



HAL
open science

Etat de l'art de la modélisation de la rupture en compression des composites stratifiés

Nicolas Feld, Benedikt Daum, Olivier Allix, Raimund Rolfes

► To cite this version:

Nicolas Feld, Benedikt Daum, Olivier Allix, Raimund Rolfes. Etat de l'art de la modélisation de la rupture en compression des composites stratifiés. 21ème Journées Nationales sur les Composites, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (ENSAM) - Bordeaux, Jul 2019, Bordeaux, Talence, France. hal-02420695

HAL Id: hal-02420695

<https://hal.science/hal-02420695>

Submitted on 20 Dec 2019

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.

État de l'art de la modélisation de la rupture en compression des composites stratifiés

Compressive failure modelling of laminated composites – A review

Nicolas Feld¹, Benedikt Daum², Olivier Allix³, Raimund Rolfes²

1 : Safran Tech
Safran Group, Établissement Paris Saclay
Rue des jeunes bois – Châteaufort, 78114 Magny-les-Hameaux
e-mail : nicolas.feld@safrangroup.com

2 : Institute of Structural Analysis
Leibniz Universität Hannover
Appelstrasse 9A, 30167 Hannover, GERMANY
e-mail : b.daum@isd.uni-hannover.de, r.rolfes@isd.uni-hannover.de

3 : Laboratoire de Mécanique et Technologie
École Normale Supérieure Paris Saclay, UMR CNRS 8535
61, avenue du Président Wilson, 94235 Cachan
e-mail : olivier.allix@ens-paris-saclay.fr

Résumé

Cet article propose la revue d'environ vingt années de travaux récents sur le modélisation du comportement et de la rupture des composites stratifiés sollicités en compression dans le sens des fibres. Après un bref rappel des théories fondamentales à l'origine de la compréhension du mécanisme principal responsable de la ruine, le microflambage des fibres, la revue est divisée en trois parties. La première évoque les études supplémentaires menées sur les micromodèles semi-analytiques permettant la prise en compte de phénomènes de plus en plus complexes. La deuxième traite des calculs par éléments finis ayant étudié, par ailleurs, l'influence des effets de structure : effets de taille, de gradient, de bord, etc. La troisième et dernière partie traite enfin des calculs par éléments finis s'intéressant aux interactions entre microflambage et d'autres mécanismes de ruine, tels que la rupture des fibres, la décohésion fibres-matrice, la fissuration intra-laminaire et le délaminage. La conclusion de cette revue brosse un aperçu des tendances récentes et des progrès attendus d'un point de vue industriel.

Abstract

This article reviews the last twenty years of academic research on the topic of modelling the compressive behavior and failure of laminated composites in the fibers' direction. This review is split into three chapters after a brief reminder of the fundamental theories explaining the main mechanism responsible for compressive failure – fibre kinking. The first chapter deals with supplementary semi-analytical micromodels that take into account increasingly complex physics. The second chapter deals with finite element analyses of various structure effects : size effects, edge effects, stress gradients, etc. The third and final chapter deals with finite element analyses of microbuckling interaction with other failure mechanisms, namely fibre failure, fibre-matrix debonding, intra-laminar cracking, and delamination. The conclusion offers an overview of recent trends and expected progresses from an industrial perspective.

Mots Clés : Stratifiés, Modélisation, Rupture, Compression, Microflambage

Keywords : Laminates, Modelling, Failure, Compression, Kinking

1. Introduction

La plupart des matériaux naturels et synthétiques présentent des propriétés à rupture en traction significativement plus faibles qu'en compression. Parmi les quelques exceptions à cette règle figurent les composites stratifiés sollicités dans le sens des fibres. Pour la plupart, la rupture en compression peut survenir pour des niveaux de charge inférieurs, jusqu'à deux ou trois fois, à ceux de traction. Cette tendance s'explique ici dans la présence d'un mécanisme de ruine propre à la compression : le microflambage des fibres constituant le stratifié. Pourtant, des modèles de flambage sur fondation

élastique tout à fait classiques prédisent des valeurs de première charge critique largement supérieures, jusqu'à deux ou trois fois, à la rupture en traction.

Ces phénomènes contre-intuitifs ont été source de nombreux travaux d'abord expérimentaux, théoriques, puis progressivement numériques à partir de la fin des années 90. Parmi les explications fondamentales de la faiblesse des stratifiés en compression, et donc les paramètres déterminants de sa prédiction, quatre grandes catégories se distinguent : la non-linéarité du comportement matériel du stratifié, en particulier en cisaillement ; la présence de défauts d'alignement aléatoires des fibres ; un ensemble d'effets dits "de structure" ; et enfin la compétition et le cumul d'autres mécanismes de ruine avec le micro-flambage. Si les analyses de l'état de l'art expérimental sur ces sujets, pris individuellement ou de concert, sont nombreuses, les dernières revues des pratiques de modélisation datent des années 90 [1, 2]. Or de nombreux progrès, pour certains dus au développement rapide des moyens de calcul, ont depuis été accomplis. On se propose donc de faire un point d'étape [3].

