HAL
open science

Effet de la température sur le comportement mécanique et le scénario d'endommagement en traction quasi-statique et en fatigue d'un composite à matrice acrylique et fibres de verre,

Eileen Boissin, Christophe Bois, Jean-Christophe Wahl, Thierry Palin-Luc

To cite this version:

Eileen Boissin, Christophe Bois, Jean-Christophe Wahl, Thierry Palin-Luc. Effet de la température sur le comportement mécanique et le scénario d'endommagement en traction quasi-statique et en fatigue d'un composite à matrice acrylique et fibres de verre,. 21ème Journées Nationales sur les Composites, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (ENSAM) - Bordeaux, Jul 2019, Bordeaux, Talence, France. hal-02420741

HAL Id: hal-02420741

https://hal.science/hal-02420741v1

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.

Effet de la température sur le comportement mécanique et le scénario d'endommagement en traction quasi-statique et en fatigue d'un composite à matrice acrylique et fibres de verre

Effect of temperature on mechanical behaviour and damage scenario under quasi-static tensile and fatigue loadings of an acrylic-matrix and glass-fibre-reinforced composite

Eileen Boissin[1], Christophe Bois[1], Jean-Christophe Wahl[1] et Thierry Palin-Luc[2]

1 : Université de Bordeaux, CNRS, I2M Bordeaux
351, Cours de la libération, F-33400 Talence, France
e-mail : eileen.boissin@u-bordeaux.fr, christophe.bois@u-bordeaux.fr, jean-christophe@u-bordeaux.fr

2 : Arts et Métiers ParisTech, CNRS, I2M Bordeaux
Esplanade des Arts et Métiers, F-33405 Talence Cedex, France
e-mail : thierry.palin-luc@ensam.eu

Résumé

L'influence de la température sur le scénario d'endommagement en traction quasi-statique et en fatigue uniaxiale d'un composite stratifié à matrice acrylique et fibres de verre a été étudiée dans l'intervalle de température de service des pales d'éolienne, à savoir entre -20 et 60°C. L'observation des endommagements au microscope optique de la tranche des éprouvettes a été effectuée sous charge, de manière à rendre les endommagements plus visibles. Les essais de traction ont été réalisés à 10 et 40°C, tandis que les essais de fatigue ont été réalisés à 15, 25 et 40°C. Ces essais ont montré que la température avait une influence significative sur le scénario d'endommagement du composite puisque l'augmentation de la température induit une augmentation du seuil de déformation correspondant à l'initiation de la première fissure transverse, au point, dans le cas des essais de traction, de le rendre supérieur à la déformation à rupture des éprouvettes.

Abstract

The effect of temperature on the damage scenario in an acrylic-matrix and glass-fiber reinforced composite under quasi-static tensile loading has been studied in the service temperature range of wind turbine blades, i.e. between -20 and 60°C. Damage observation has been performed with an optic microscope under loading, in order to make damages more visible. Tensile tests have been performed at 10 and 40°C, while fatigue tests have been performed at 15, 25 and 40°C. These tests have shown that temperature had a significant impact on the composite damage scenario since the temperature rise leads to a shift in the strain threshold corresponding to the first transverse crack initiation, to the point where it becomes higher than the specimen ultimate strain during tensile tests.

Mots Clés : effet, température, scénario d'endommagement, composite
Keywords : effect, temperature, damage scenario, composite

1. Introduction

Dans le but de diminuer l'empreinte environnementale du secteur éolien, des résines thermoplastiques acryliques ont été développées au cours des dernières années pour remplacer les résines thermodurcissables communément utilisées. Elles offrent de meilleures possibilités de recyclage tout en permettant une réduction des coûts de fabrication puisque leur polymérisation peut se faire à température ambiante [1]. Au cours de leurs vingt années de service, les pales d'éolienne subissent entre 10^8 et 10^9 cycles de chargement [2], et sont exposées à des températures variant de -20°C à 60°C. Ces cycles peuvent conduire à une dégradation significative des propriétés mécanique du matériau composite, du fait de l'apparition d'endommagements : décohésions fibre-

matrice, fissuration et délaminage [3]. Ces endommagements se produisent à des échelles différentes et peuvent interagir entre eux, ce qui conduit à des ruptures prématurées de fibres. La rupture finale d'un composite est donc due à une combinaison de ces mécanismes [3]. Réaliser la polymérisation à température ambiante peut conduire à une température de transition vitreuse relativement basse pour la matrice acrylique. Le comportement mécanique et le scénario d'endommagement deviennent donc dépendants de la température dans l'intervalle de température de service des pales d'éolienne [4]. L'étude de la dépendance du scénario d'endommagement constitue l'objet de l'étude présentée ici. Elle est réalisée dans un premier temps en traction quasi-statique, puis dans un second temps, en fatigue uniaxiale.

