

# **Approche intégrée pour estimer la durée de vie en fatigue de pièces injectées en thermoplastique renforcé à haute température**

**N. Fouchier<sup>a</sup>, C. Nadot-Martin<sup>a</sup>, S. Castagnet<sup>a</sup>, A. Bernasconi<sup>b</sup>, E. Conrado<sup>b</sup>  
I. Maillet-Lestrade<sup>c</sup>**

a. Institut Pprime, Département Physique et Mécanique des Matériaux, ISAE-ENSMA,  
Poitiers

b. Institut Polytechnique de Milan, Département de Mécanique, Milan

c. Direction Générale de l'Armement, Toulouse

[nathan.fouchier@ensma.fr](mailto:nathan.fouchier@ensma.fr), [carole.nadot@ensma.fr](mailto:carole.nadot@ensma.fr), [sylvie.castagnet@ensma.fr](mailto:sylvie.castagnet@ensma.fr),  
[andrea.bernasconi@polimi.it](mailto:andrea.bernasconi@polimi.it), [edoardo.conrado@polimi.it](mailto:edoardo.conrado@polimi.it)  
[irene.maillet@intradef.gouv.fr](mailto:irene.maillet@intradef.gouv.fr)

## **Résumé**

*Dans un cadre industriel, la conception de pièces injectées en thermoplastique renforcé de fibres de verre courtes pour une utilisation proche des parties chaudes nécessite un modèle de dimensionnement en fatigue simple, rapide et efficace. La spécificité de ce type de matériau réside dans sa microstructure particulière (orientation des fibres) conditionnée par le procédé d'injection. La prise en compte de cette microstructure s'avère indispensable pour le dimensionnement en fatigue des pièces injectées. L'étude ici présentée est centrée autour de la mise en place d'une démarche intégrée depuis la simulation du procédé d'injection jusqu'à l'estimation de la durée de vie en fatigue à haute température (110°C). Le matériau support de l'étude est un PA66GF30.*

*La fiabilité des simulations d'injection, conditionnant la qualité de prédiction de la durée de vie, et leurs limites sont tout d'abord étudiées. Puis, des essais de fatigue à haute température, pour différents rapports de charge, sur des éprouvettes découpées dans des plaques injectées selon différentes orientations par rapport à la direction d'injection, sont réalisés. Ils ont pour but de construire une base de données expérimentale pour pouvoir identifier et valider la démarche de dimensionnement proposée. Enfin, le déroulement de la démarche en élasticité confirme la nécessité de la prise en compte du comportement visqueux de la matrice à haute température. Le développement de cette dernière partie est en cours.*

**Mots clés :** Fatigue, thermoplastique renforcé de fibres de verre courtes, durée de vie, homogénéisation

## 1. Introduction

Les pièces injectées en thermoplastique renforcé de fibres de verre courtes sont de plus en plus utilisées dans le secteur des transports (automobile notamment) pour des applications à haute température. Leur utilisation constitue un facteur d'allègement des structures proches des parties chaudes. Les thermoplastiques renforcés sont par ailleurs particulièrement intéressants de par leurs performances mécaniques et leur facilité de fabrication. Dans ce contexte, l'estimation de la durée de vie en fatigue à haute température des pièces injectées à l'aide d'un modèle simple, rapide et efficace représenterait un véritable avantage pour optimiser leur design, en permettant notamment une réduction du nombre d'essais d'endurance en phase prototype.

La démarche ici retenue à cet effet est la méthode qualifiée « Through Process Modeling » (TPM) telle que développée par Klimkeit et al [1]. La prise en compte de l'hétérogénéité d'orientation locale, due au procédé d'injection, en amont de la chaîne de calcul permettant d'évaluer la durée de vie en fatigue de la pièce étudiée marque la particularité de cette méthode totalement intégrée. Les étapes de la TPM sont les suivantes. A partir de la connaissance du tenseur d'orientation obtenu par simulation du procédé d'injection (Moldflow®), les propriétés effectives anisotropes locales au sein de la pièce sont estimées par homogénéisation (Digimat®). Une simulation Eléments Finis (EF) sous Abaqus®, pour un type/niveau de chargement donné, fournit les champs mécaniques hétérogènes associés. Les champs sont post-traités pour extraire la grandeur mécanique équivalente en entrée d'un critère de fatigue fournissant finalement la durée de vie de la pièce pour ce type/niveau de chargement. Cette approche a été validée à température ambiante sur une large base de données expérimentale impliquant deux matériaux différents, plusieurs types d'éprouvettes (injectées ou prélevées dans des plaques pour différentes orientations par rapport à la direction d'injection), divers chargements de fatigue (traction, torsion, cisaillement, traction-torsion combinées) et deux rapports de charge [1].