Après un bref rappel de quelques bases, dans une première partie, on s'intéressera aux modèles consacrés à la prédiction et à la justification du comportement matériel et de la morphologie simplifiée des bandes de plissement. Hérités des théories analytiques mises au point entre les années 60 et 90, ces modèles ont généralement permis de tenir compte de comportements plus complexes, de mésalignements moins idéalisés et de chargements multiaxiaux. Dans une deuxième partie, nous analyserons les modèles explorant les effets structure, regroupant entre autres l'influence de la multiaxialité, des gradients de chargement et de la taille de la structure. Enfin dans une troisième et dernière partie, nous nous intéresserons aux modèles étudiant les interactions entre micro-flambage et autres mécanismes de ruine, à savoir la rupture des fibres, les décohésions fibres-matrice, la fissuration intralaminare ou encore le délaminage. En conclusion de cette synthèse, quelques pistes sont proposées pour permettre aux modèles académiques de pénétrer le tissu industriel.

2. Rappels sur le plissement et le microflambage

2.1. Phénoménologie

La tenue en compression des stratifiés étant nettement plus faible qu'en traction, cette problématique fut soulevée dès les premières années d'emploi de composites dans l'industrie aéronautique et spatiale [4]. Les conséquences de la rupture, à savoir la création d'une bande de plissement localisée mais traversant toute l'épaisseur du pli, ont été rapidement observées. En revanche, il fallut attendre les premiers travaux de Rosen [5] pour que le mécanisme principal à l'origine du plissement dans les stratifiés de grade aéronautique, le microflambage des fibres, soit correctement identifié. Depuis, l'influence du taux et du diamètre des renforts, du type de fibres et de matrice, de la tenue en cisaillement du composite et du défaut d'alignement intrinsèque et statistique des fibres (qualifié dans la suite de mésalignement) ont été analysés par de nombreux auteurs [6, 7, 8, 9, 10].

Résumons le mécanisme en quelques étapes en s'aidant de la Fig. 1.

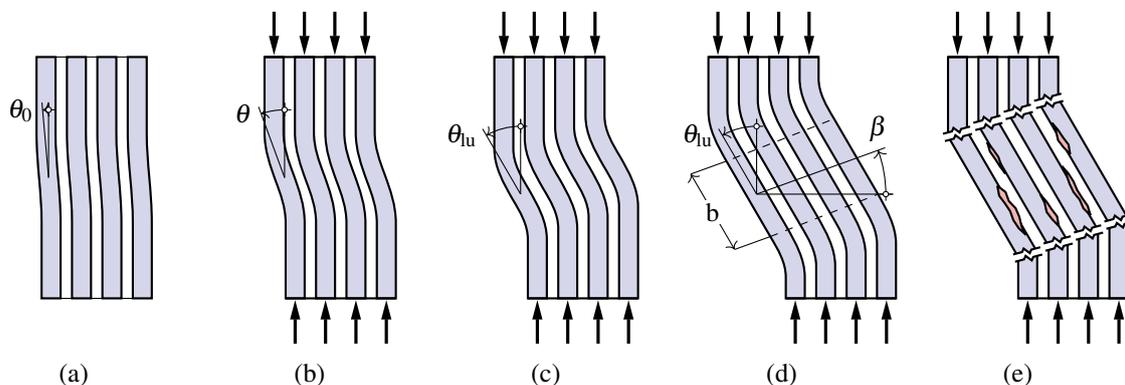


Fig. 1. Illustration des étapes caractéristiques du mécanisme de ruine par plissement

- (a) Le chargement de compression est appliqué au stratifié. Les fibres sont majoritairement sollicitées en compression, mais se déforment peu, du fait de leur importante raideur. En outre, la présence de multiples mais très faibles mésalignements (typiquement $\equiv 1^\circ$) développe un champ de cisaillement hétérogène.
- (b) Le chargement croissant, un ou des mésalignements prédominant et, en raison du taux de renfort élevé, imposent leur cinématique à leurs plus proches voisins. Une bande de cisaillement, inclinée à près de 90° par rapport à la direction de la charge, commence à apparaître.
- (c) La bande se propage de proche en proche. À mesure que la charge augmente, elle s'incline et le cisaillement qui se développe en son sein croît. Petit à petit, des mécanismes dissipatifs s'activent dans la matrice ou aux interfaces : viscosité, plasticité, décohésions, micro-fissures...
- (d) À un instant déterminé par la réponse de la structure dans son ensemble, une instabilité finit par se déclencher accélérant la localisation des déformations dans la bande. Son incompressibilité aidant, la largeur de la bande croît. Juste avant rupture, la largeur de la bande est d'environ une vingtaine de diamètres de fibres, soit quelques 0.1 mm, et son angle d'environ 20° .
- (e) La flexion excessive des fibres aux extrémités de la bande finit par causer leur rupture sur les faces en traction. Les fibres rompues se relâchent et continuent de pivoter dynamiquement, accompagnées toujours plus de mécanismes dissipatifs. Puis les déformations se stabilisent, laissant place au développement de bandes conjuguées, à moins que la rupture se propage de manière catastrophique aux plis voisins.

