

Etude des caractéristiques du désalignement des fibres et de leur impact sur la rupture en compression des composites à fibres continues avec contribution de l'effet de structure

Investigation of the fibre misalignment characteristics and their impact on the compressive failure of continuous fibre composites with structural effect contribution

E. FABING^{1,2}, P.-Y. MECHIN², J.-C. GRANDIDIER³ et V. KERYVIN¹

1 : UMR CNRS 6027, IRDL
Univ. Bretagne Sud
Rue de Saint-Maudé, F-56321 Lorient, France
email : vincent.keryvin@univ-ubs.fr

2 : CATIA Composites
Dassault Systèmes
10 Rue Marcel Dassault, F-78946 Vélizy-Villacoublay
e-mail : emmanuel.fabing@3ds.com et pierreyves.mechin@3ds.com

3 : UPR CNRS 3346, PPrime
ISAE-ENSMA
F-86360 Chasseneuil-du-Poitou, France
e-mail : jean-claude.grandidier@lmpm.ensma.fr

Résumé

L'objectif de cette étude est de quantifier l'impact du désalignement (angle, longueur d'onde, amplitude) sur la réponse non linéaire en compression en trois dimensions. Pour ce faire, les résultats seront comparés à ceux d'études numériques bidimensionnelles et tridimensionnelles antérieures. Afin de valider la représentativité du VER, des modèles étendus incorporant des motifs multiples sont soumis à une comparaison. Étant donné que la résistance à la compression est une propriété structurelle, les plis voisins orientés à 0° contribuent à la stabilisation des fibres. Les conditions aux limites appliquées au RVE sont modifiées afin de modéliser l'introduction de la rigidité des plis voisins hors axe ou d'une surface libre. En outre, une charge de flexion est utilisée pour introduire un gradient de déformation. Cette étude compare l'effet des conditions aux limites et du chargement avec la définition du désalignement des fibres sur les modes de flambement des fibres.

Abstract

The objective of this study is to quantify the impact of misalignment (angle, wavelength, amplitude) on the non-linear compressive response in three dimensions. This will be achieved by comparing the results to those of previous two-dimensional and three-dimensional computational studies. In order to validate the RVE representativeness, extended models incorporating multiple patterns are subjected to comparison. Given that compressive strength is a structural property, neighbouring plies at 0° degrees contribute to the stabilisation of fibres. The boundary conditions applied to the RVE are modified in order to model the introduction of off-axis neighbouring plies stiffness or a free surface. Moreover, bending loading is employed to introduce a deformation gradient. This study compares the effect of boundary conditions and loading with the definition of fibre misalignment on fibre buckling modes.

Mots Clés : micro-mécanique, multi-échelle, compression, flambement

Keywords: Micro-mechanics, multiscale, compression, buckling

1. Introduction

Les polymères renforcés de fibres de carbone sont largement utilisés en raison de leurs excellentes propriétés mécaniques, notamment leur raideur et leur résistance. La capacité à améliorer les performances grâce à l'utilisation de diverses techniques de fabrication et à l'incorporation de différents agencements de fibres et de résines a un impact important sur la résistance en compression.

2. Etat de l'art succinct

Le phénomène de rupture en compression est complexe à appréhender de manière concise. L'évaluation de la résistance en compression nécessite la prise en compte de paramètres à différentes échelles, des composants constitutifs à la séquence globale d'empilement des plis. La résistance en compression dépend du micro-flambage des fibres contenues dans le système de résine et des plis voisins par rapport aux plis unidirectionnels (UD). Un lien a été établi entre la charge en compression globale appliquée et le mécanisme local dans le pli UD [1]. De plus, l'impact des plis voisins ou du gradient de déformation (charge axiale contre flexion) a été abordé [2]. En d'autres termes, la résistance en compression n'est pas une propriété du matériau à l'échelle du pli. Des défauts peuvent survenir dans le composite en raison du processus de fabrication, notamment la présence de pores dans la résine, des variations locales du degré de cuisson ou un désalignement des fibres. Ce dernier est caractérisé par un angle, une amplitude ou une longueur d'onde et a un impact significatif sur la résistance en compression. Des études numériques ont déjà été menées afin de mettre en relation les défauts des fibres de carbone et la résistance en compression. Pimenta et. al. [3] a simulé le micro-flambement de géométries à fibre unique à différents désalignements. Il est cependant possible grâce aux technologies actuelles de modéliser des géométries bien plus complexes comportant plusieurs dizaines de fibres désalignées ou non offrant une meilleure représentativité du comportement du matériau [4], [5].