1.1 Etat de l'art sur l'influence de la température sur les polymères et composites à matrice polymère

Les propriétés thermomécaniques des matériaux polymères sont généralement faibles du fait de la nature de leur matrice, avec une température maximum de service généralement comprise entre 80 et 150°C [5]. Il existe toutefois des polymères capables de supporter des températures plus élevées tels que les résines polyimide dont la température maximum de service peut atteindre 315°C [6]. De manière générale, les travaux traitant de l'influence de la température de la température sur les propriétés mécaniques en traction des polymères mettent en évidence une chute de la raideur et de résistance mécanique qui est accompagnée d'une augmentation de la ductilité, lorsque la température d'utilisation se rapproche de la température maximum de service [4,7].

Par contre, un grand nombre de facteurs et de phénomènes peuvent être impliqués dans le degré d'impact qu'aura la température sur la réponse mécanique en traction quasi-statique et en fatigue des composites à matrice polymère. Tout d'abord, la direction du chargement par rapport à l'orientation des fibres défini le degré de sensibilité. De ce fait, l'effet de la température selon les différentes directions de chargement concorde avec l'anisotropie du composite. Les composites à matrice polymère sont ainsi peu sensible à la température lors d'un chargement dans la direction des fibres [8], mais montrent une dépendance similaire à celle de la matrice non renforcée lors d'un chargement où le comportement de la matrice est prédominant [9]. De plus, comme mentionné par Sethi et al. [10], chaque association entre un type de renfort, un type d'ensimage, une résine polymère et un procédé de fabrication conduira à une sensibilité à la température différente. Cette dernière dépendra alors du comportement de chaque constituant, mais aussi des micro- et méso-structures formées par l'association de ces constituants, puisque ce sont ces structures qui piloteront les distributions de contraintes et les propriétés des interfaces fibre/matrice.

Il est aussi important de noter que, les fibres et la matrice ayant des coefficients de dilatation thermique très différents, les contraintes thermiques induites par l'écart entre la température de fabrication et celle d'essai peuvent avoir une influence significative sur le scénario et les mécanismes d'endommagement aux échelles méso- et microscopique [10]. Un composite peut alors être vu comme un système complexe qui génère un scénario d'endommagement unique qui dépend de la température de sollicitation [11,12]. Par exemple, l'augmentation de la température conduit à une diminution de la résistance mécanique de la matrice mais à une augmentation de sa ductilité et ainsi, à une meilleure distribution de contrainte dans la microstructure. Ces deux phénomènes pris séparément ont un effet contradictoire sur le comportement mécanique et ils interagissant avec tous les autres facteurs mentionnés précédemment. Il est alors difficile de prévoir l'effet qu'ils auront sur le comportement mécanique. Dans le cas d'un chargement où le comportement de la matrice est prédominant, le scénario d'endommagement peut passer d'une fissuration matricielle fragile à une fissuration matricielle ductile, à des décohésions fibre/matrice diffuses ou à de la plasticité matricielle [8,11]. La modification du scénario d'endommagement est aussi associée à un décalage du seuil d'endommagement initial et du seuil de rupture[8,12].

Pour un chargement de fatigue, la complexité est encore accrue puisqu'une augmentation de la température peut améliorer ou détériorer la tenue en fatigue plus ou moins fortement, ou ne pas avoir d'impact significatif, en fonction du composite stratifié considéré, et ce, quelle que soit la direction de chargement [13–16]. Il en va de même pour l'effet de la température sur le scénario d'endommagement, comme le montre Sun et al. [17] dans le cas de deux stratifiés à matrice époxy renforcée de fibres de carbone testés dans les mêmes conditions, pour lesquels la densité de fissures est plus élevée dans les plis transverses à 149°C qu'à 24°C dans le cas du stratifié $[0/90_4]_s$, alors que la tendance inverse est observée dans le cas du stratifié $[0/90_2]_s$. En conséquence, la sensibilité à la température des composites stratifiés à matrice polymère dépend encore plus fortement de l'association qui est faite entre un type de renfort, un type de stratification, un type d'ensimage, une résine polymère et un procédé de fabrication.

1.2 Matériau étudié

Cette étude porte sur un stratifié constitué d'une matrice thermoplastique acrylique ELIUM® et de renforts biaxiaux (BXS) G-Ply™ en fibres de verre E, de grammage 1005g/m². Ces renforts ont été fournis par CHOMARAT. Ils possèdent un ensimage optimisé pour la résine acrylique ELIUM® d'ARKEMA. Les données fournisseur indiquent une température maximum de service de 80°C, pour une température de transition vitreuse à 109°C. Les plaques de composite ont été fabriquées par infusion sous vide au centre de R&D Canoë.

2 Protocole expérimental

Lors des essais de traction quasi-statique et de fatigue, la température a été contrôlée via l'utilisation d'une chambre environnementale. Cinq thermocouples ont été utilisés : deux pour mesurer la température aux extrémités de la zone utile des éprouvettes, deux pour mesurer celle de chacun des mors et un pour mesurer la température de l'air dans l'enceinte. Les essais ont été commencés après stabilisation de la température de l'ensemble expérimental complet, c'est-à-dire l'éprouvette, les mors et l'enceinte environnementale.