2.2. La *kinking theory*

Au début des années 90, Budiansky et Fleck mettent au point leur fameuse *kinking theory* [11], qui s'imposera comme la théorie micromécanique de référence par la suite. De nombreux auteurs étendront ou redécouvriront cette théorie, tandis que certains remettront en cause le bien-fondé de certaines hypothèses. Néanmoins, la *kinking theory* et ses extensions permettent de reproduire de manière qualitative mais satisfaisante toutes les étapes (a) à (e) décrites ci-dessus, en tenant compte d'à peu près toutes les tendances et influences observées expérimentalement au cours des trois décennies précédentes.

En particulier, elle permet de tenir compte des propriétés élastiques des fibres et de la matrice, de la limite élastique de la matrice (qui sert de paramètre de normalisation pour toutes les quantités homogènes à des contraintes), du diamètre des fibres (idem pour les longueurs), de la pression hydrostatique, du mésalignement initial des fibres et enfin de l'angle d'inclinaison de la bande de plissement (considéré comme une donnée). Avec ces valeurs, la *kinking theory* prédit la réponse mécanique complète à un chargement de compression, y compris la contrainte maximale et l'énergie dissipée, mais aussi des informations morphologiques comme la largeur de la bande de plissement ou l'angle formé par les fibres de la bande avec la direction principale.

Une critique récurrente de la *kinking theory*, à la fin des années 90, est sa forte surestimation de la contrainte maximale en compression pour des angles de mésalignement raisonnables, par rapport à des essais de compression standards ou non. En outre, elle ne permet pas de tenir compte, dans la version de Budiansky et Fleck, de chargements très multiaxiaux, de l'hétérogénéité des mésalignements initiaux, des effets de bord (alors qu'il est acquis expérimentalement que les bandes de plissement s'initient sur des bords libres) ou des interactions avec d'autres mécanismes de ruine (et tout particulièrement la fissuration intra-laminaire, mise en évidence par plusieurs auteurs).

3. Modèles micromécaniques

Afin d'améliorer les prédictions de la *kinking theory* ou de tenir compte d'éléments laissés pour compte dans la version de Budiansky et Fleck, de nombreuses études micromécaniques, la plupart tout de même fondées sur leur approche, ont fleuri depuis la fin des années 90. Certains modèles visent principalement à mieux prédire la contrainte et l'énergie à rupture, tandis que d'autres s'intéressent

davantage aux propriétés microstructurales, comme l'angle ou l'épaisseur de la bande de plissement. D'autre part, l'influence de la distribution spatiale des mésalignements et des effets de bord fait partie des questions récemment résolues par ces approches.

3.1. Sur la modélisation du comportement du plissement

Les papiers étudiés sur cette thématique comprennent notamment [12], qui s'intéresse à l'influence d'une formulation en déformations finies sur la réponse en compression ; [13], qui assimile le phénomène de plissement à l'initiation de la plasticité dans la bande ; [14], qui remet en cause cette interprétation en démontrant que la plasticité démarre bien avant l'instabilité ; [15], qui étudie l'énergie dissipée au cours du plissement en fonction de la statistique de mésalignement et de la multiaxialité du chargement ; [16], qui analyse l'influence de l'angle (postulé) de la bande de plissement sur la réponse en compression ; et enfin [17], qui ont s'intéresse à l'influence de diverses lois de comportement pour la matrice. Toutes ces études ont notamment permis de mettre en lumière le rôle clef du comportement en cisaillement du composite et de la nécessité de le modéliser avec précision si l'on souhaite prédire quantitativement le comportement en compression jusqu'à rupture.

3.2. Sur l'angle de la bande de plissement

Dans la *kinking theory*, l'angle de la bande de plissement est postulé. Or, bien qu'il soit indépendant du mésalignement des fibres, ce n'est pas non plus une caractéristique intrinsèque du matériau, puisqu'il peut être influencé, notamment, par la multiaxialité. Schapery s'est intéressé à mieux comprendre le phénomène et a notamment démontré que c'est le comportement transverse qui justifie l'angle de la bande [18]. En particulier, c'est la présence de fissuration transverse qui permet d'expliquer pourquoi la bande se développe à un angle non-nul. D'autres auteurs ont par la suite poussé le problème encore plus loin en dérivant les équations d'équilibre pour un angle de bande de plissement variable [19]. Ils ont alors démontré l'évolution progressive de cet angle de 0° lors de l'initiation vers une valeur non-nulle au fur et à mesure de l'accroissement du chargement. Ce qui permet notamment de retrouver l'observation que plus le composite est tenace en cisaillement, plus l'angle final de la bande sera élevé.