3. Problématique

L'impact de ces paramètres est examiné numériquement à l'aide d'un modèle hexagonal de volume élémentaire représentatif (VER) soumis à une charge en compression. Les modèles VER hexagonaux désalignés sont configurés sur la plateforme **3DEXPERIENCE** (Dassault Systèmes) avec des paramètres d'entrée correspondant aux caractéristiques du désalignement (Fig. 1). De même, le maillage de la géométrie contenant plusieurs matériaux est automatiquement mis à jour avec le changement de désalignement, qu'il s'agisse d'un maillage tétra ou hexaédrique. Des conditions aux limites périodiques sont imposées. Le comportement mécanique des constituants est issu de campagnes expérimentales dédiées [6], [7].

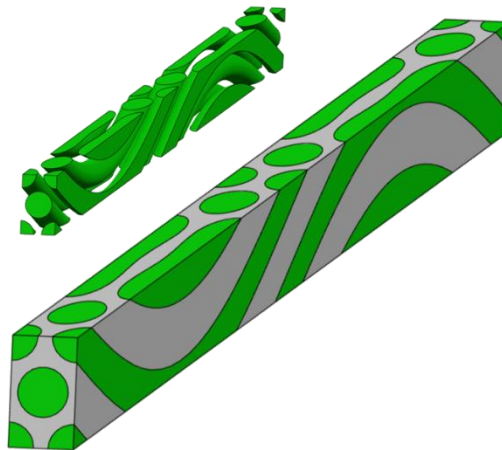


Fig. 1. Exemple de VER à haut désalignement créé sur la plateforme **3DEXPERIENCE**.

L'objectif de cette étude est double puisqu'il vise d'une part à quantifier l'impact du désalignement (angle, longueur d'onde et amplitude) sur la réponse en compression non linéaire en trois dimensions (Fig. 2) mais aussi à avoir une idée plus précise des paramètres numériques importants lors de la simulation de tels modèles. Ceci sera réalisé en comparant les résultats à ceux d'études numériques bidimensionnelles et tridimensionnelles précédentes [8], [9]. Afin de valider la représentativité du RVE, des modèles étendus incorporant plusieurs architectures sont comparés. En effet, il est possible de mesurer l'impact de la géométrie sur le comportement en compression en empilant par exemple

plusieurs géométries identiques. Cela aura pour effet de nous rapprocher de l'architecture d'un pli composite (Fig. 3).

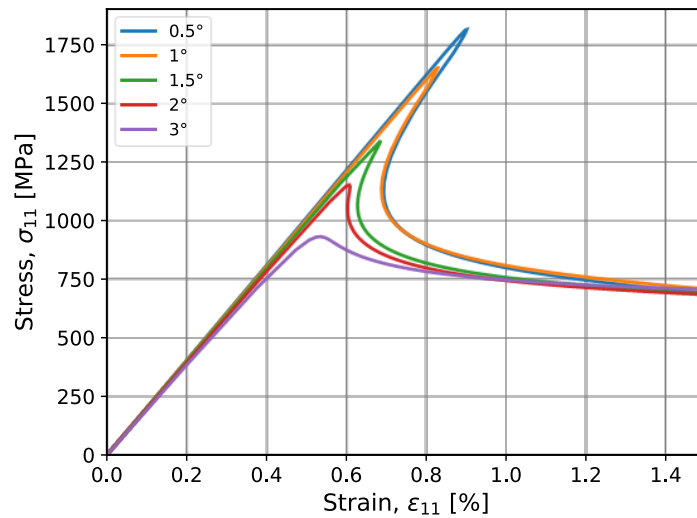


Fig. 2. Exemple d'impact du désalignement des fibres sur la résistance en compression d'un VER hexagonal.

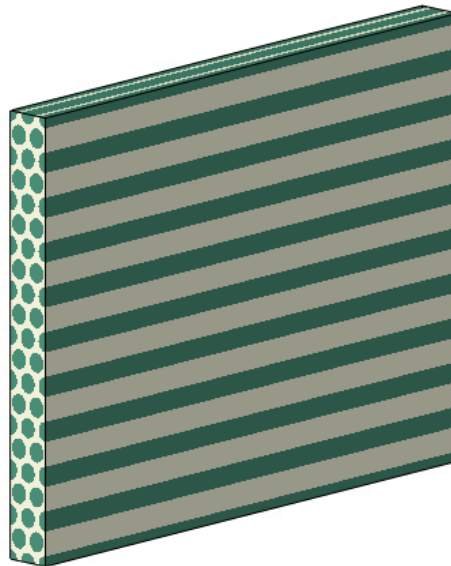


Fig. 3. Exemple d'empilement de VER sans désalignement

Étant donné que la résistance en compression est une propriété structurelle, les plis voisins à 0° contribuent à la stabilisation des fibres sans que des effets comme l'accroissement de la résistance en compression avec l'augmentation de la longueur d'onde pourrait passer inaperçus (Fig. 4, reprise de [8]). Les conditions aux limites appliquées au VER sont donc modifiées afin de modéliser l'introduction d'une rigidité des plis voisins hors axe ou d'une surface libre.