Les essais de traction quasi-statique ont été réalisés à la fois sur la matrice non renforcée, i.e. sur la résine pure, et le composite et les essais de fatigue ont été effectués sur le composite seulement. Les éprouvettes de résine pure sont échancrées et leur géométrie correspond au type M-I de la norme ASTM D638 [18]. Les éprouvettes de composite sont à bords parallèles, d'une longueur de 250mm par une largeur de 25mm. Les essais ont été effectuées sur des stratifications BXS $[(0/90)_2]_s$. En effet, ce type de stratification permet d'étudier les modes de dégradation des stratifiés (décohésions fibre-matrice, fissuration transverse et délaminage).

Pour les essais de traction quasi-statique, le même protocole d'observation in-situ de l'endommagement a été suivi pour toutes les éprouvettes de composite [3,19–21]. Il consiste à charger l'éprouvette jusqu'à atteindre un certain palier de déformation pour créer de l'endommagement, puis à décharger légèrement afin de prévenir d'éventuelles évolutions dues aux phénomènes visqueux, pour ensuite observer et photographier une zone de l'échantillon testé (dans notre cas, située sur une tranche des éprouvettes) à l'aide d'une caméra montée sur un microscope optique. Ce dernier est lui-même monté sur des tables micrométriques pouvant se déplacer dans les trois directions de l'espace. Ainsi, les images, prises avec un certain recouvrement, peuvent ensuite être assemblées pour reconstruire le champ d'observation des éprouvettes sur des dimensions de plusieurs centimètres (Fig. 21). Cette méthode permet de réduire considérablement la durée de l'essai et permet d'éviter les erreurs de positionnement lors du replacement de l'éprouvette, puisqu'il n'est pas nécessaire de démonter l'éprouvette après chaque palier de sollicitation. Enfin, elle facilite aussi l'observation et la détection des endommagements, puisque ces derniers sont plus ouverts sous charge. Pour les essais de fatigue, le protocole est quelque peu différent du fait

notamment de l'impossibilité de combiner l'utilisation du microscope optique et de la chambre environnementale sur la machine d'essai. Il consiste alors à appliquer des blocs de cycles successifs aux éprouvettes et à observer les endommagements sur la tranche des éprouvettes entre chacun d'entre eux. Pour cela, il est nécessaire d'enlever l'éprouvette testée de la machine de fatigue, et de la mettre sous charge sur la machine de traction quasi-statique de manière à suffisamment ouvrir les endommagements pour pouvoir facilement les observer avec le microscope optique, sans en créer de nouveaux. Une fois l'observation terminée, l'éprouvette est replacée sur la machine de fatigue pour le bloc de cycles suivant.

Pour tous les essais, une zone d'observation de 30mm de long a été choisie. Elle permet de trouver un compromis entre le temps passé à faire l'assemblage de la zone d'observation et la nécessité de rester représentatif de l'ensemble de l'éprouvette.

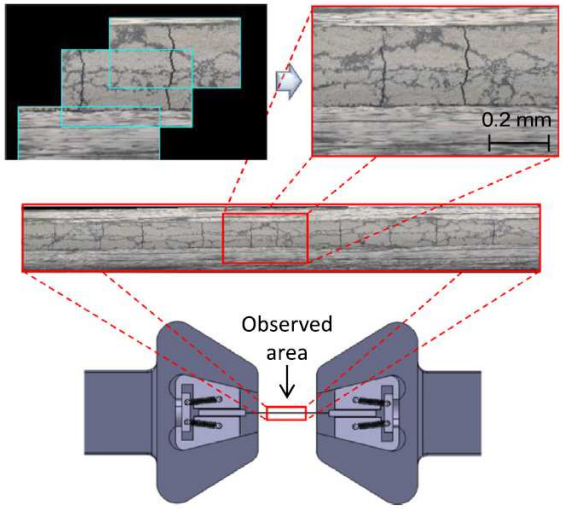

Fig. 1 : Reconstruction du champ d'observation d'une éprouvette [21].

3 Influence de la température dans le cas d'un chargement de traction quasi-statique

3.1 Influence de la température sur le comportement mécanique et le scénario d'endommagement de la matrice non renforcé

Tout d'abord, les résultats des essais de traction quasi-statique mettent en évidence une chute du module longitudital de 17% et une chute de la contrainte à rupture longitudinale de 24% avec l'augmentation de la température entre 15 et 40°C, accompagnées d'une augmentation de 102% de la déformation à rupture de la matrice. Ces résultats sont donc en accord avec les tendances généralement observées dans la littérature (cf. section 1.1).

Des observations ont été effectuées au microscope électronique à balayage (MEB) sur une partie de la zone utile des éprouvettes, éloignée d'environ 40mm du lieu de la rupture et longue de 10mm. Comme montré en Fig. 2 pour les éprouvettes à 15°C, des microfissures perpendiculaires à la direction de chargement ont été observées sur toutes les éprouvettes quelle que soit la température d'essai. L'ouverture de ces microfissures varie entre 0.15 et 0.28µm. Mais à 40°C, elles sont plus courtes, plus nombreuses, et leur arrangement est plus diffus qu'à 15°C. Ceci peut s'expliquer par le fait que la matrice est plus fragile à 15°C, ce qui facilite la propagation des micro-fissures. L'accumulation et le caractère diffus des endommagements avant la rupture sont ainsi plus importants avec l'augmentation de la température et donc de la ductilité de la matrice.