3.3. Sur la distribution spatiale du mésalignement des fibres

Là où la plupart des modèles micromécaniques considèrent un mésalignement des fibres uniformes, par souci de simplicité, quelques auteurs se sont intéressés à des distributions spatiales moins idéalisées (Fig. 2). Dans une série de papiers, Fleck *et al.* ont étudié l'effet de distributions non-uniformes de mésalignement d'abord longitudinales [20], puis 2D [21]. D'une part, ils ont ainsi démontré la pertinence d'une approche de résistance de type Weibull reposant sur la considération d'un maillon faible dans la direction longitudinale. D'autre part, ils ont constaté que la corrélation spatiale dans la direction transverse devait en revanche couvrir plusieurs centaines de diamètres de fibres pour que les résultats théoriques usuels (*i.e.* considérant un mésalignement uniforme), fassent sens à l'échelle d'une structure. Une situation non conforme aux corrélations mesurées expérimentalement. D'autres auteurs ont également mis en évidence un effet d'échelle lié à la statistique de mésalignement [22].

4. Études des effets de structure

Du fait de leur extrême simplification, les micromodèles semi-analytiques inspirés de la *kinking theory* ou d'autres ne permettent pas de tenir compte des effets de structure, autres que statistiques. Pour mieux comprendre l'influence des gradients de chargement et de la morphologie locale, notamment, des auteurs ont fait appel à des modèles complexes, modélisés par éléments finis, et parfois assortis d'approches multiéchelles.

4.1. Effets de structure micromécaniques

Les premiers travaux d'envergure sur les effets de structure sont dûs à Kyriakides *et al.*. À travers plusieurs études, les auteurs ont investigué les différences induites par une modélisation 2D ou 3D,

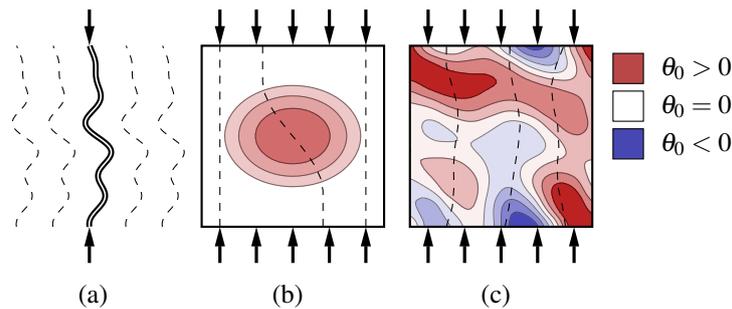


Fig. 2. Illustration des distributions spatiales de mésalignement typiquement considérées : (a) uniforme, (b) localisé, (c) aléatoire avec corrélation spatiale

les conditions limites, le comportement des constituants, ainsi que celles de chargements combinés compression-cisaillement. Dans un premier papier, ils étudièrent l'influence des conditions limites, en conditions de déformations planes [23]. En présence de conditions limites périodiques, la bande de plissement serait contrainte d'adopter un angle nul. Les auteurs leur ont donc préféré des conditions de bord libre, mais ont montré qu'une épaisseur de pli de plusieurs dizaines de fibres était nécessaire pour limiter l'influence des bords libres sur la réponse. D'autre part, le modèle 3D s'est révélé légèrement plus souple que le modèle 2D en déformations planes. Du point de vue de la morphologie de la bande de plissement, les auteurs ont retrouvé à l'aide d'un modèle de Drucker-Prager que la compressibilité en régime plastique de la matrice déterminait la séquence d'apparition du mécanisme de verrouillage et donc l'angle final de la bande [24]. Enfin il a été démontré, aussi bien expérimentalement que numériquement, qu'un chargement de cisaillement combiné avait une influence drastique sur la réponse en compression. En particulier, la résistance décroît à peu près linéairement avec le cisaillement, indépendamment de la séquence de chargement.

Dans une autre étude, Yerramali et Waas ont étudié l'influence du diamètre des fibres [25] : dans la *kinking theory*, ce paramètre utilisé pour la normalisation des formules analytiques est sans incidence sur la réponse. Expérimentalement, il a néanmoins été montré que plus le diamètre de fibres décroît, plus la contrainte à rupture en compression diminue. Les auteurs retrouvent cet effet avec leur modèle et attribuent la perte de résistance à la diminution de l'inertie de flexion des fibres.

Les études précédentes, bien qu'utilisant un micromodèle complexe, considèrent toujours une microstructure uniforme, y compris en termes de mésalignement. Dans [26], les auteurs exploitent la liberté offerte par un tel modèle numérique pour analyser l'influence de la variabilité de l'espacement des fibres. Le mésalignement, traité comme une simple inclinaison du modèle par rapport à la direction de compression, reste toujours constant. Toutefois, l'espacement des fibres en tant que tel n'apparaît pas comme un paramètre influent sur la réponse. En revanche, [24] s'intéresse (aussi) à la prise en compte d'imperfections locales, superposées à une imperfection globale uniforme, et leur interaction avec les bords libres. Sur l'amorçage, la propagation et l'élargissement de bandes de plissement, ainsi que sur la réponse en compression-cisaillement, leur influence est jugée négligeable. Une fois encore, sans considérer la corrélation spatiale la concernant, c'est la statistique de mésalignement globale qui apparaît prépondérante. La présence de défauts microscopiques unitaires est quasiment sans incidence.