En effet, de nombreux modèles numériques se basent sur l'application de conditions aux limites périodiques [3], [4], [11] sur un VER de longueur finie. Ce type de conditions appliquées aux faces parallèles à l'axe des fibres du VER le rendent par définition virtuellement infini dans ces directions mais fini dans la direction des fibres. Cependant, il est aisé de constater qu'un pli composite est loin d'être infini sur sa hauteur puisqu'il est entouré de plis hors axe offrant une rigidité supplémentaire : c'est l'effet de structure [2]. De plus, le choix de la longueur du VER associé à une application de conditions de périodicité a pour effet de contraindre la géométrie à flamber sur toute sa longueur

(flambement global). Le modèle largement accepté de Budiansky & Fleck [1] montre en revanche que la rupture en compression est due à un flambement local, numériquement inatteignable via l'utilisation de conditions de périodicité. Il est par conséquent proposé dans cette étude de comparer le modèle répandu dans la littérature à un nouveau modèle s'affranchissant de conditions de périodicité en s'inspirant d'études bi-dimensionnelle antérieures [10] introduisant un gradient de déformation via une charge de flexion (Fig. 5).

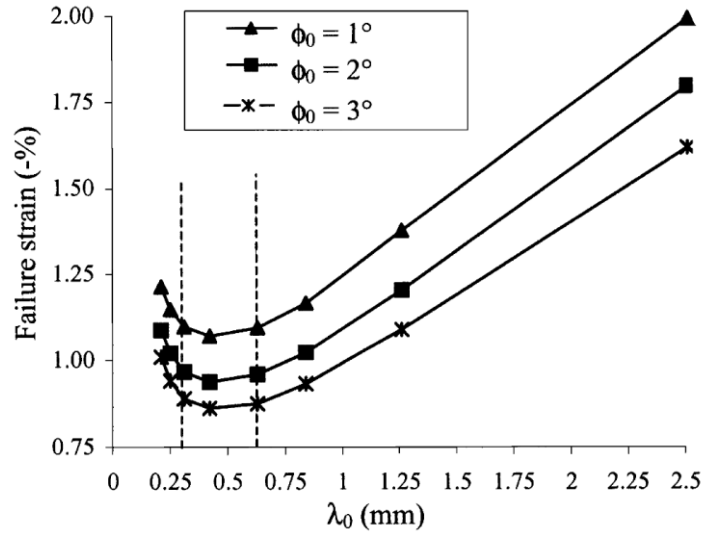


Fig. 4. Augmentation de la résistance en compression avec la longueur d'onde de la fibre (repris de [10]).

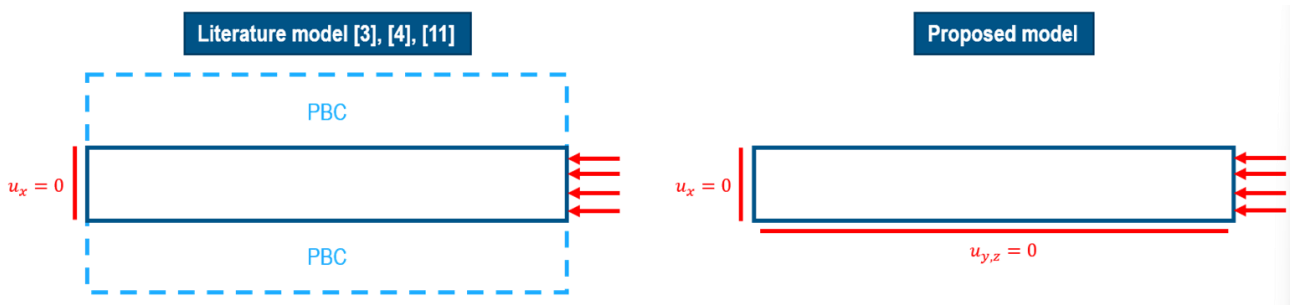


Fig. 5. Présentation du modèle proposé dans le cadre de cette étude

Cette étude compare l'effet des conditions aux limites et de la charge avec la définition du désalignement des fibres sur leurs modes de flambement. Ces différentes géométries et conditions aux limites seront comparées au travers de simulations de flambement non linéaire précédées d'une précharge statique de compression ne dépassant pas l'instabilité.

Cette étude s'est limitée à l'étude de VER hexagonaux mais a pour perspective de se poursuivre par l'analyse de microstructures plus représentatives de plis composites réels. Parmi ces structures il est possible de citer les VER aléatoires uniformes dont les fibres sont placées sans contrôle dans le volume ou les VER aléatoires à « cluster » présentant des zones riches en résine dont les fibres sont placées en fonction d'une distance à leur plus proche voisine (Fig. 6).