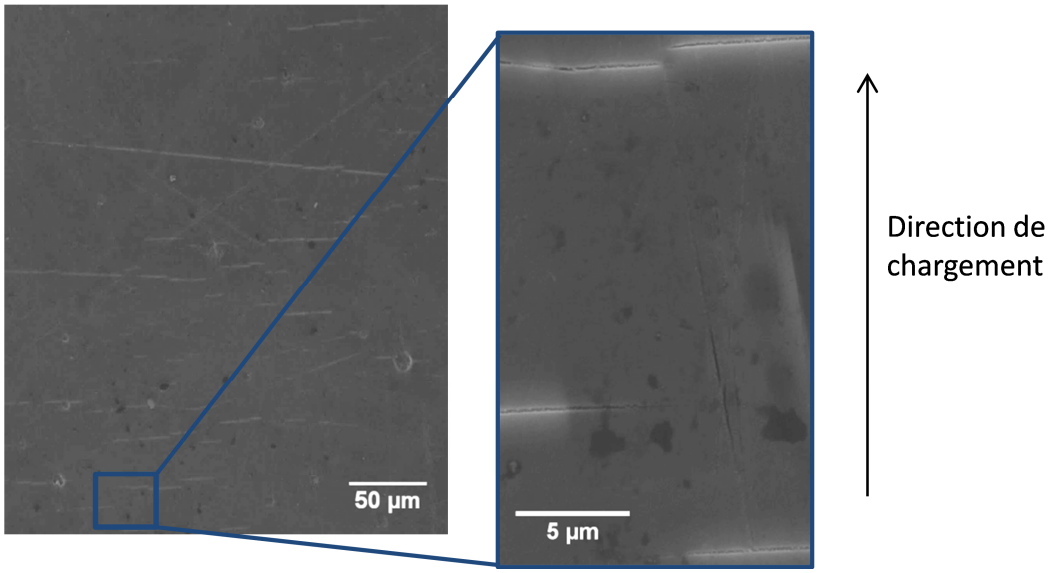

Fig. 2 : Observations au MEB à deux grossissements différents d'une surface d'une éprouvette de résine seule testée à 15°C, située à 40mm de la zone de rupture

3.2 Influence de la température sur le scénario d'endommagement du composite

Les essais ont été réalisés à une vitesse de déplacement de 0.5mm/min. Deux éprouvettes BXS $[(0/90)_2]_s$ ont été testées à chaque température d'essai, à savoir 10 et 40°C. Tout d'abord, il est important de noter que du fait de la présence dans la stratification testée de plis orientés dans la direction de chargement, le comportement mécanique de cette dernière n'est pas significativement impacté par l'augmentation de la température dans cet intervalle.

Les observations de la tranche des éprouvettes montrent la formation de nombreuses fissures transverses dans les plis à 90° à 10°C alors qu'il n'y en a aucune à 40°C (Fig. 3). De plus, les pointes de torons de fibres semblent s'endommager différemment en fonction de la température. En effet, à 10°C, les pointes de torons ne présentent que de la fissuration tandis qu'à 40°C, les pointes de torons laissent apparaître des « tâches sombres », tout en fissurant légèrement (Fig. 4), ce qui semble indiquer une capacité de déformation plastique plus importante de la matrice à 40°C. Cela est cohérent avec les résultats obtenus sur les éprouvettes de résine (cf. section précédente).

