



HAL
open science

Étude de l'interaction fluide-structure d'un renfort mat avec une résine thermoplastique

Gautier Allusse, Olivier de Almeida, Quentin Govignon, Fabrice Schmidt

► **To cite this version:**

Gautier Allusse, Olivier de Almeida, Quentin Govignon, Fabrice Schmidt. Étude de l'interaction fluide-structure d'un renfort mat avec une résine thermoplastique. JNC23 - Journées Nationales sur les Composites 2023, AMAC, UFC, Supmicrotech-ENSMM, CNRS, Jul 2023, Besançon, France. hal-04606780

HAL Id: hal-04606780

<https://hal.science/hal-04606780>

Submitted on 10 Jun 2024

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.

Étude de l'interaction fluide-structure d'un renfort mat avec une résine thermoplastique

Study of the Fluid-Structure Interaction of a Mat Reinforcement with a Thermoplastic Resin

G. Allusse¹, O. De Almeida¹, Q. Govignon¹ and F. Schmidt¹

¹ : Institut Clément Ader (ICA)
Université de Toulouse, CNRS, IMT Mines Albi, INSA Toulouse, ISAE SUPAERO, UT3
Toulouse, France
e-mail : gautier.allusse@mines-albi.fr

Résumé

L'objectif de ce travail est d'étudier le comportement en compression d'un renfort de type mat. Les étapes de compression du renfort sec et lubrifié et sa relaxation au cours du temps en fonction de plusieurs niveaux de pression ont été caractérisées à l'aide d'un banc conçu pour l'étude. Le comportement en compression du renfort peut être modélisé par une loi de puissance. Les coefficients de la loi varient en fonction de la rupture des fibres pendant la compression. L'étude de la compressibilité du renfort permet d'optimiser la fabrication des composites, d'obtenir des matériaux sans porosité et sans augmentation de l'épaisseur induite par un excès de polymère.

Abstract

The aim of this work was to study the compression behavior of a mat reinforcement. The compaction stages of the dry and wet reinforcement and its relaxation over time as a function of several pressure levels have been characterized with a custom-designed bench. The compression behavior of the reinforcement can be modeled by a power law. The coefficients of the law are changing with the rupture of the fibers during compression. The study of the reinforcement compressibility enables an optimized composite manufacturing, to obtain materials without porosity and without increasing the thickness induced by a polymer excess.

Mots Clés : Interactions fluide-structure, compression, chargement hydromécanique.

Keywords: Fluid-structure interaction, compressibility, hydro-mechanical load.

1. Introduction

L'imprégnation est l'une des principales étapes de la fabrication des composites. Elle transforme l'assemblage des couches de renfort et de matrice en un composite rigide. L'écoulement de la résine à travers un renfort sec est généralement modélisé comme un écoulement saturé à travers un milieu poreux, grâce à la loi de Darcy [1]. La haute viscosité des matrices thermoplastiques nécessite des pressions de consolidation de plusieurs dizaines de bars. L'utilisation de la loi de Darcy doit donc être adaptée pour être utilisée avec les thermoplastiques en raison des interactions fortes fluides-structures, impliquant un couplage hydromécanique [2]. En particulier, le gradient de pression dans le polymère à l'état fondu doit être mis à jour en introduisant le comportement contrainte-déformation du renfort. En effet, le renfort est d'abord comprimé par la couche de liquide lorsque la pression de consolidation est appliquée, puis se relaxe lorsque le fluide pénètre dans le renfort [3] suivant la loi de Terzaghi. Cet équilibre des forces indique que la pression totale appliquée σ_{tot} est équilibrée par la contrainte effective moyenne dans la préforme σ_f et par la pression moyenne de la résine \bar{p}_r :

$$\sigma_{tot} = \sigma_f + \bar{p}_r \quad (\text{Eq. 1})$$

Ce phénomène lié à l'élasticité du renfort lors de la compression modifie considérablement la perméabilité du renfort lors de son imprégnation et doit être pris en compte pour une modélisation correcte du processus d'imprégnation. [4]. Dans cet objectif, le comportement

hydromécanique d'un renfort en fibre de carbone (CF) de type mat avec une matrice thermoplastique a été étudié.