4.2. Comportement macroscopique équivalent et calcul de structures

À plus grande échelle, les gradients de chargement, la géométrie de la structure et les interactions avec les plis adjacents ont également une incidence. La plupart du temps, ces effets sont observés à l'échelle d'une structure où une loi de comportement *ad hoc* homogénéise l'influence du microflambage en compression.

La première étude de ce genre identifie une loi de Cosserat, *i.e.* tenant compte des déplacements et des

rotations, à partir de la réponse d'un micromodèle [27]. Par équivalence au sens des travaux virtuels, l'énergie de rotation macroscopique a pu être reliée à la rotation locale des fibres dans le micromodèle. Considérant un modèle de Cauchy, une autre étude utilise plutôt un métamodèle singeant un réseau de poutres articulées à un seul degré de liberté, initialement lié à la statistique de mésalignement [28]. Le flambage du réseau est là encore recalé sur le microflambage des fibres à partir d'une équivalence du travail virtuel. Les non-linéarités matérielles sont homogénéisées à l'échelle macroscopique à l'aide de variables internes, facilitant la prise en compte des couplages multi-axiaux. Dans le même esprit, d'autres auteurs ont utilisé une variante de la méthode de cellules généralisées pour déterminer un modèle macroscopique stochastique [29].

Plutôt que de postuler un potentiel macroscopique puis de le recalculer par rapport à un micromodèle, l'homogénéisation multi-échelle (ou *FE²*), permet de tenir directement compte de la réponse microscopique. La loi macroscopique est remplacée par le calcul systématique de la réponse et du module tangent sur la microstructure. C'est l'approche employée par Nezamabadi *et al.*, pour le traitement de problèmes 2D en déformations planes [30]. Les auteurs ont notamment étudié l'influence de la taille du micromodèle (ici, adopté comme volume élémentaire représentatif) en regard de la dimension de la macrostructure. Comme des études analytiques l'avaient prévu de longue date [31], le choix du volume élémentaire apparaît déterminant. D'autre part, la bifurcation de la réponse microscopique est une bonne indication de l'instabilité macroscopique, du moins dans les exemples étudiés.

Enfin, Drapier *et al.* ont adopté une formulation originale où un micromodèle très simple cohabite avec une description élément finis d'un empilement stratifié [32]. Les auteurs se sont particulièrement intéressés aux chargements de compression et de flexion, ainsi qu'à l'influence de l'épaisseur des plis et de la séquence d'empilement sur la réponse. Les résultats retrouvent d'une part que la déformation maximale en compression, hors effets statistiques de volume, est relativement in affectée par l'épaisseur du pli. En revanche, la déformation maximale en flexion est trouvée nettement plus élevée qu'en compression, parfois jusqu'à un facteur 2. Cet effet est d'autant plus marqué sur les plis fins que sur les plis épais. Quant à l'influence de l'empilement, au premier ordre, c'est là encore le gradient de chargement et l'épaisseur successive de plis orientés à 0° (*i.e.* sollicités en compression) qui apparaissent comme les paramètres déterminants de la tenue.

5. Interactions entre plissement et autres mécanismes de ruine

Une autre caractéristique intéressante des modèles numériques tient dans leur capacité à modéliser les interactions et compétitions entre plusieurs mécanismes de ruine. Le microflambage étant réputé pour s'accompagner d'autres dégradations [33], notamment matricielles, de nombreuses études s'y sont donc intéressées.

De nombreux auteurs ont postulé une possible interaction entre rupture de fibres et microflambage. Sous chargement de compression homogène, les analyses statistiques d'influence des défauts semblent être en désaccord. Dans [34] néanmoins, les auteurs ont étudié l'influence de chargements très localisés, en pointe de fissure, sur la rupture de fibres en compression-cisaillement et la transition de ce mode de ruine somme toute anecdotique vers un microflambage. Il apparaît en effet que pour des mésalignements faibles, la rupture des fibres puisse apparaître avant le microflambage, reportant l'apparition de ce possible mode de ruine sur les fibres voisines (voir Fig. 3(c)). Les auteurs le démontrent néanmoins avec un micromodèle quasi-1D assorti d'une formule très empirique liant résistance en compression des fibres et résistance en cisaillement des micro-constituants. Un micromodèle représentatif de la région en pointe de fissure permettrait sans doute d'estimer le rôle réel de la multi-axialité sur la rupture des fibres et la transition d'un mode de ruine par fissuration vers un mode par microflambage. Les dégradations liées à la matrice, *i.e.* les décohésions fibres-matrice, la fissuration intra-laminaire et le délaminage, accompagnent couramment le développement d'une bande de plissement (Fig. 3(a)). Des travaux déjà évoqués, comme [18] ou [15], intègrent dans leurs modèles micromécaniques des variables d'endommagement continu représentant l'effet des dégradations les plus diffuses, comme la

