

# Etude de la méthode de staggering appliquée aux jeux inter-bandes en placement de fibres automatisé (AFP)

## *Study of the staggering method applied to pass-to-pass gaps in automated fibre placement (AFP)*

Félix THÉBAULT<sup>1,2</sup>, Alexandre CLÉMENT<sup>1</sup>, Sylvain FRÉOUR<sup>1</sup>, Gwénoél LE MOAL<sup>2</sup> et Pascal CASARI<sup>1</sup>

1 : Nantes Université, Ecole Centrale Nantes, CNRS, GeM, UMR 6183, F-44600 Saint-Nazaire, France  
e-mail : alexandre.clement@univ-nantes.fr

2 : CIMPA S.A.S., 1 avenue André-Marie Ampère, 31770 Colomiers, France  
e-mail : felix.thebault@cimpa.com

### Résumé

Le placement de fibres automatisé est un procédé permettant de fabriquer des pièces à géométries complexes en matériaux composites thermoset, notamment utilisé dans l'industrie aéronautique. Cette technologie nécessite de laisser un jeu entre les bandes déposées par passes successives afin d'éviter les superpositions de matière. Ces jeux inter-bandes provoquent l'apparition de zones faiblement renforcées, réduisant les performances mécaniques. Afin de limiter l'impact de ces singularités (zones riches en résine), la méthode de staggering, qui consiste à décaler les plis de même orientation, est couramment utilisée. Bien que des études aient montré les bénéfices du staggering pour la résistance en traction et en compression, aucune norme ne régit cette méthode. Cet article présente un état de l'art ainsi que des analyses numériques et expérimentales sur les effets des jeux inter-bandes et du staggering. Différentes plaques composites ont été fabriquées et étudiées à l'aide d'observations microstructurales afin d'alimenter une modélisation des jeux inter-bandes. Un modèle de stratifié incorporant les paramètres associés aux jeux inter-bandes et au staggering a été développé, et des simulations visant à optimiser les paramètres de fabrication ont été réalisées. Des essais mécaniques ont permis d'évaluer la pertinence du modèle proposé.

### Abstract

Automated fiber placement is a process for manufacturing complex geometry parts from thermoset composite materials, used in the aerospace industry. This technology requires to leave a gap between the strips deposited by successive passes in order to avoid overlaps of material. These pass-to-pass gaps cause the appearance of weakly reinforced areas, reducing mechanical performance. To mitigate the impact of these singularities (resin-rich areas), the staggering method, which consists in shifting plies of the same orientation, is often used. Although studies have shown the benefits of staggering for tensile and compressive strength, there is no standard governing this method. This article presents a state of the art as well as numerical and experimental analyses on the effects of inter-band games and staggering. Various composite plates were manufactured and studied using microstructural observations to feed a model of pass-to-pass gaps. A laminate model incorporating the parameters associated with pass-to-pass gaps and staggering was developed, and simulations to optimize manufacturing parameters were carried out. Mechanical tests were used to assess the proposed model.

**Mots Clés :** Placement de fibres automatisé ; Défauts composites ; Analyse par éléments finis ; Méthode de staggering.

**Keywords :** Automated fiber placement ; Composites defects; Finite element analysis (FEA); Staggering method.

## 1. Introduction

### 1.1 Mise en contexte

Les structures aéronautiques sont soumises à des efforts variés, et les matériaux composites s'avèrent particulièrement adaptés à ces contraintes grâce à leurs excellentes performances mécaniques spécifiques. Leur orthotropie permet de concevoir des pièces optimisées, capables de répondre précisément aux exigences de chaque élément de l'aéronef. Les méthodes de production des pièces composites étaient traditionnellement manuelles, et sont progressivement remplacées par des méthodes robotisées apparues dès le début des années 70 [1], telles que le placement de fibres

automatisé (ou AFP pour *Automated Fiber Placement*). Cette technologie a été progressivement améliorée depuis les années 80, tout en s'imposant comme une solution prévalente pour la fabrication de pièces en composites à géométries complexes [2].