2. Expérimental

2.1 Matériaux et méthode

Un grade de renfort CF de type mat-non tissé d'une épaisseur nominale de 2,5 mm et d'une masse surfacique de 250 g/m² a été étudié.

Afin d'étudier les interactions fluide-structure entre le renfort et la matrice thermoplastique, des plaques composites ont été fabriquées avec du poly(fluorure de vinylidène) (PVDF) combiné au mat.

Les panneaux ont été fabriqués à l'aide d'un procédé de moulage par thermocompression basé sur la méthode du film stacking. Cette méthode consiste à chauffer et à comprimer un empilement de couches alternées de film polymère et de renfort sec.

2.2 Caractérisation

2.2.1 Compression du renfort

Un banc de compactage a été conçu et fabriqué pour réaliser les essais de compression sur le renfort sec et lubrifié. Les échantillons de mat ont été découpés au format 5 cm x 5 cm à l'aide d'un emporte-pièce poinçon et d'une presse à bras. Après avoir mesuré la complaisance de la machine, une charge de compression normale a été appliquée aux échantillons jusqu'à 10 MPa à l'aide d'un plateau de compactage d'un diamètre de 15 cm. Le dispositif de compression est installé dans une machine d'essai Instron équipée d'une cellule de charge 30 kN.

Pour chaque essai, 4 couches de mat ont été utilisées. Avant la mesure de la compression, la masse surfacique réelle a été calculée à partir de la masse de chaque échantillon utilisé. L'essai de compression s'est déroulé en trois étapes. Tout d'abord, le renfort a été comprimé à des vitesses de 2 et 10 mm/min jusqu'à ce que la pression cible soit atteinte. La phase de fluage a ensuite été observée pendant 5 min sous une force constante. Le déchargement a ensuite été effectué à la même vitesse que la phase de compression jusqu'à revenir à une contrainte nulle.

Pour la compression des fibres à l'état lubrifié, chaque pli de renfort a été trempé dans un bain d'eau distillée pendant au moins 15 minutes afin d'assurer un mouillage complet des fibres. L'excès de liquide a ensuite été évacué des plis imbibés en les plaçant sur une grille. Cette étape a été réalisée pour minimiser l'effet de l'excès de liquide pendant l'essai de compactage. Après la procédure de lubrification, les plis ont été testés en mode de compression en utilisant le même protocole que pour les échantillons secs.

2.2.2 Essais de traction

Les essais de traction ont été réalisés sur une machine électromécanique Instron 5800-R avec une cellule de charge de 30 kN, équipée de mâchoires auto-serrantes et d'un extensomètre. La contrainte de rupture a été calculée pour différentes configurations de fabrication des composites. Pour chaque configuration, trois échantillons avec une longueur utile de 2 mm ont été testés. La contrainte moyenne à la rupture a été utilisée pour observer l'effet des configurations de fabrication sur les propriétés mécaniques des plaques.

3. Résultats et discussion

3.1 Compression du renfort

La modélisation de l'imprégnation des renforts fait souvent l'hypothèse que la préforme reste rigide. Cependant, dans la pratique, un milieu poreux est compressible et le gradient de pression qui guide le front d'imprégnation peut déformer le renfort de manière significative. Dans le cas des renforts CF de type mat, la faible orientation dans le plan des fibres les rend très compressibles et sujettes à des déformations induites par l'écoulement.

Le comportement en compression du renfort est décrit par l'évolution de la contrainte en fonction du taux volumique des fibres (V_f) dans le renfort (Fig 1), qui peut être calculée à partir de la variation de l'épaisseur de l'échantillon.