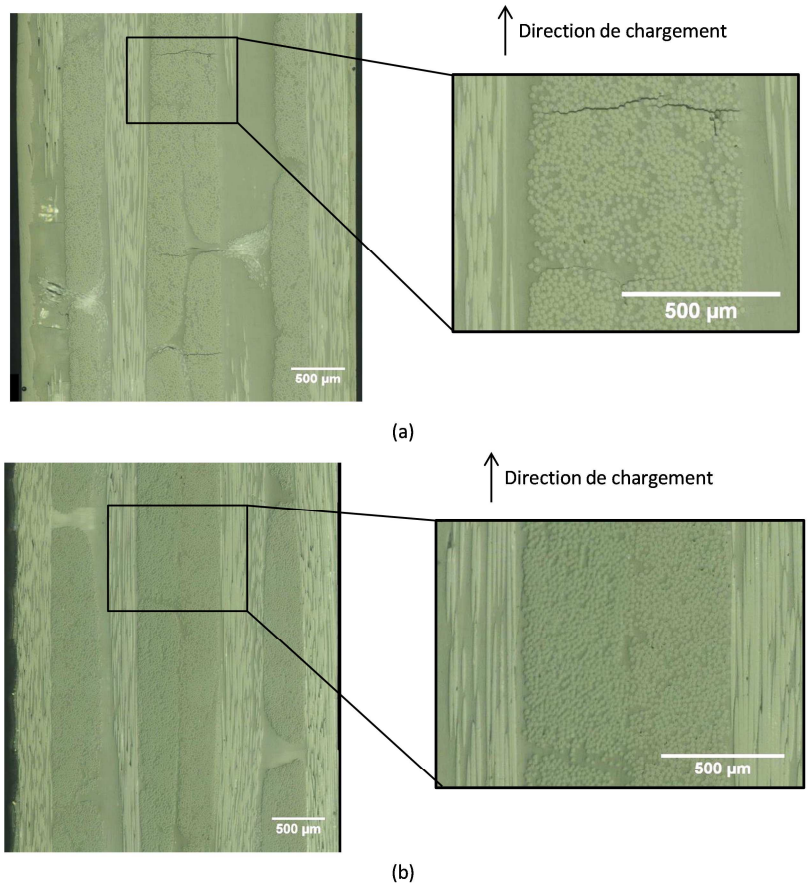

Fig. 3 : Observation à 2.4% de déformation longitudinale de la tranche d'une éprouvette $[(0°/90°)_2]_S$ testée en traction quasi-statique avec (a) à 10°C, l'apparition de nombreuses fissures transverses et (b) à 40°C, aucune fissure transverse

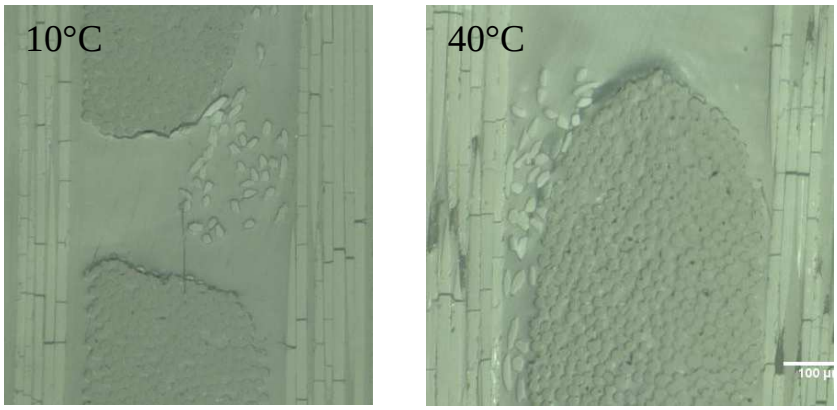

Fig. 4 : Différence d'endommagement au niveau des pointes de torons de fibres entre une éprouvette testée à 10°C et une testée à 40°C, à un niveau de déformation de 1.8%.

4 Influence de la température dans le cas d'un chargement de fatigue uniaxiale

Comme montré en section 3, le comportement mécanique et le scénario d'endommagement du composite varie significativement avec l'augmentation de la température de 15 à 40°C. De ce fait, la fréquence de sollicitation a été fixée de manière à ce que l'auto-échauffement des éprouvettes testées soit au maximum de 5°C. Ainsi, les essais ont été réalisés à une fréquence de 3Hz, pour un rapport de charge R de 0.1.

Tout d'abord, les résultats des essais ont montré que la durée de vie en fatigue des éprouvettes n'était pas significativement impactée par la variation de la température entre 15 et 40°C. Ensuite, les observations montrent que la formation de fissures transverses se produit à toutes les températures d'essais, quel que soit le niveau de chargement. Pour rappel, aucune fissure transverse n'était observée dans le cas d'un chargement de traction quasi-statique à 40°C. Cette différence s'explique par le fait qu'un chargement de fatigue se fait de manière répétitive, ce qui favorise l'initiation et la propagation des fissures au cours de la sollicitation. En conséquence, pour pouvoir comparer le scénario d'endommagement aux différentes températures d'essai, l'évolution des densités linéiques de fissures transverses complètes dans le pli double à 90°, partielles dans le pli double à 90°, complètes dans les plis simples à 90°, et de la densité linéique totale de fissures transverses ont été déterminées pour chaque éprouvette (Fig. 5). Elles sont définies comme le nombre de fissures divisé par la longueur de la zone d'observation. Il est important de noter que la grande majorité des éprouvettes ont rompu entre 33 et 60% de leur durée de vie en fatigue (établie préalablement via des essais de fatigue sur éprouvettes à bords échancrés), du fait de la géométrie droite des éprouvettes. Les éprouvettes échancrées ne sont pas utilisées dans le cadre de ces essais du fait de la difficulté à polir leur tranche. En conséquence, aucune conclusion sur l'évolution des densités linéiques de fissures transverses n'a pu être effectuée sur la deuxième moitié de la durée de vie des éprouvettes. Les résultats obtenus pour un chargement maximum valant 40% de la contrainte à rupture en traction des éprouvettes sont comparées en Fig. 6. Les résultats montrent que toutes les densités linéiques de fissures transverses sont plus faibles à 40°C qu'à 15 et 25°C.