Cependant, l'application de ce procédé aux composites thermodurcissables impose de laisser un jeu à l'interface entre deux bandes de matière déposées afin d'éviter les surépaisseurs. Différentes améliorations du procédé AFP ont permis de réduire la largeur imposée des jeux inter-bandes, notamment grâce à l'utilisation de robots mieux asservis et de matière à la largeur mieux contrôlée, assurant une moindre variabilité dimensionnelle [2,3]. Les jeux sont atténués lors des étapes suivantes de la fabrication (dépose des plis supérieurs et cuisson), mais ils ne sont pas complètement résorbés, créant ainsi des zones riches en résine, où l'on retrouve un taux de fibre plus faible. Ces zones présentent des propriétés mécaniques inférieures, notamment des modules réduits et des limites de résistance mécaniques plus basses, affaiblissant la structure finale. Lorsque ces poches de résine sont isolées, leurs effets sont minimes, mais elles peuvent se révéler critiques lorsqu'elles sont concentrées localement dans le volume de la pièce [4,5].

Malgré les efforts réalisés pour les réduire, les effets des jeux inter-bandes doivent être mitigés : la méthode de décalage de grilles aussi appelée méthode de *staggering* peut être utilisée. Elle permet de répartir les zones affaiblies dans l'épaisseur du stratifié, limitant ainsi leur impact sur la résistance globale. Le staggering consiste en un décalage des plis consécutifs de même orientation dans la direction perpendiculaire à la direction principale du pli, comme illustré Figure 1. Ce décalage est caractérisé par une valeur métrique, et parfois un nombre de plis couvrants minimum avant que le motif puisse être répété. Bien qu'utilisé dans les milieux scientifiques et industriels, il n'existe pas de règle concernant l'application du staggering. Une étude approfondie des effets des variations des paramètres d'application de cette méthode permettrait de les modéliser pour optimiser l'utilisation du staggering.

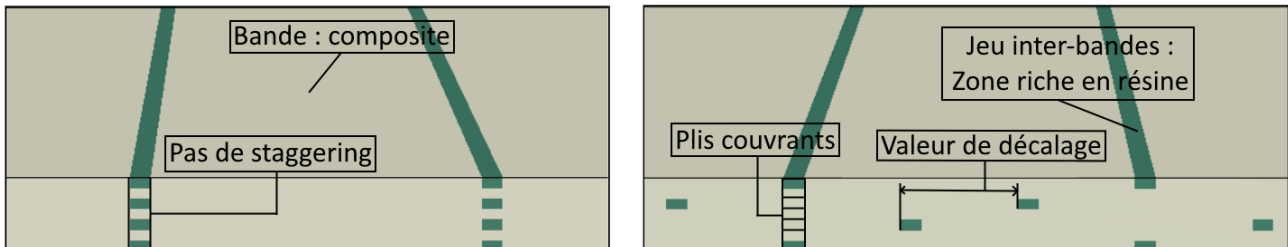


Fig. 1. Illustration du staggering et de ses paramètres.

## 1.2 Revue de littérature

Les jeux inter-bandes ont été étudiés dans un article de Guin et al. en 2018 [5], où les auteurs ont présenté une analyse approfondie des profils des différents jeux présents dans les plis, ainsi que de leurs conséquences sur la tenue des pièces en tension et en compression. Les images des microstructures montrent que même à la frontière entre les rubans sans jeu, on observe une réduction du taux de fibre local, comme le montre la Figure 2. Leurs essais ont également montré que lorsque les zones affaiblies ne sont pas concentrées, elles n'ont que peu d'impact, contrairement aux éprouvettes où les jeux sont plus regroupés, qui présentent des ondulations réduisant nettement la résistance mécanique.