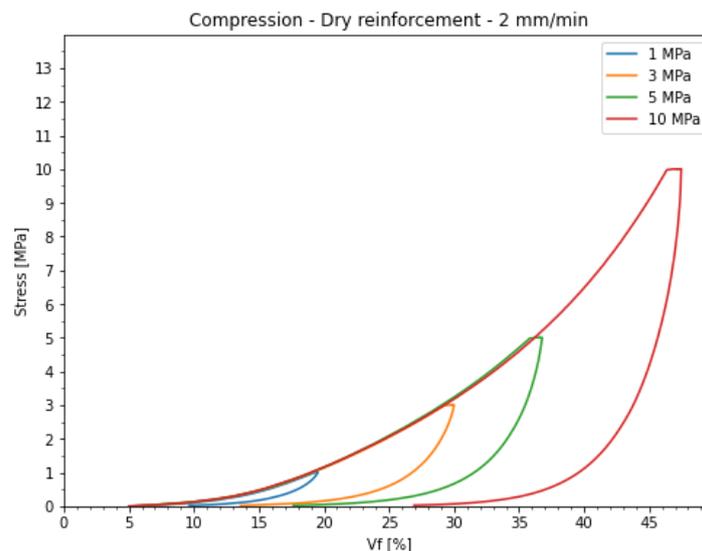


Fig 1. Comportement en compression du renfort CF mat pour 4 niveaux de consolidations.

Comme le montre la figure 1, la fraction volumique des fibres du renfort augmente de 6 % (soit 94 % des porosités ouvertes à l'état initial) jusqu'à atteindre progressivement 46,51 % sous une pression de 10 MPa et 47,41 % après 5 minutes de fluage sous la même charge.

Ce comportement mécanique particulier peut être attribué au réarrangement des fibres en une organisation plus compacte pendant la compression. Les contacts entre les fibres supportent une partie de la pression et modifient la distribution des fibres dans l'épaisseur de la plaque.

Une hystérésis importante est observée entre les courbes de compression et de déchargement, ce qui indique que la réorganisation des fibres se produisant lors de la compression n'est pas totalement réversible. Le comportement irréversible du renfort doit donc être considéré, notamment pour les phénomènes de fluage se produisant lors de l'imprégnation. Cependant, lors de l'imprégnation, le fluage se produit lorsque le renforcement est saturé par le polymère fondu, comportement qui doit être distingué de l'étape de compression.

Afin d'analyser la relaxation du renfort en régime saturé, des essais de compressibilité ont été réalisés sur des échantillons lubrifiés. Les résultats montrent que le V_f maximal atteint est plus élevé pour le renfort lubrifié (29,7%) que pour le renfort sec (29,3%) pour le même niveau de charge (Figure 2). Ces effets sont principalement dus à la lubrification qui permet un réarrangement plus facile des fibres à faible contrainte et réduit la rupture des fibres à forte contrainte. La fine couche de lubrifiant à la surface des fibres agit comme un agent protecteur, réduisant la contrainte agissant sur les fibres

[5].

En plus d'atteindre un V_f plus élevé dans le cas du renfort lubrifié, le fluage est plus prononcé dans la configuration lubrifiée. Pendant les 5 minutes de maintien de la charge, les fibres se réorganisent plus facilement, augmentant le V_f après fluage (+ 0,7% pour le renfort sec contre + 1,4% pour le renfort lubrifié).