Le présent travail constitue une contribution vers la généralisation de la TPM à haute température (110°C). Le matériau support pour cette généralisation est le PA66-GF30 fourni sous forme de plaques injectées. Trois aspects majeurs sont étudiés :

- la fiabilité de la simulation du procédé d'injection, la qualité de prédiction de l'orientation des fibres représentant un enjeu particulièrement décisif pour garantir une bonne prédiction de la durée de vie ;
- la mise en place d'une base de données expérimentale en fatigue à 110°C nécessaire à l'identification et à la validation de la méthodologie, concernant ici des éprouvettes découpées dans des plaques pour différentes orientations par rapport à la direction d'injection ;
- le déroulement de la TPM en elle-même et ses extensions nécessaires à 110°C.

## 2. Simulation d'injection

En amont de la chaîne de calcul, la précision de la cartographie d'orientation des fibres conditionne la qualité de prédiction de durée de vie. L'hétérogénéité de l'orientation, induite par l'injection, dans l'épaisseur mais aussi dans le plan d'une pièce injectée doit être correctement décrite.

La qualité des simulations d'injection des plaques dans lesquelles les éprouvettes ont été découpées a été ainsi étudiée. Le modèle Moldflow® considéré est un modèle coque avec un seul élément dans l'épaisseur de la plaque. Le tenseur d'orientation est défini pour chaque élément en chacune de ses 21 couches.

Une étude de convergence menée pour deux épaisseurs de plaque (3,2 et 6,4 mm) montre qu'il existe une taille de maille minimale, d'environ un tiers de l'épaisseur, en dessous de laquelle les résultats semblent diverger et ne sont plus cohérents.

Le calibrage des paramètres de fermeture a été réalisé de sorte à garantir une prédiction fiable dans la zone de découpe des éprouvettes. Ce calibrage a été effectué par comparaison des résultats de simulation à des observations en coupe réalisées par P. Hine, collaborateur de l'université de Leeds en Angleterre. Il a été montré que le jeu de paramètres optimisés sur la zone de découpe des éprouvettes ne garantit pas la fiabilité des résultats sur le reste de la plaque (difficulté de prédire correctement la couche de cœur en termes d'épaisseur et de valeur du tenseur d'orientation).

### 3. Construction de la base de données expérimentale

Afin de pouvoir identifier et évaluer le modèle de prédiction de durée de vie proposé, une base de données expérimentale est indispensable. Des essais de fatigue en traction ont donc été conduits à 110°C, à une fréquence de 2Hz pour des rapports de charge de  $R=0,1$  et  $R=-1$ . Les éprouvettes ont été découpées dans des plaques à 0°, 45° et 90° par rapport à la direction d'injection et conditionnées avant essais en atmosphère sèche.

Les essais de fatigue ont révélé un phénomène de thermo-oxydation remarquable à un changement de couleur des éprouvettes passant plus de 5 jours dans l'enceinte chauffée. Afin de s'assurer que ce phénomène n'entraînait pas de dégradation du matériau en cours d'essais, des essais monotones et cycliques ont été menés sur des éprouvettes vieillies à l'air et dans le vide pendant 6 jours. Les résultats montrent que la thermo-oxydation ne semble pas avoir d'impact de premier ordre sur les propriétés mécaniques monotones et cycliques du matériau.