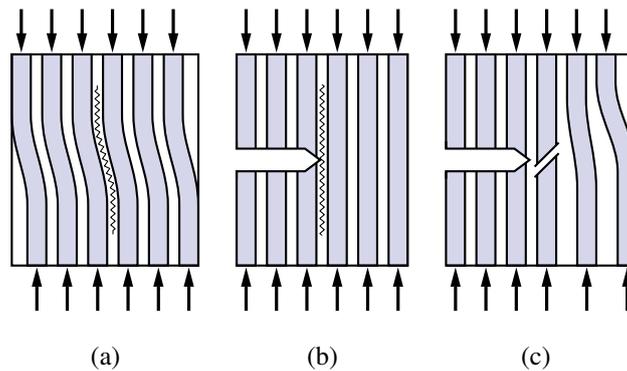


Fig. 3. Illustration des interactions potentielles entre microflambage et d'autres mécanismes de ruine : (a) microflambage et fissuration intra-laminaire ; (b) effet d'écran en pointe de fissure ; (c) et transition d'une rupture des fibres en compression-cisaillement vers le microflambage

décohésion fibres-matrice ou la micro-fissuration matricielle. D'autres travaux étudient les interactions avec des mécanismes plus localisés, représentés de façon explicite.

Prabhakar et Waas, notamment, se sont intéressés à la compétition entre fissuration intra-laminaire et microflambage [35]. Dans un modèle quasi-3D, ils ont intégré la fissuration à l'aide de zones cohésives. Les résultats de leur étude mettent en évidence le rôle clef de la résistance et de la ténacité en mode II (cisaillement) et leur relative innocuité en mode I (traction). Si les interfaces présentent une résistance en mode II trop faible, la résistance en compression du pli est également réduite, qui rompt par fissuration intra-laminaire sans qu'aucun micro-flambage ne soit observé. Si les interfaces disposent d'une résistance plus élevée, la résistance du pli n'est plus affectée et celui-ci rompt par micro-flambage. En revanche, une fois le pic de contrainte passé, la fissuration intra-laminaire peut se développer dans la bande de plissement et l'énergie dissipée se révèle alors sensible à la résistance et la ténacité des interfaces. L'étude a également été répétée à l'échelle du pli pour étudier l'interaction avec le délaminage [36].

Une approche entièrement 3D [37] s'est intéressée à la compétition entre le micro-flambage et les fissurations intra- et inter-laminaire, considérées ici comme des mécanismes discrets décrits par la mécanique de la rupture finie. Le comportement des plis n'intègre pas explicitement les fibres, dont l'influence sur le comportement est homogénéisée à l'aide du modèle décrit dans [28]. Néanmoins, leurs résultats illustrent une nouvelle fois une forte interaction entre microflambage et fissuration intra-laminaire, cette dernière apparaissant systématiquement et naturellement au cœur des bandes de plissement. D'autre part, sur des éprouvettes présentant trou ou encoches, la fissuration discrète peut s'initier avant le plissement, faisant alors écran au reste du pli des concentrations de contraintes et augmentant significativement l'effort à rupture (Fig. 3(b)).

Enfin, dans une approche hybride quasi-3D, Bishara *et al.* [38] ont étudié les interactions entre mécanismes multi-échelles à l'échelle du pli. Pour ce faire, ils ont mêlé une description explicite micromécanique des plis sollicités en compression, où le microflambage se développe comme une instabilité menant à la rupture des fibres, avec une description homogénéisée des autres plis, où les dégradations diffuses sont modélisées par des variables internes, et un délaminage inter-laminaire modélisé par des zones cohésives. Tous ces ingrédients mis bout à bout permettent, à coût contenu, d'observer l'enchaînement de mécanismes complexes lors de la rupture en compression d'un pli de séquence potentiellement complexe : microflambage, rupture des fibres, délaminage, rupture en compression-cisaillement des plis voisins, et ainsi propagation des dégradations par redistribution des contraintes dans toute l'épaisseur du stratifié, jusqu'à sa ruine totale.

6. Conclusion et perspectives

Vingt années de recherche supplémentaires et le développement exponentiel des capacités numériques ont permis à la communauté scientifique de parfaire ses connaissances dans le domaine de la rupture en compression des stratifiés. La simulation numérique a toutefois permis de confirmer ou de quantifier mécanismes, influences et compétitions, souvent observées préalablement par l'expérience il est vrai. Des zones d'ombre demeurent, comme le rôle des statistiques de mésalignement qui restent difficiles à quantifier ou le coût de calcul parfois prohibitif des approches les plus élaborées. Mais, sur des problèmes de petite taille, qui peuvent suffire dans une approche de conception par essais virtuels, des prédictions fiables peuvent être réalisées.