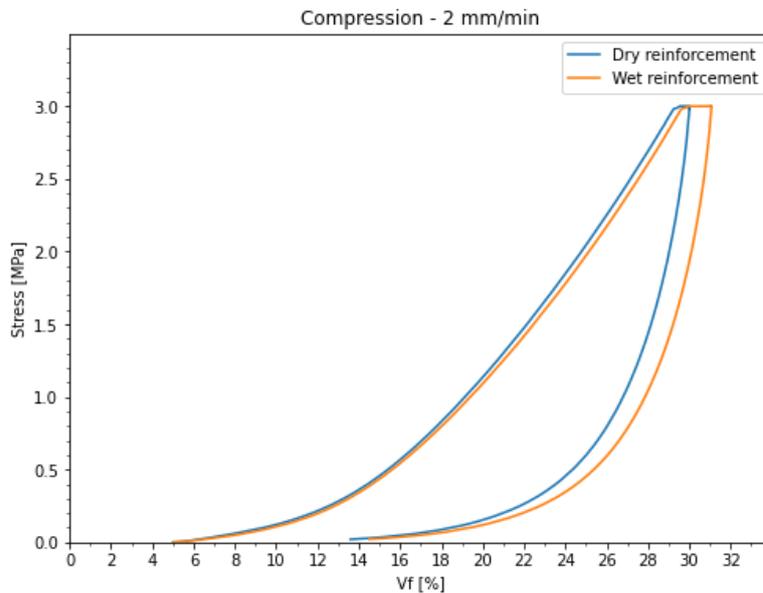


Fig 2. Comportement en compression du renfort sec et lubrifié, avec maintien en pression à 3 MPa.

Comme le montre la figure 3, l'effet de la lubrification des fibres est également observable pendant la phase de relaxation sous maintien du déplacement, c'est-à-dire à fraction volumique de fibre constante ($V_f = 35\%$). La contrainte sur les renforts secs reste plus élevée que sur les renforts lubrifiés, ce qui confirme l'effet de lubrification sur la réorganisation des fibres de carbone. Cet effet est un élément crucial à considérer lors de l'étude du comportement en compression du matériau.

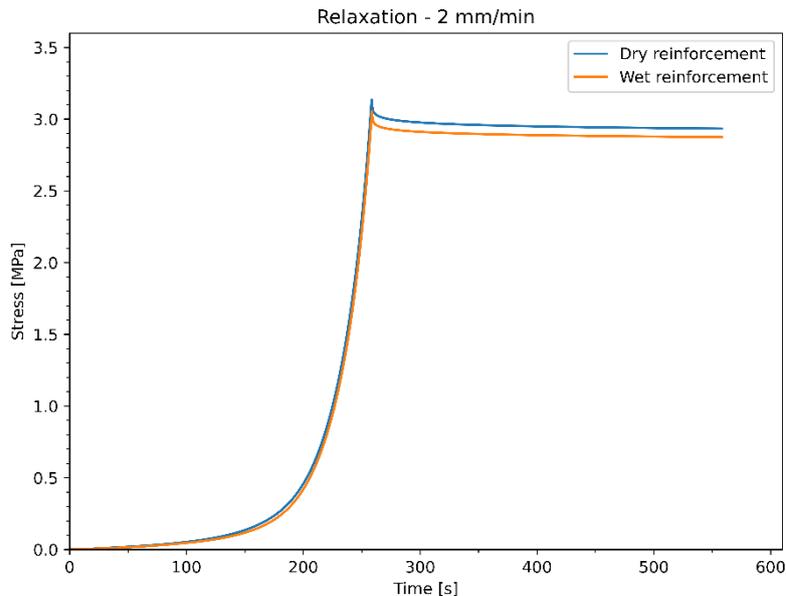


Fig 3. Evolution de la contrainte durant la phase de relaxation, maintien en déplacement à $V_f = 35\%$.

3.2 Rupture des fibres

Le comportement irréversible observé lors des essais de compression-relaxation peut être partiellement attribué à la rupture de fibres à certains points de contact fibre-fibre. En effet, l'architecture mat du renfort se traduit par un niveau élevé d'enchevêtrement des fibres (Figure 4). L'organisation des fibres conduit à de nombreux points de contact entre les fibres pendant la compression. Des contraintes de flexion se produisent alors localement, conduisant à la rupture des fibres.

