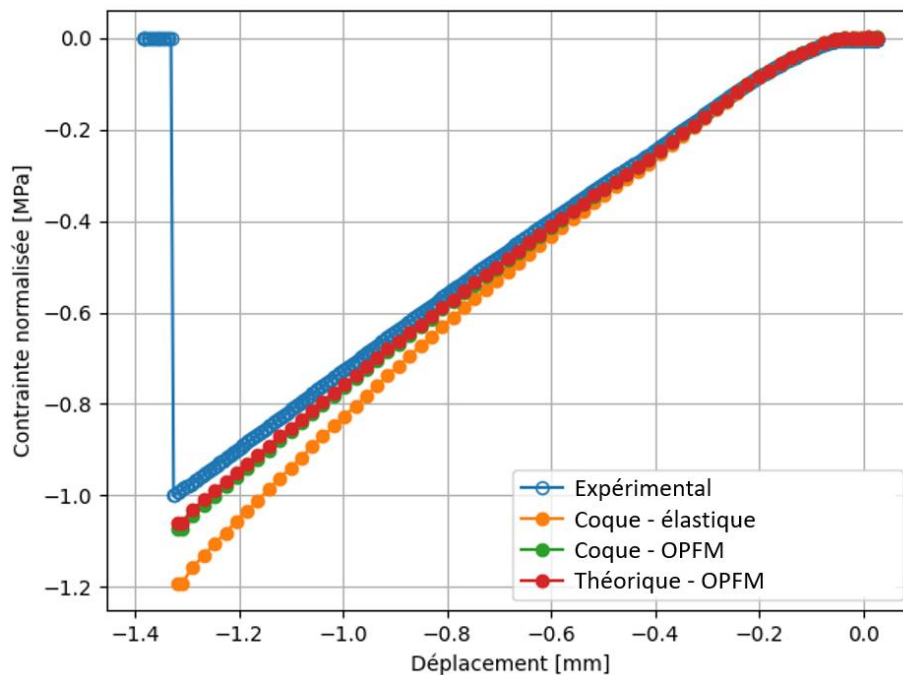


Fig. 4 Courbes contrainte vs déplacement normalisées d'une éprouvette de référence sans singularité

## 4. Conclusion

La modularité de cette démarche numérique permet de facilement comparer les différentes approches et hypothèses concernant les géométries maillées et les lois de comportement afin de définir le niveau de détail de modélisation nécessaire pour simuler les effets des singularités et exploiter les données d'essais expérimentaux.

Le pilotage du modèle local à partir des déplacements dans l'espace calculés par corrélation d'images numériques est nécessaire pour prendre en compte les interactions entre l'éprouvette et le montage expérimentale ainsi que les effets structures induits par les singularités.

Les premiers résultats montrent la nécessité d'utiliser une loi d'endommagement progressif. La comparaison avec l'approche 3D par segmentation de tomographie permettra de statuer sur le niveau de détail géométrique nécessaire.

Ensuite, la comparaison quantitative des champs cinématiques entre les différentes approches, y compris le modèle « haute-fidélité », donnera une information importante quant à la capacité des modèles à simuler l'essai expérimentale.

## Remerciements

Ces travaux s'intègrent dans le projet PhyDefect porté par l'ONERA et le projet TRUST porté par l'IRT Saint Exupéry.

## Références

- [1] M. Lan, D. Cartié, P. Davies, et C. Baley, « Influence of embedded gap and overlap fiber placement defects on the microstructure and shear and compression properties of carbon–epoxy laminates », *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 82, p. 198-207, mars 2016, doi: 10.1016/j.compositesa.2015.12.007.
- [2] M. Lan, D. Cartié, P. Davies, et C. Baley, « Microstructure and tensile properties of carbon–epoxy laminates produced by automated fibre placement: Influence of a caul plate on the effects of gap and overlap embedded defects », *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 78, p. 124-134, nov. 2015, doi: 10.1016/j.compositesa.2015.07.023.
- [3] K. Croft, L. Lessard, D. Pasini, M. Hojjati, J. Chen, et A. Yousefpour, « Experimental study of the effect of automated fiber placement induced defects on performance of composite laminates », *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 42, n° 5, p. 484-491, mai 2011, doi: 10.1016/j.compositesa.2011.01.007.
- [4] W. Woigk, S. R. Hallett, M. I. Jones, M. Kultz, A. Hornig, et M. Gude, « Experimental investigation of the effect of defects in Automated Fibre Placement produced composite laminates », *Compos. Struct.*, vol. 201, p. 1004-1017, oct. 2018, doi: 10.1016/j.compstruct.2018.06.078.
- [5] L. Marquet *et al.*, « Analysis of the effects of automated fiber placement singularities by multi-instrumentated tests on plane and open-hole coupons under compression loading », présenté à ECCM21, juill. 2024, p. 1422-1429.
- [6] « AITM\_1-0008\_2010 - Compression Strength ».
- [7] « ABAQUS Analysis User's Manual (v6.6) ». Consulté le: 21 novembre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.6/books/usb/default.htm?startat=pt04ch10s02aus51.html>
- [8] A. Marouene, « Experimental and numerical investigation on the open-hole compressive strength of AFP composites containing gaps and overlaps », *J. Compos. Mater.*, vol. 51, n° 26, p. 3631-3646, nov. 2017, doi: 10.1177/0021998317690917.
- [9] F. Laurin, « Presentation of the OPFM approach, its implementation in abaqus/explicit and effect of defects methodology proposed by ONERA », ONERA, the French laboratory - Département Material and Structures, TECHNICAL REPORT, sept. 2021.
- [10] A. Chiappini, S. Miot, L. Barrière, L. Marquet, C. Huchette, et C. Fagiano, « A numerical approach for modelling the effects of AFP singularities », in *Special Sessions*, juill. 2024, p. 828-835.
- [11] A. Rassineux, « Robust conformal adaptive meshing of complex textile composites unit cells », *Compos. Struct.*, vol. 279, p. 114740, janv. 2022, doi: 10.1016/j.compstruct.2021.114740.