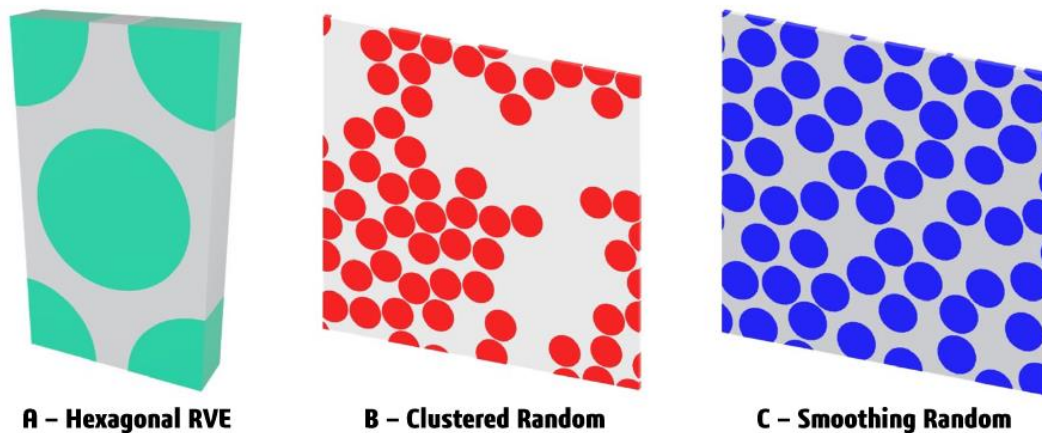


Fig. 4. Exemples de microstructures aléatoires (repris de [5]).

Références

- [1] B. Budiansky and N. A. Fleck, “Compressive failure of fibre composites,” *Journal of Mechanical Physics and solids*, vol. 41, no. 1, pp. 183–211, 1993.
- [2] J.-C. Grandidier, P. Casari, and C. Jochum, “A fibre direction compressive failure criterion for long fibre laminates at ply scale, including stacking sequence and laminate thickness effects,” *Compos Struct*, vol. 94, no. 12, pp. 3799–3806, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.compstruct.2012.06.013.
- [3] S. Pimenta, M. Patni, D. Bikos, et R. Trask, « The role of constitutive properties on the longitudinal compressive strength of composites », *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 185, p. 108264, oct. 2024, doi: 10.1016/j.compositesa.2024.108264.
- [4] G. Catalanotti et T. A. Sebaey, « An algorithm for the generation of three-dimensional statistically Representative Volume Elements of unidirectional fibre-reinforced plastics: Focusing on the fibres waviness », *Composite Structures*, vol. 227, p. 111272-111272, nov. 2019, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2019.111272.
- [5] P.-Y. Méchin, A. Borrás, et V. Keryvin, « Influence of Microstructure Randomness on the Shear Behaviour and Compressive Strength of Continuous Carbon Fibre Composites », *Appl Compos Mater*, mai 2024, doi: 10.1007/s10443-024-10230-3.
- [6] T. S. Guruprasad, V. Keryvin, L. Charleux, J.-P. Guin, and O. Arnould, “On the determination of the elastic constants of carbon fibres by nanoindentation tests,” *Carbon N Y*, vol. 173, pp. 572–586, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.carbon.2020.09.052.
- [7] P.-Y. Mechin and V. Keryvin, “Compressive strength estimation of continuous carbon fibre/epoxy resin composite by micro-mechanical numerical modelling,” *Compos Struct*, vol. 305, no. May 2022, p. 116534, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.compstruct.2022.116534.
- [8] S. Drapier, J.-C. Grandidier, and M. Potier-Ferry, “A structural approach of plastic microbuckling in long fibre composites: comparison with theoretical and experimental results,” *Int J Solids Struct*, vol. 38, no. 22–23, pp. 3877–3904, May 2001, doi: 10.1016/S0020-7683(00)00247-X.
- [9] A. Bettadahalli Channakeshava and J. C. Grandidier, “A non-local finite element model to assess the compressive strength of composite structures,” *European Journal of Mechanics, A/Solids*, vol. 93, no. May 2021, p. 104494, 2022, doi: 10.1016/j.euromechsol.2021.104494.
- [10] S. Drapier, C. Gardin, J.-C. Grandidier, and M. Potier-ferry, “Structure effect and microbuckling,” *Compos Sci Technol*, vol. 56, no. 96, pp. 861–867, 1996.
- [11] L. F. Varandas, G. Catalanotti, A. R. Melro, R. P. Tavares, et B. G. Falzon, « Micromechanical modelling of the longitudinal compressive and tensile failure of unidirectional composites: The effect of fibre misalignment introduced via a stochastic process », *International Journal of Solids and Structures*, vol. 203, p. 157-176, oct. 2020, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2020.07.022.