## 4. TPM

### 4.1 Déroulement en élasticité

Dans un premier temps, la démarche de Klimkeit et al. [1], efficace à température ambiante, a été intégralement reconduite afin d'évaluer son efficacité à 110°C. Les analyses EF ont ainsi été menées en élasticité mais en utilisant ici les propriétés de la matrice à 110°C. Les champs mécaniques hétérogènes obtenus pour chaque type/niveau de chargement ont été post-traités pour extraire la grandeur mécanique équivalente (énergie élastique) nécessaire au critère de Kujawski et Ellyin [2] :

$$fW = KN^\alpha \quad (1)$$

- $f$  : coefficient de correction de l'effet de contrainte moyenne
- $K, \alpha$  : paramètres matériau

Les paramètres du critère ont été identifiés en déroulant la TPM sur les éprouvettes à 0° pour un rapport de charge de  $R=-1$ . Les résultats de la TPM sur le reste de la base de données attestent que la version élastique de la TPM (analyse EF et critère en énergie élastique) ne permet pas de prédire correctement la durée de vie en fatigue du matériau à 110°C.

#### 2.3.1 Extension en viscoélasticité

La prise en compte du comportement visqueux de la matrice PA66 s'avère l'extension minimale à envisager pour améliorer la capacité prédictive de la TPM à haute température. Cela s'accompagne de trois enjeux majeurs :

- Définition et identification d'une loi viscoélastique pour la matrice PA66. Le modèle d'homogénéisation en viscoélasticité linéaire de Digimat® [3] oriente le choix vers une

description en série de Prony. L'identification des paramètres est réalisée grâce à des essais sur matrice pure suite à des limites constatées du module de Reverse Engineering ;

- Définition et simulation d'un cycle stabilisé avant de rentrer dans le critère de fatigue ;
- Utilisation d'un critère de fatigue en énergie dissipée tel que celui de Jégou et al. [4] :

$$\Delta^* N^b = C \quad (2)$$

- $\Delta^*$  : énergie dissipée
- $b, C$  : paramètres matériau

Les travaux constituant cette partie sont en cours de développement ce qui ne permet pas actuellement de connaître précisément l'apport de la viscoélasticité par rapport au modèle élastique.

## 5. Conclusion

Les travaux présentés constituent une contribution vers la généralisation à 110°C de la TPM, méthode intégrée depuis la simulation du procédé d'injection jusqu'à l'estimation de la durée de vie en fatigue de matériaux thermoplastique renforcé de fibre de verre courtes [1].

La qualité de la prédiction de la microstructure anisotrope due au procédé d'injection a pu être optimisée de sorte à retrouver les cartographies d'orientation expérimentales dans la zone de découpe des éprouvettes. L'étude a cependant révélé la difficulté de prédire correctement les orientations sur l'ensemble de la plaque injectée avec un même jeu de paramètres.

Les courbes S-N à 110°C des éprouvettes découpées à 0°, 45° et 90° par rapport à la direction d'injection ont été produites pour deux rapports de charge ( $R=0,1$  et  $R=-1$ ). Elles constituent une base de données suffisante pour l'identification et une première évaluation de l'approche de dimensionnement. Une étude complémentaire a permis de s'assurer que la thermo-oxydation apparente du matériau n'avait pas d'impact significatif sur les propriétés monotones et cycliques du matériau.

Comme attendu, la version élastique de la TPM (analyse EF et critère en énergie élastique) ne permet pas de prédire correctement la durée de vie en fatigue du composite à 110°C. Les résultats fournissent néanmoins un socle de comparaison qui permettra de quantifier l'apport du passage en viscoélasticité. La généralisation en viscoélasticité de la TPM est adossée au choix et à l'identification d'une loi viscoélastique pour le PA66 adaptée au module d'homogénéisation interne à Digimat® et à la définition/simulation d'un cycle stabilisé avant de rentrer dans un critère en énergie dissipée [4].

## Remerciements

Ces travaux sont réalisés grâce au financement de la Direction Générale de l'Armement et de la région Poitou-Charentes que les auteurs remercient pour leur contribution.

## Références

- [1] B. Klimkeit et al., Multiaxial fatigue life assessment for reinforced polymers, Int. J Fatigue 33, 2011
- [2] Kujawski D., Ellyin F., A unified approach to mean stress effect on fatigue threshold conditions, Int J Fatigue 17, 1995
- [3] I. Doghri et al., Mean-field homogenization of elasto-viscoplastic composites based on a general incrementally affine linearization method, Int. J Plasticity 26, 2010
- [4] L. Jégou et al., Fast prediction of the Wöhler curve from heat build-up measurements on short fiber reinforced plastic, Int. J Fatigue 47, 2013