À l'exception du fluage [39, 40], l'immense majorité des travaux réalisés dans le domaine de l'étude du microflambage l'ont été dans un cadre quasi-statique. Or, les chargements réels de structures industrielles sont usuellement soit dynamiques [41], soit fortement répétés [42]. La compréhension des phénomènes associés à ces sollicitations, tels que la cinétique cyclique des mécanismes de ruine, les effets de cumul, l'auto-échauffement, l'effet des couplages thermo-oxydatifs, les effets de vitesse, la micro-inertie induite par la flexion à grande vitesse et la saturation du taux de croissance de certaines dégradations, sont encore des sujets largement vierges de toute exploration. Leur analyse serait un pas important en direction d'un déploiement industriel de toutes les connaissances acquises par la communauté.

Références

- [1] B. Budiansky, N. A. Fleck « Compressive Kinking of Fiber Composites : A Topical Review », *Applied Mechanics Review* Vol. 47 n° 6, Part 2, pp. –246, 1994, part of Mechanics USA 1994.
- [2] C. R. Schultheisz, A. M. Waas « Compressive failure of composites, Part I : Testing and micromechanical theories », *Progresses in Aerospace Sciences* Vol. 32, pp. 1–42, 1996.
- [3] B. Daum, N. Feld, R. Rolfes, O. Allix « A review of computational modeling approaches to compressive failure in laminates », *Composites Science & Technology* Vol. In press.
- [4] N. F. Dow, I. J. Gruntfest « Determination of most needed, potentially possible improvements in materials for ballistic and space vehicles », Technical Report TIS R60SD389, General Electric Co., 1960.
- [5] B. W. Rosen « Mechanics of Composite Strengthening », in : *Fiber Composite Materials : Papers Presented at a Seminar of the American Society for Metals, October 17 and 18, 1964*, , pp. 37–75, 1965.
- [6] H. U. Schuerch « Compressive strength of boron-metal composites », Contractor Report 202, NASA, Washington, D. C., 1965.
- [7] A. S. Argon « Fracture of composites », *Treatise on Materials Science and Technology* Vol. 1, pp. 79–114, 1972.
- [8] C. W. Weaver, J. G. Williams « Deformation of a carbon-epoxy composite under hydrostatic pressure », *Journal of Materials Science* Vol. 10 n° 8, pp. 1323–1333, 1975.
- [9] M. R. Piggott, B. Harris « Compression strength of carbon, glass and Kevlar-49 fibre-reinforced polyester resins », *Journal of Materials Science* Vol. 15 n° 10, pp. 2523–2538, 1980.
- [10] B. Budiansky « Micromechanics », *Computers and Structures* Vol. 16 n° 1-4, pp. 3–12, 1983.
- [11] B. Budiansky, N. A. Fleck « Compressive failure of fiber composites », *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* Vol. 41 n° 1, pp. 183–211, 1993.
- [12] A. B. de Morais, A. T. Marques « A micromechanical model for the prediction of the lamina longitudinal compression strength of composite laminates », *Journal of composite materials* Vol. 31 n° 14, pp. 1397–1412, 1997.
- [13] S. Pimenta, R. Gutkin, S. T. Pinho, P. Robinson « A micromechanical model for kink-band formation : Part II—Analytical modelling », *Composites Science and Technology* Vol. 69 n° 7-8, pp. 956, 2009.
- [14] P. Davidson, A. M. Waas « The effects of defects on the compressive response of thick carbon composites : an experimental and computational study », *Composite Structures* Vol. 176, pp. 582–596, 2017.
- [15] N. Feld, O. Allix, E. Baranger, J.-M. Guimard « Micro-mechanical prediction of UD laminates behaviour under combined compression up to failure : influence of matrix degradation », *Journal of Composite Materials* Vol. 45 n° 22, pp. 2317–2333, 2011.
- [16] M. Ahmer Wadee, G. W. Hunt, M. A. Peletier « Kink band instability in layered structures », *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* Vol. 52, pp. 1071–1091, 2004.
- [17] R. A. E. Zidek, C. Völlmecke « On the influence of material non-linearities in geometric modeling of kink band instabilities in unidirectional fiber composites », *International Journal of Non-Linear Mechanics* Vol. 62, pp. 23–32, 2014.