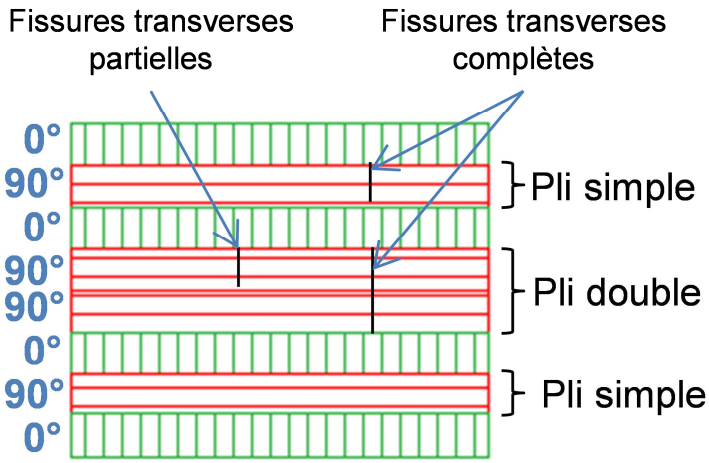

Fig. 5 : Définition pli simple/double et fissures transverses partielles/complètes pour le stratifié $[(0/90)_2]_s$

Les résultats obtenus pour un chargement maximum valant 30% de la contrainte à rupture en traction des éprouvettes sont comparés en Fig. 7. Les résultats montrent qu'à 40°C, les densités linéiques de fissures transverses complètes dans le pli double à 90°, complètes dans les plis simples à 90° et toutes fissures confondues sont plus faibles que celles obtenues à 15°C, jusqu'à la rupture des éprouvettes. Par contre, la densité linéique de fissures partielles dans le pli double à 90° ne semble pas significativement impactée par la température entre 15 et 40°C. Ces résultats confirment donc l'impact de la température sur la cinétique de fissuration en fatigue du composite, avec à 40°C, une propagation plus limitée des fissures transverses, mais montrent que cet impact est plus faible avec l'abaissement du niveau de chargement en fatigue, et donc avec l'augmentation de la durée de vie en fatigue. Comme la durée de vie en fatigue augmente de plus d'un facteur 10 par rapport à celle obtenue pour un niveau de chargement de 40% de la contrainte à rupture des éprouvettes, plus de fissures ont le temps de s'initier et de se propager avant la rupture finale du stratifié, quelle que soit la température.