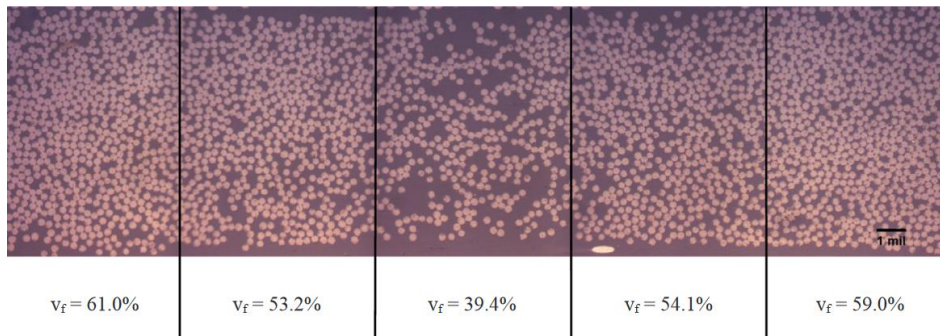


Fig. 2. Evolution du taux de fibres à l'interface entre deux rubans (Guin et al. [5]).

La thèse de Marine Lan [6], publiée en 2016, présente une étude portant sur des échantillons fabriqués en AFP où un jeu inter-bandes est volontairement introduit sur les plis de même orientation. Les éprouvettes étudiées se différencient par leur séquence d'empilement ainsi que par la largeur des jeux introduits. Elles ont été observées au MEB, faisant apparaître les ondulations dans la microstructure. Elles ont ensuite été testées en traction, en compression, ainsi qu'en cisaillement plan. La tenue mécanique des pièces a été fortement impactée par la séquence d'empilement ainsi que par la largeur des jeux. L'utilisation d'une contre-plaque à la cuisson permet de mitiger les effets de ces jeux.

Dans une étude de 2009, Blom et al. [7] ont étudié les effets du staggering en présence de singularités induisant des zones riches en résine à l'aide d'un modèle numérique simulant une plaque sollicitée en compression. Le modèle permettait de faire varier la quantité de singularités et d'appliquer du staggering lors des simulations. Dans ces travaux, le décalage utilisé est d'une largeur de bande divisée par le nombre de plis de même orientation. L'application du staggering a permis d'augmenter significativement la résistance à la rupture en compression prédite par les simulations.

Un article de Falcó et al. en 2014 [8] a permis de confirmer l'intérêt du staggering pour limiter les effets des singularités concentrées localement. La méthode utilisée pour l'étude consistait en un décalage des bandes de deux fois la largeur d'une mèche entre chaque pli de même orientation. Des éprouvettes percées et non percées ont été chargées en traction, et les résultats ont montré que les échantillons réalisés avec la méthode de staggering présentent un comportement mécanique similaire à une éprouvette sans singularité.

Un modèle simulant l'arrangement interne des plis comportant des singularités a été présenté en 2015 par Li et al. [9]. Dans ce modèle, il est possible de faire varier différents paramètres concernant les singularités introduites et notamment la valeur de décalage laissée entre les plis de même orientation. Les résultats du modèle montrent qu'une valeur de staggering plus importante améliore la tenue aux chargements en traction et en compression de l'éprouvette simulée.

L'analyse de la littérature démontre l'impact négatif des singularités, et en particulier le taux de fibres au niveau des jeux inter-bandes, sur la résistance mécanique des pièces composites. L'impact positif de l'application du staggering afin de limiter ces effets a été démontré. Néanmoins, les paramètres utilisés pour la création des motifs de staggering ont été définis ad hoc dans les différentes études. En effet, il n'existe à ce jour pas de règle permettant de définir ces paramètres en fonction des contraintes de fabrication et de conception. L'objectif des travaux présentés ci-après est de modéliser numériquement le staggering sur un stratifié composite afin d'analyser les effets de ces paramètres. Une étape préalable à cette modélisation est la définition des singularités affectant le stratifié, notamment le gradient de taux de fibres dans les jeux inter-bandes.