- [18] R. A. Schapery « Prediction of compressive strength and kink bands in composites using a work potential », *International Journal of Solids and Structures* Vol. 32 n° 6-7, pp. 739–765, 1995.
- [19] S. Basu, A. M. Waas, D. R. Ambur « Compressive failure of fiber composites under multi-axial loading », *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* Vol. 54 n° 3, pp. 611, 2006.
- [20] W. S. Slaughter, N. A. Fleck « Microbuckling of fiber composites with random initial fiber waviness », *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* Vol. 42 n° 11, pp. 1743–1766, 1994.
- [21] D. Liu, N. A. Fleck, M. P. F. Sutcliffe « Compressive strength of fibre composites with random fibre waviness », *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* Vol. 52 n° 7, pp. 1481–1505, 2004.
- [22] S. L. Lemanski, M. P. F. Sutcliffe « Compressive failure of finite size unidirectional composite laminates with a region of fibre waviness », *Composites : Part A* Vol. 43, pp. 435–444, 2012.
- [23] T. J. Vogler, S.-Y. Hsu, S. Kyriakides « Composite failure under combined compression and shear », *International Journal of Solids and Structures* Vol. 37 n° 12, pp. 1765–1791, 2000.
- [24] T. J. Vogler, S. Kyriakides « On the initiation and growth of kink bands in fiber composites : Part II. analysis », *International Journal of Solids and Structures* Vol. 38, pp. 2653–2682, 2001.
- [25] C. S. Yerramalli, A. M. Waas « The effect of fiber diameter on the compressive strength of composites - A 3D finite element based study », *Computer Modeling in Engineering and Sciences* Vol. 6, pp. 1–16, 2004.
- [26] S. H. Lee, A. M. Waas « Compressive response and failure of fiber reinforced unidirectional composites », *International Journal of Fracture* Vol. 100 n° 3, pp. 275–306, 1999.
- [27] N. A. Fleck, J. Y. Shu « Microbuckle initiation in fibre composites : a finite element study », *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* Vol. 43 n° 12, pp. 1887–1918, 1995.
- [28] N. Feld, O. Allix, E. Baranger, J.-M. Guimard « A micromechanics-based mesomodel for unidirectional laminates in compression up to failure », *Journal of Composite Materials* Vol. 46 n° 23, pp. 2893–2909, 2012.
- [29] B. A. Bednarczyk, B. Stier, J.-W. Simon, S. Reese, E. J. Pineda « Meso-and micro-scale modeling of damage in plain weave composites », *Composite Structures* Vol. 121, pp. 258–270, 2015.
- [30] S. Nezamabadi, J. Yvonnet, H. Zahrouni, M. Potier-Ferry « A multilevel computational strategy for handling microscopic and macroscopic instabilities », *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* Vol. 198, pp. 2099–2110, 2009.
- [31] N. Triantafyllidis, S. Bardenhagen « The influence of scale size on the stability of periodic solids and the role of associated higher order gradient continuum models », *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* Vol. 44 n° 11, pp. 1891–1928, 1996.
- [32] S. Drapier, J.-C. Granddier, M. Potier-Ferry « Towards a numerical model of the compressive strength for long fibre composites », *European Journal of Mechanics A. Solids* Vol. 18 n° 1, pp. 69–92, 1999.
- [33] S. Narayanan, L. S. Schadler « Mechanisms of kink-band formation in graphite/epoxy composites : a micromechanical study », *Composites Science and Technology* Vol. 59 n° 15, pp. 2201–2213, 1999.
- [34] R. Gutkin, S. T. Pinho, P. Robinson, P. T. Curtis « On the transition from shear-driven fibre compressive failure to fibre kinking in notched CFRP laminates under longitudinal compression », *Composites Science and Technology* Vol. 70 n° 8, pp. 1223, 2010.
- [35] A. M. Waas, P. Prabhakar « Interaction between kinking and splitting in the compressive failure of unidirectional fiber reinforced laminated composites », *Composite Structures* Vol. 98, pp. 85–92, 2013.
- [36] P. Prabhakar, A. M. Waas « Micromechanical modeling to determine the compressive strength and failure mode interaction of multidirectional laminates », *Composites : Part A* Vol. 50, pp. 11–21, 2013.
- [37] O. Allix, N. Feld, E. Baranger, J.-M. Guimard, C. Ha-Minh « The compressive behaviour of composites including fiber kinking : modelling across the scales », *Meccanica* Vol. 49 n° 11, pp. 2571–2586, 2014.
- [38] M. Bishara, R. Rolfes, O. Allix « Revealing complex aspects of compressive failure of polymer composites », *Composite Structures* Vol. 169, pp. 105–128, 2017.
- [39] M. G. Violette, R. A. Schapery « Time-dependent compressive strength of unidirectional viscoelastic composite materials », *Mechanics of Time-Dependent Materials* Vol. 6 n° 2, pp. 133–145, 2002.
- [40] A. Vinet, D. Gamby « Prediction of long-term mechanical behaviour of fibre composites from the observation of micro-buckling appearing during creep compression tests », *Composites Science and Technology* Vol. 68 n° 2, pp. 526, 2008.
- [41] H. A. Israr, S. Rivallant, J.-J. Barrau « Experimental investigation on mean crushing stress characterization of carbon–epoxy plies under compressive crushing mode », *Composite Structures* Vol. 96, pp. 357–364, 2013.
- [42] F. Lahuerta, R. P. L. Nijssen, F. P. van der Meer, L. J. Sluys « Thickness scaled compression tests in unidirectional glass fibre reinforced composites in static and fatigue loading », *Composites Science and Technology* Vol. 123, pp. 115–124, 2016.