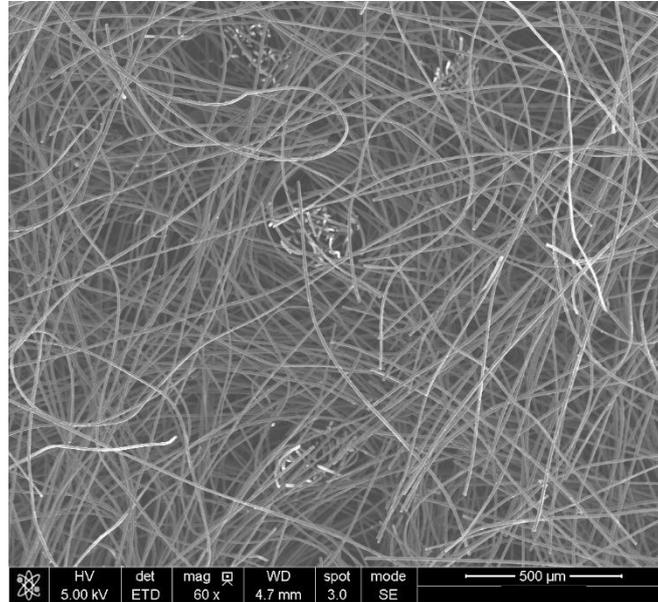


Fig 4. Observation au Microscope Electronique à Balayage (MEB) de l'architecture des fibres.

La rupture des fibres au cours de la mise en forme est un point de contrôle crucial car elle influence non seulement le processus de consolidation par le biais du comportement de compression et de relaxation, mais aussi les performances finales des composites (mécaniques, électriques, physicochimiques).

Les essais de compression ne permettant pas d'identifier clairement le niveau de contrainte auquel se produit la rupture des fibres de carbone, des essais mécaniques ont été utilisés pour déterminer le niveau de rupture des fibres en fonction de la charge appliquée. Pour ce faire, des panneaux composites plats ont été consolidés sous presse en utilisant la méthode du film stacking, mais au lieu d'appliquer la pression de consolidation une fois que le polymère fondu, un premier chargement et un déchargement à différents niveaux ont été réalisés à température ambiante avant le chauffage. Tous les échantillons ont ensuite été consolidés à la même pression de consolidation après la compression initiale des CF. Des éprouvettes de traction ont ensuite été découpées dans la plaque composite et les mesures de contrainte à la rupture des composites ont été mesurées, car elles donnent une indication sur la rupture des fibres : plus le pourcentage de fibres rompues est élevé dans le matériau, plus la contrainte à la rupture du composite est faible.

Les résultats de la figure 5 montrent que la rupture des fibres commence dès les premiers niveaux de charge, même faibles, et augmente avec la pression appliquée jusqu'à 10 MPa, pression maximale appliquée dans cette étude. Ainsi, pour $V_f = 47\%$ correspondant à une pression de compression à température ambiante de 10 MPa, la diminution de la contrainte à la rupture est de 19%, alors que pour $V_f = 39\%$, correspondant à une pression de compression à température ambiante de 6 MPa, la diminution de la contrainte à la rupture est de 5%.