## 2. Caractérisation du taux de fibres dans les jeux inter-bandes

Afin de modéliser le comportement d'un pli incluant des jeux inter-bandes, il est nécessaire de caractériser les paramètres matériau des pièces, et particulièrement la résistance mécanique le long de la largeur du jeu laissé entre les bandes. Cette résistance est fonction notamment du gradient de taux de fibres dans les jeux, observable dans la microstructure du stratifié. En faisant varier la largeur des jeux inter-bandes sur plusieurs échantillons et en observant leurs profils, une relation entre la largeur des jeux et les taux de fibres locaux peut être établie. Dans cette partie, une méthodologie de caractérisation du gradient de taux de fibres est présentée, suivi par une application à deux lots d'échantillons différents. Le premier lot provient d'éprouvettes découpées dans des plaques fabriquées aux standards aéronautiques par un industriel majeur. Le second lot est issu de plaques conçues pour les besoins de l'étude en variant les facteurs d'influence du modèle numérique des effets du *staggering*.

### 2.1 Méthodologie de caractérisation du taux de fibre

Les connaissances des propriétés matériau d'une pièce peuvent être affinées par la caractérisation du taux de fibre dans les plis. Plusieurs méthodes permettent d'obtenir des valeurs approximatives de ce taux à partir de micrographies du profil des pièces. Parmi elles, l'observation de l'aire de fibre est la plus couramment utilisée. Cette méthode utilise une micrographie de l'arrangement des fibres dans la matrice en la passant en noir et blanc à l'aide d'une valeur de seuil, permettant d'obtenir la proportion de fibre et de matrice dans l'image. Le résultat obtenu possède des incertitudes liées, entre autres, à la qualité de l'image de départ et à de la valeur du seuil de conversion choisie, souvent arbitrairement. Les outils de traitement d'images permettent aujourd'hui d'utiliser une seconde méthode, décrite par Cann et al. en 2008 [10], utilisant le dénombrement des fibres sur la micrographie. Grâce à différents filtres, il est possible d'isoler les fibres et de les compter automatiquement. Le taux de fibres est alors obtenu en multipliant le nombre de fibres par la valeur du diamètre moyen d'une fibre, et en rapportant cette aire de fibres à l'aire totale représentée par la micrographie. Il a été montré que cette méthode offre des résultats plus proches des taux de fibres réels, avec une variabilité moindre [10].

La caractérisation des taux de fibres sera menée à l'aide de la méthode de comptage des fibres sur le logiciel open-source ImageJ. Les micrographies seront traitées à l'aide de plusieurs filtres : augmentation du contraste, affûtage, conversion en binaire de l'image, *watershed* pour la séparation des entités et érosion des bords pour assurer la suppression des éclats de fibres. Un exemple de ce traitement est illustré Figure 3.

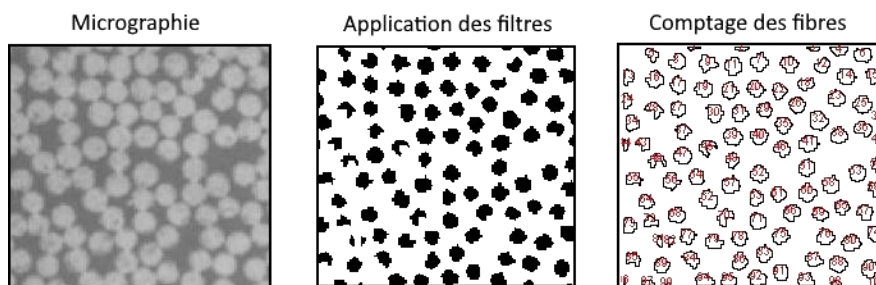


Fig. 3. Illustration de la méthode de comptage des fibres sur une micrographie.

## **2.2 Application à différentes éprouvettes**

Dans le but de comprendre les paramètres influençant le gradient de taux de fibre dans les jeux inter-bandes, plusieurs éprouvettes seront étudiées. Parmi les variables étudiées dans les plaques dont les éprouvettes sont issues, on retrouve la valeur de jeu inter-bandes, la séquence d'empilement des plis et la matière utilisée.