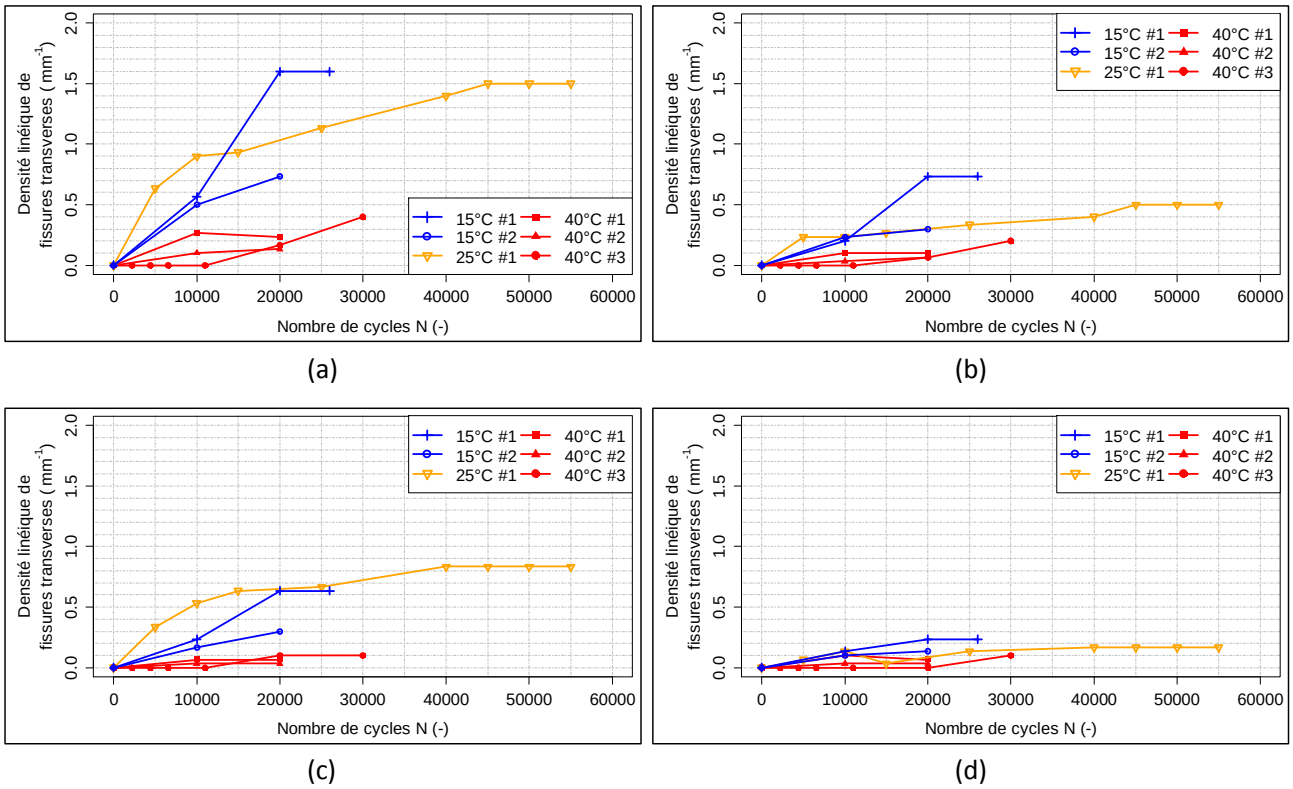

Fig. 6 : Densité linéique de fissures transverses (a) au total, (b) complètes dans les plis simples, (c) complètes dans le pli double et (d) partielles dans le pli double, en fonction de la température d'essai dans le cas d'éprouvettes $[(0/90)_2]_s$ testées en fatigue à $R = 0.1$ et à un niveau de chargement $\sigma_{max} = 40\%\sigma_{rupt}$

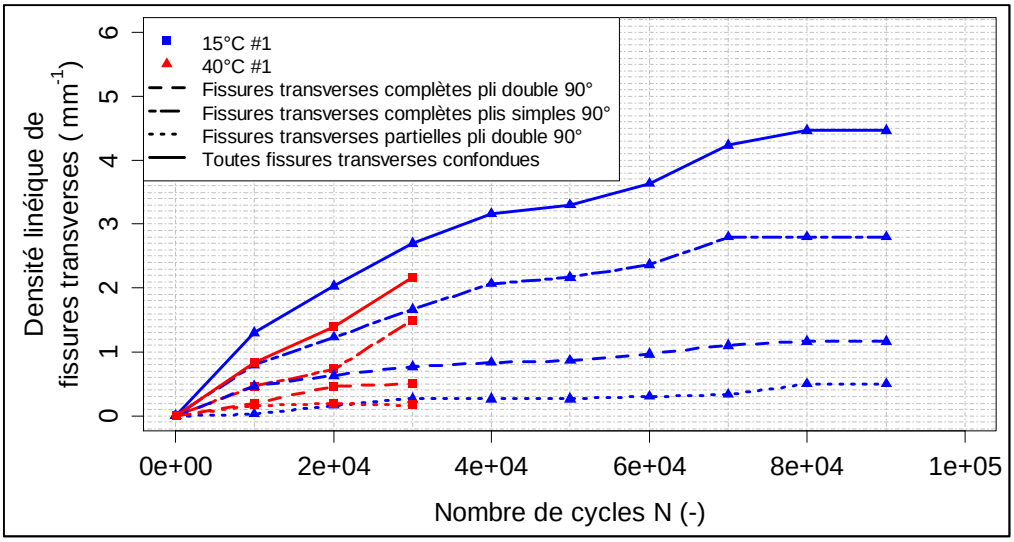

Fig. 7 : Densité de fissures transverses en fonction de la température d'essai dans le cas d'éprouvettes $[(0/90)_2]_s$, dans le cas $\sigma_{max} = 30\%\sigma_{rupt}$

5 Conclusion

L'influence de la température sur le scénario d'endommagement en traction quasi-statique et en fatigue d'un composite stratifié à matrice thermoplastique acrylique renforcé de fibres de verre a été étudiée dans un intervalle de température sélectionné dans la plage de service des pales d'éoliennes, à savoir entre 10 et 40°C.

Dans le cas des essais de traction quasi-statique sur des éprouvettes de résine pure (i.e. matrice non renforcée), les observations effectuées au MEB d'une partie de la zone utile éloignée de 40mm de la zone de rupture ont montré qu'à 40°C, les fissures sont plus courtes et plus nombreuses qu'à 15°C, et que leur arrangement est plus diffus. Ceci peut s'expliquer par le fait que la matrice est plus fragile à 15°C, ce qui facilite la propagation des micro-fissures. L'accumulation et le caractère diffus des endommagements avant la rupture sont ainsi plus importants avec l'augmentation de la température et donc de la ductilité de la matrice.

Pour le composite, l'observation des endommagements sur une tranche des éprouvettes au microscope optique a été effectuée sous charge, de manière à rendre les endommagements plus visibles. Les essais de traction ont été réalisés à 10 et 40°C, tandis que les essais de fatigue ont été réalisés à 15, 25 et 40°C. Ils ont mis en évidence une augmentation du seuil de déformation correspondant à l'initiation de la première fissure transverse avec l'augmentation de la température, au point que ce dernier devient supérieur à la déformation à rupture des éprouvettes dans le cas d'un chargement de traction quasi-statique. Dans le cas des essais de fatigue, la formation de fissures transverses est retardée. De ce fait, pour un même nombre de cycles (la durée de vie n'étant pas significativement impactée par la température), toutes les densités linéiques de fissures transverses sont plus faibles à 40°C qu'à 15 et 25°C. La présence de fissures transverses à 40°C s'explique par le fait qu'un chargement de fatigue se fait de manière répétitive et favorise donc l'initiation et la propagation des fissures au cours de la sollicitation. L'augmentation du seuil d'initiation de la première fissure transverse est directement liée à l'augmentation de la ductilité la matrice avec l'augmentation de la température.