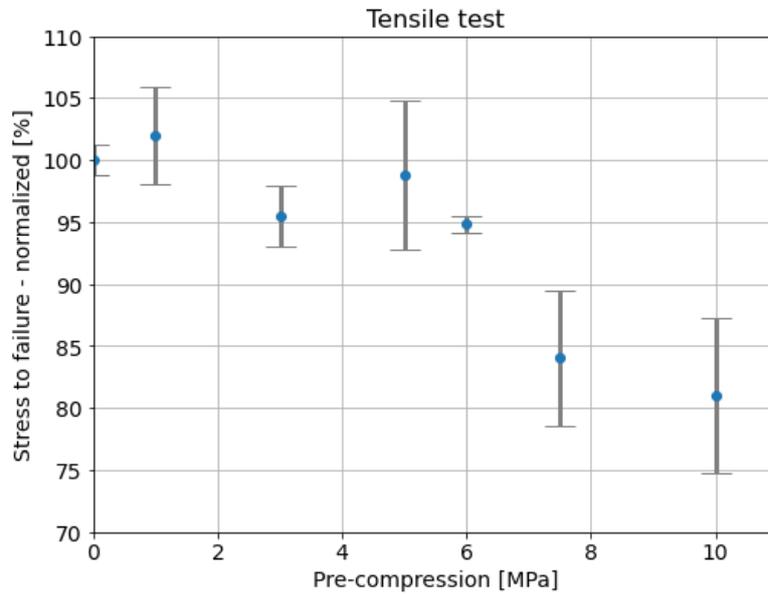


Fig 5. Effet de la rupture des fibres sur la contrainte à la rupture des composites.

Afin de prendre en compte l'effet de la rupture des fibres dans les modèles d'imprégnation, le comportement en compression du renforcement a été modélisé par la loi puissance suivante, où c et d sont les coefficients de la loi de puissance (Figure 6) :

$$\sigma = c V_f^d \tag{Eq. 2}$$

Dans l'équation 2, d est un coefficient basé sur la théorie des poutres et le comportement en flexion de la fibre. Il varie en fonction de la nature du renfort. Dans le cas d'un mat, dont l'architecture est peu organisée, le coefficient varie classiquement entre 5 et 8 alors qu'il est compris entre 9 et 15 dans le cas de renforts plus ordonnés tels que les renforts unidirectionnels (UD) ou les renforts tissés [6], [7]. La valeur du coefficient c dépend fortement de la vitesse de compression, en raison de la réponse viscoélastique du renfort [5].

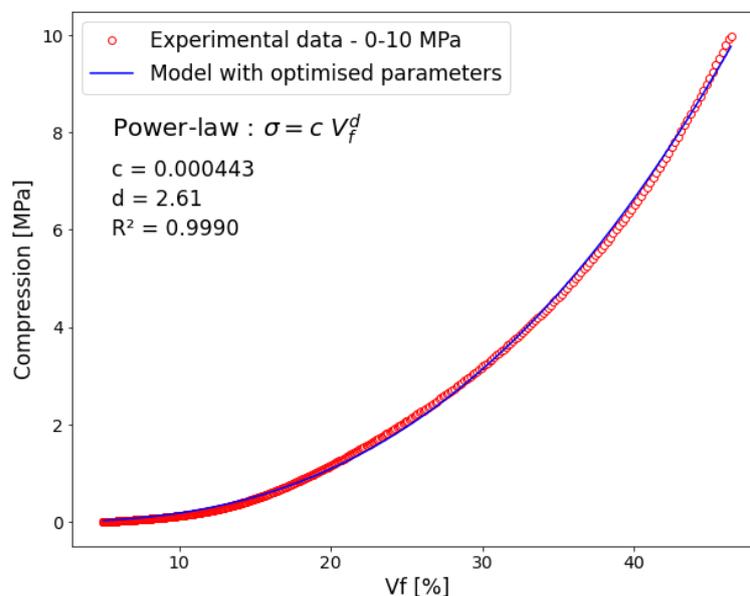


Fig 6. Modélisation du comportement en compression du renfort sec.

Le coefficient d peut donc être utilisé comme indicateur du niveau de rupture des fibres. Il a été calculé pour différentes gammes de pression à partir de l'état non chargé, et les valeurs des coefficients d sont présentées dans la figure 7 en fonction de la gamme de pression considérée. Globalement, dans le cas du renfort étudié, le coefficient est plus faible que celui des mats classiques [6]. L'architecture du mat étudié est en effet moins organisée, ce qui conduit à une compressibilité élevée du renfort. Mais le coefficient d varie en fonction de la pression appliquée au renfort. Il est maximal pour les faibles pressions et diminue avec l'augmentation de la pression. Comme nous l'avons vu plus haut, les CF rompent progressivement sous l'effet de la charge (figure 5). Au fur et à mesure que les fibres se rompent, l'architecture du renfort est modifiée et la valeur du coefficient d diminue. La désorganisation augmente avec la pression en raison de la rupture des fibres.