Le premier lot d'éprouvettes est obtenu à partir de plaques fabriquées par une machine AFP Coriolis, avec de la matière slittée de qualité aéronautique sur 72 plis. Des jeux inter-bandes de 0,8 mm ont été programmés. Ces plaques ont été découpées au jet d'eau pour fabriquer des éprouvettes dont les faces ont été polies afin d'obtenir des micrographies étudiées selon la méthode de comptage de fibres. Des plaques supplémentaires conçues pour les besoins de l'étude ont été débitées afin d'obtenir le second lot d'éprouvettes. Elles ont été fabriquées à l'aide d'une machine AFP Carbon Axis et présentent une épaisseur comprise entre 12 et 20 plis de matière towpreg Toray. L'influence de différents paramètres de la méthode de staggering ont été étudiés, notamment la largeur des jeux inter-bandes et la séquence d'empilement des plis. Des micrographies des profils des jeux inter-bandes ont également été réalisées afin de caractériser le gradient de taux de fibres.

Les résultats des travaux de cette partie seront discutés dans le but de déterminer l'influence des paramètres procédé sur le gradient de taux de fibres local. Ces résultats seront utilisés pour la conception du modèle numérique des jeux inter-bandes au sein des stratifiés.

## **3. Modélisation d'un stratifié incluant des jeux inter-bandes et analyse de l'impact du staggering**

Un modèle permettant de représenter les effets des jeux inter-bandes dans un stratifié composite a été développé. Il est possible d'y moduler plusieurs paramètres, notamment la séquence d'empilement des plis, les largeurs des jeux inter-bandes ainsi que les valeurs de décalages entre plis, dans le but d'étudier leur influence sur le comportement du stratifié lors de sollicitations mécaniques.

### **3.1 Description du modèle numérique**

L'objectif du modèle est de générer la géométrie d'un stratifié composite, lui attribuer des propriétés matériau, et lui appliquer des sollicitations mécaniques. Les résultats sont ensuite étudiés en vue d'optimiser les paramètres de staggering à appliquer.

Une séquence d'empilement, représentative d'un cas d'application d'intérêt, est d'abord définie. Une fois l'orientation des plis connue, le volume de chaque bande est généré. Les jeux inter-bandes sont matérialisés par l'espace existant entre les différentes bandes. Ils sont ensuite discrétisés en plusieurs volumes présentant différents taux de fibres afin de représenter le gradient observé expérimentalement. Le maillage de ces volumes est ensuite effectué, puis les éléments sont enrichis en y intégrant les propriétés des matériaux, les orientations des plis et les conditions limites requises. Le maillage a été réalisé à l'aide l'algorithme GMSH et le solveur utilisé est ABAQUS/Explicit.

Les propriétés matériaux dans les zones riches en résine seront définies grâce aux relations entre la largeur des jeux inter-bandes et les gradients de taux de fibres établies à l'aide des micrographies. Les résultats de simulation seront comparés à des résultats expérimentaux issus d'essais mécaniques ainsi qu'à ceux de la littérature.

## **4. Comparaison des résultats de simulation et expérimentaux**

Des éprouvettes de flexion 4 points seront extraites de plaques conçues pour les besoins de l'étude. Afin de valider le modèle proposé, les résultats obtenus par les simulations et les expériences seront

comparés. En particulier la robustesse du modèle vis-à-vis de la variation des valeurs de décalage des plis, de la largeur des jeux inter-bandes ainsi que de la séquence d'empilement sera étudiée.

#### 4.1 Description des essais

L'étude des paramètres de staggering nécessite d'inclure un minimum de motifs de décalage répétés dans la largeur et l'épaisseur, générant une section d'éprouvette importante, et rendant la réalisation d'essais de traction/compression exigeante. Un protocole a été défini permettant de mettre en avant les phénomènes d'intérêt en utilisant un dispositif d'essai de flexion 4 points. En effet, les essais de flexion 4 points sur des matériaux sandwich permettent de solliciter la peau supérieure en traction ou en compression. Les moments fléchissant sont repris par l'âme du sandwich, et la peau inférieure du sandwich est soumise à une contrainte opposée à la peau supérieure, en traction ou compression [11]. Ainsi, les sollicitations subies par les éprouvettes formant la peau supérieure ou inférieure du sandwich, sont assimilables à de la traction ou de la compression (Figure 4). Des talons placés sur la peau supérieure permettront de localiser les faiblesses dans la zone d'intérêt, tout en évitant les dommages liés aux poinçonnements appliqués par les rouleaux d'appui.