Ces résultats montrent donc une influence significative de la température sur le scénario d'endommagement du composite étudié du fait de la nature de sa matrice.

Remerciements

Les auteurs remercient la région Nouvelle Aquitaine, l'ADEME et les partenaires du projet EFFIWIND pour leur soutien.

Références

[1] D. Gay, Matériaux composites, Hermès, France, 1997.
[2] J.F. Mandell, R.M. Reed, D.D. Samborsky, Fatigue of fiberglass wind turbine blade materials, Sandia National Laboratories, USA, 1992.
[3] N. Revest, Comportement en fatigue de pièces épaisses en matériaux composites, PhD Thesis, Ecole nationale supérieure des Mines de Paris, 2011.
[4] E. Riande, R. Diaz-Calleja, M. Prolongo, R. Masegosa, C. Salom, Polymer Viscoelasticity: Stress and Strain in Practice, CRC Press, 1999.
[5] H. Aglan, Z. Qian, D. Mitra-Majumdar, The effect of temperature on the critical failure properties of advanced polymer composites, Polym. Test. 11 (1992) 169–184.
[6] D.A. Scala, In Engineering Materials Handbook : Composites, National Handbook Committee, American Society of Materials International, USA, 1987.
[7] E.H. Andrews, Fracture Mechanics of Polymers, Oliver and Boyd, UK, 1968.
[8] J. Montesano, Z. Fawaz, C. Poon, K. Behdinan, A microscopic investigation of failure mechanisms in a triaxially braided polyimide composite at room and elevated temperatures, Mater. Des. 53 (2014) 1026–1036. doi:10.1016/j.matdes.2013.08.003.
[9] J. Montesano, Fatigue damage characterization of braided and woven fiber reinforced polymer matrix composites at room and elevated temperatures, Department of Aerospace Engineering, Ryerson University, 2012.
[10] S. Sethi, D.K. Rathore, B.C. Ray, Effects of temperature and loading speed on interface-dominated strength in fibre/polymer composites: An evaluation for in-situ environment, Mater. Des. 65 (2015) 617–626. doi:10.1016/j.matdes.2014.09.053.
[11] A. El Mourid, R. Ganesan, M. Brochu, M. Lévesque, Effect of temperature on the failure modes of a triaxially braided polymer matrix composite, Int. J. Solids Struct. 97–98 (2016) 1–15. doi:10.1016/j.ijsolstr.2016.08.005.

[12] K. Vallons, The behaviour of carbon fibre - epoxy NCF composites under various mechanical loading conditions, PhD Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, 2009.
[13] M.N. Bureau, J. Denault, Fatigue resistance of continuous glass fiber/polypropylene composites: Temperature dependence, Polym. Compos. 25 (2004) 622–629. doi:10.1002/pc.20057.
[14] L.A.L. Franco, M.L.A. Graça, F.S. Silva, Fractography analysis and fatigue of thermoplastic composite laminates at different environmental conditions, Mater. Sci. Eng. A. 488 (2008) 505–513. doi:10.1016/j.msea.2007.11.053.
[15] M.-H.R. Jen, Y.-C. Tseng, H.-K. Kung, J.C. Huang, Fatigue response of APC-2 composite laminates at elevated temperatures, Compos. Part B Eng. 39 (2008) 1142–1146. doi:10.1016/j.compositesb.2008.03.005.
[16] L. Cormier, Temperature effects on the static, dynamic, and fatigue behaviour of composites materials used in wind turbine blades, Thèse, Ecole de Technologie Supérieure Université du Québec, 2017.
[17] Z. Sun, I.M. Daniel, J.J. Luo, Modeling of fatigue damage in a polymer matrix composite, Mater. Sci. Eng. A. 361 (2003) 302–311. doi:10.1016/S0921-5093(03)00556-2.
[18] ASTM D638-14, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2014. www.astm.org.
[19] C. Huchette, Sur la complémentarité des approches expérimentales et numériques pour la modélisation des mécanismes d'endommagement des composites stratifiés, Université Paris VI, 2005.
[20] H. Laeuffer, C. Bois, J.-C. Wahl, N. Perry, F. Lavelle, Damage and permeability of composite laminates, in: 20th Int. Conf. Compos. Mater., Copenhagen, Denmark, 2015.
[21] C. Bois, J.-C. Malenfant, J.-C. Wahl, M. Danis, A multiscale damage and crack opening model for the prediction of flow path in laminated composite, Compos. Sci. Technol. 97 (2014) 81–89. doi:10.1016/j.compscitech.2014.04.002.