L'effet de la lubrification sur le comportement en compression est faible. Il n'affecte pas considérablement la valeur du coefficient d , contrairement à la vitesse de compression qui tend à l'augmenter.

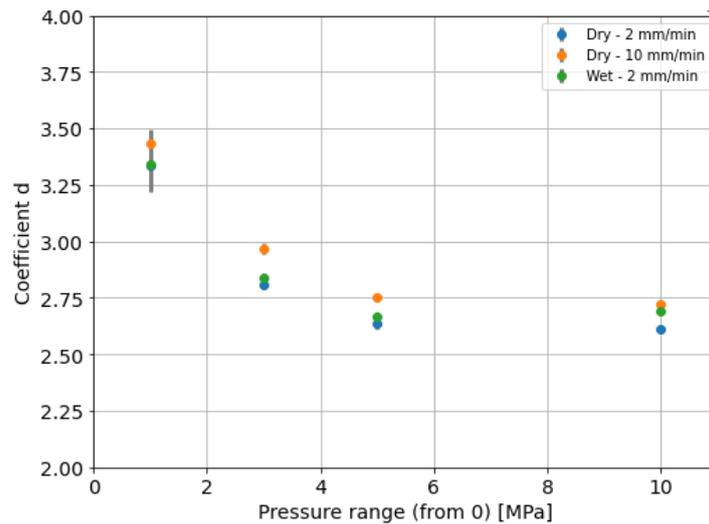


Fig 7. Evolution du coefficient d en fonction de la gamme de pression.

3.3 Application à la fabrication de composites

L'étude des interactions fluide-structure par la compression du renfort permet de comprendre les phénomènes qui se produisent pendant l'imprégnation sous l'effet de la pression appliquée. Les résultats obtenus à partir des caractérisations sont comparés aux plaques composites réelles fabriquées dans différentes conditions de fabrication (figure 8).

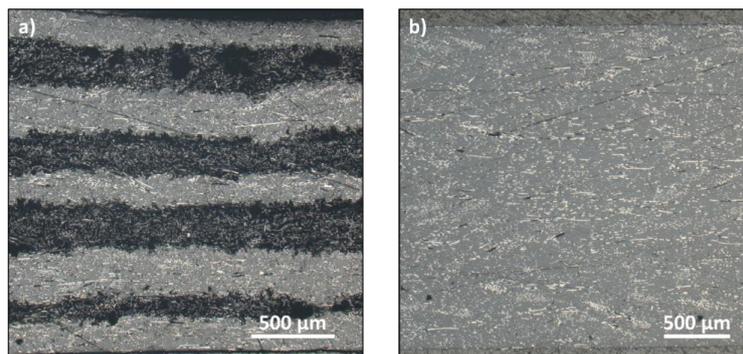


Fig 8. Observations au microscope optique des composites fabriqués sous 1 MPa avec a) $M_f = 30\%$ et b) $M_f = 20\%$.