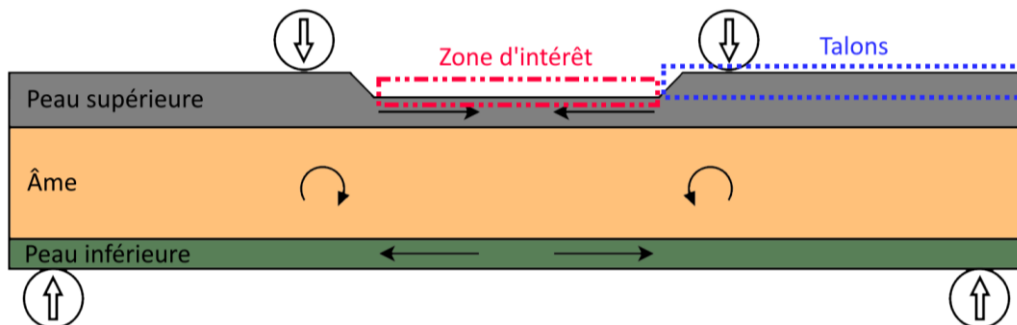


Fig. 4. Schéma des éprouvettes étudiées en flexion 4 points.

Les techniques de corrélation d'images digitales et de contrôle par émission acoustique seront utilisées. Les résultats obtenus ainsi que ceux compilés dans la littérature sur des cas similaires seront utilisés afin de vérifier la fiabilité du modèle.

#### Références

- [1] Lukaszewicz DH-JA, Ward C, Potter KD. The engineering aspects of automated prepreg layup: History, present and future. *Compos Part B Eng.* 2011;43(3):997–1009.
- [2] Brasington A, Sacco C, Halbritter J, et al. Automated fiber placement: A review of history, current technologies, and future paths forward. *Compos Part C Open Access.* 2021;6:100182.
- [3] Potter K. Understanding the origins of defects and variability in composites manufacture. 2009.
- [4] Croft K, Lessard L, Pasini D, et al. Experimental study of the effect of automated fiber placement induced defects on performance of composite laminates. *Compos Part Appl Sci Manuf.* 2011;42(5):484–491.
- [5] Guin WE, Jackson JR, Bosley CM. Effects of tow-to-tow gaps in composite laminates fabricated via automated fiber placement. *Compos Part Appl Sci Manuf.* 2018;115:66–75.
- [6] Lan M. Étude de l'influence des singularités créées par la technique de placement de fibres automatisé sur les performances des matériaux composites. Lorient; 2016.
- [7] Blom AW, Lopes CS, Kromwijk PJ, et al. A Theoretical Model to Study the Influence of Tow-drop Areas on the Stiffness and Strength of Variable-stiffness Laminates. *J Compos Mater.* 2009;43(5):403–425.
- [8] Falcó O, Mayugo JA, Lopes CS, et al. Variable-stiffness composite panels: Defect tolerance under in-plane tensile loading. *Compos Part Appl Sci Manuf.* 2014;63:21–31.
- [9] Li X, Hallett SR, Wisnom MR. Modelling the effect of gaps and overlaps in automated fibre placement (AFP)-manufactured laminates. *Sci Eng Compos Mater.* 2015;22(2):115–129.
- [10] Cann MT, Adams DO, Schneider CL. Characterization of Fiber Volume Fraction Gradients in Composite Laminates. *J Compos Mater.* 2008;42(5):447–466.
- [11] Alila F. Analyse de la tenue en fatigue de structures composites sandwich. Nantes; 2017.