Le comportement en compression du renfort permet d'optimiser les conditions de fabrication du composite. Un composite, classiquement fabriqué avec un taux volumique de fibres de 30%, soumis à une pression de thermocompression de 1 MPa conduit à un taux de porosité de 33% (Figure 8-a). L'observation de la microstructure au microscope optique permet d'identifier d'importantes zones sèches, matérialisées par 4 bandes sombres dans l'épaisseur correspondant aux 4 plis CF non imprégnés. Dans ce cas, la porosité n'est pas uniquement liée à un problème d'imprégnation décrit par la loi de Darcy. En effet, le comportement en compression du renfort (Figure 1) indique que la fraction volumique de fibres correspondant à une pression de 1 MPa est de 20%. Ainsi, la pression appliquée ne permet pas d'obtenir un composite de 30% de fraction massique de fibres à porosité nulle car la quantité de polymère n'est pas suffisante pour obtenir un composite totalement imprégné. En effet, il est nécessaire d'ajuster la quantité de matrice au niveau de compression maximum que le renfort peut atteindre sous une charge spécifique. Dans le cas présent, au moins 80% v de polymères doivent être introduits afin d'imprégner complètement le renfort sous une pression de 1MPa. En modifiant les rapports de quantité de matériaux du CF et du polymère à partir du comportement à la compression sous 1 MPa, c'est-à-dire 20 % v de renfort et 80 % v de polymère, le composite fabriqué ne présente aucune porosité (figure 8-b). Il en résulte une réduction de 12 % de l'épaisseur car les pores occupent plus d'espace que le polymère.

4. Conclusions et perspectives

Afin de modéliser l'imprégnation d'un renfort mat par une matrice thermoplastique, le comportement en compression du mat a été étudié. La phase de compression n'a pas montré de différence significative entre les renforts secs et lubrifiés. Cependant, la phase de relaxation a montré la meilleure capacité des fibres à se réorganiser lorsqu'elles sont lubrifiées. De même, la charge supportée par le CF est plus élevée lorsque le renfort est lubrifié. La fine couche de lubrifiants protège les fibres lors de la compression. L'étape de compression conduit à une rupture progressive des fibres, modifiant la valeur du coefficient d dans la loi de puissance. Les mesures de la perméabilité transversale du mat, combinées au comportement en compression, permettront de mettre en place un modèle avancé de la perméabilité jusqu'à un modèle de l'imprégnation, grâce à la loi de Darcy.

Références

- [1] V. Michaud et J.-A. E. Månson, « Impregnation of Compressible Fiber Mats with a Thermoplastic Resin. Part I: Theory », *J. Compos. Mater.*, vol. 35, no 13, p. 1150-1173, juill. 2001, doi: 10.1177/002199801772662271.
- [2] P. Ouagne, J. Bréard, T. Ouahbi, A. Saouab, et C. H. Park, « Hydro-mechanical loading and compressibility of fibrous media for resin infusion processes », *Int. J. Mater. Form.*, vol. 3, no S2, p. 1287-1294, sept. 2010, doi: 10.1007/s12289-009-0671-x.
- [3] S. T. Jespersen, M. D. Wakeman, V. Michaud, D. Cramer, et J.-A. E. Månson, « Film stacking impregnation model for a novel net shape thermoplastic composite preforming process », *Compos. Sci. Technol.*, vol. 68, no 7-8, p. 1822-1830, juin 2008, doi: 10.1016/j.compscitech.2008.01.019.
- [4] V. Michaud, R. Törnqvist, et J.-A. E. Månson, « Impregnation of Compressible Fiber Mats with a Thermoplastic Resin. Part II: Experiments », *J. Compos. Mater.*, vol. 35, no 13, p. 1174-1200, juill. 2001, doi: 10.1177/002199801772662280.
- [5] P. A. Kelly, R. Umer, et S. Bickerton, « Viscoelastic response of dry and wet fibrous materials during infusion processes », *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 37, no 6, p. 868-873, juin 2006, doi: 10.1016/j.compositesa.2005.02.008.
- [6] Y. Luo et I. Verpoest, « Compressibility and relaxation of a new sandwich textile preform for liquid composite molding », *Polym. Compos.*, vol. 20, no 2, p. 179-191, 1999.
- [7] S. Toll et J.-A. Månson, « An analysis of the compressibility of fibre assemblies », in 6th Int. Conf. Fibre Reinf. Compos., 1994, p. 1-10.