



HAL
open science

Caractérisation expérimentale et modélisation numérique des matériaux polymères chargés en fibres de verre pour la vibroacoustique

Mehdi Zerrad, Nicolas Totaro, R.G. Rinaldi, Benjamin Eller

► To cite this version:

Mehdi Zerrad, Nicolas Totaro, R.G. Rinaldi, Benjamin Eller. Caractérisation expérimentale et modélisation numérique des matériaux polymères chargés en fibres de verre pour la vibroacoustique . Congrès français d'acoustique 2016, Apr 2016, Le Mans, France. hal-01468621

HAL Id: hal-01468621

<https://hal.science/hal-01468621>

Submitted on 21 Feb 2017

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.

**Caractérisation expérimentale et modélisation numérique
des matériaux polymères chargés de fibres de verre pour
la vibro-acoustique**

M. Zerrad^a, N. Totaro^a, R. Rinaldi^b et B. Eller^c

^aLVA, INSA-Lyon, 25 bis Avenue Jean Capelle, 69621 Villeurbanne, France

^bMATEIS- Insa Lyon, Bât. B. Pascal, 5^e étage - 7, avenue Jean Capelle, 69621
Villeurbanne, France

^cRenault, 1 Allée Cornuel, 91510 Lardy, France
mehdi.zerrad@insa-lyon.fr



Dans le but de concevoir des véhicules moins polluants, les constructeurs automobiles se sont orientés entre autres vers l'allègement des structures. En effet, l'une des solutions préconisée par les ingénieurs NVH (Noise, Vibration and Harshness) est le remplacement des matériaux métalliques de certaines pièces véhicules ou moteur par des matériaux composites à matrice polymère de densités moindres. De manière générale, les simulations numériques classiques qui permettent d'évaluer les performances vibratoires et acoustiques de ces matériaux ne se montrent pas suffisamment efficaces et robustes notamment pour les corrélations calcul/essai. Le recours aux matériaux polymères implique en effet que de nombreux paramètres influent sur le comportement vibroacoustique des systèmes. Dans l'étude présentée ici, focalisée sur un carter d'huile en PA6 renforcé en fibres de verre courtes, il sera notamment démontré que le module d'Young du composite dépend non seulement de la température et de la fréquence mais aussi du taux d'humidité, de l'orientation et de la distribution des fibres de verre, toutes deux étant fortement dépendantes du procédé et la géométrie de la pièce étudiée. En conséquence le matériau constitutif est anisotrope et potentiellement spatialement hétérogène. Ainsi, des caractérisations fines des propriétés viscoélastiques et de la microstructure ont été réalisées à l'aide d'essais de spectrométrie mécanique et de mesures de tomographie aux rayons X respectivement. Concernant la réponse de la structure « carter », des études sur le comportement vibratoire ont été réalisées expérimentalement (analyse modale) et numériquement (modélisation éléments finis) en prenant en compte un module d'Young déterminé en fonction de la température et de l'hygrométrie ambiantes. Les comparaisons du comportement global de la structure mettent en évidence les particularités de l'utilisation de matériaux polymères dans des applications industrielles réelles, ainsi que les précautions à prendre.

1 Introduction

Afin de concevoir des véhicules moins polluants, une solution privilégiée par les constructeurs automobiles consiste à les alléger. Ainsi, le remplacement dans les pièces structurales des matériaux conventionnels métalliques par des matériaux composites plus légers tels que les polymères renforcés en fibres courtes est régulièrement entrepris.

Toutefois, le recours à ces matériaux met les ingénieurs NVH (Noise, Vibration and Harshness) face au défi de maîtriser leurs modélisations numériques vibratoires et acoustiques en intégrant les particularités de ces matériaux complexes. En effet, les performances mécaniques de ces matériaux renforcés, qui dans le cadre de ce travail se limitent à leur module complexe, dépendent des propriétés intrinsèques des constituants, de leur fractions volumiques respectives et de divers paramètres microstructuraux qui intègrent leur facteur de forme, la dispersion et l'agencement des charges renforçantes [1]. Ainsi, le module d'Young et dans une moindre mesure le facteur de perte (amortissement) du Polyamide 6 chargé à 35% en masse en fibres de verres courtes à l'étude ici et noté PA6GF35 par la suite, dépendent de la température [2], la fréquence [3], l'humidité [2], ainsi que de la distribution des longueurs et diamètres des fibres [4, 5], de leurs fractions volumiques [2] et de leurs orientations [6]. Tout naturellement, la réponse vibratoire se caractérise à l'échelle d'une pièce structurale, et la complexité de cette dernière peut amener à envisager des hétérogénéités spatiales d'orientation / concentration / taille de fibres, avec une conséquence directe sur les propriétés locales du matériau renforcé, et potentiellement sur les réponses vibratoires et acoustique de la pièce entière.

Aussi, notre étude portera sur la caractérisation des différents paramètres microstructuraux du PA6-GF35 et la compréhension de leurs impacts sur le comportement vibratoire macroscopique d'une pièce moteur automobile : un carter d'huile. On présentera les effets de la fréquence, de la température, de l'humidité et de la sollicitation imposée relativement à l'orientation des fibres sur le module complexe du matériau constitutif. Par la suite nous nous pencherons sur la corrélation calcul/essai de ce carter d'huile sur une plage de fréquence de 0 Hz à 2000 Hz en

effectuant une analyse modale expérimentale et numérique. La simulation numérique se limitera dans le cadre de cet exposé à un modèle de comportement simpliste du matériau. Ainsi, un module d'Young unique et indépendant de la fréquence sera considéré, tel que cela serait le cas pour un matériau homogène isotrope. L'analyse modale expérimentale démontre qu'un tel modèle ne peut être considéré valable qu'en basse fréquence. A plus long terme, le but de ce travail consiste à évaluer le degré de précision nécessaire (intrinsèque et spatial) à implémenter dans la loi de comportement pour proposer une confrontation calculs/essais convaincante. A ce titre, il est à noter que la simulation du procédé peut être utilisée à titre prédictif pour rendre compte des hétérogénéités spatiales [7].

2 Mesures expérimentales

2.1 Système à l'étude : Carter d'huile en PA6GF35

Le carter d'huile, illustré dans la figure 1, est une pièce en PA6-GF35 moulée par injection, contenant un « bâti primaire », que l'on associe à la forme générale de la pièce, et des nervures dont le but est de rigidifier la structure.

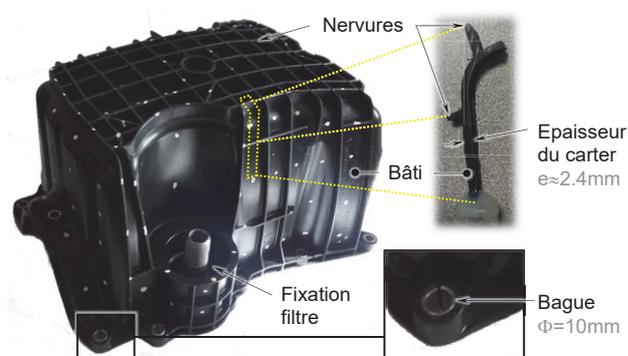


Figure 1 : Carter d'huile en PA6GF35. L'insert en bas à droite illustre les bagues métalliques montées serrées. L'insert en haut à droite permet de visualiser une vue en coupe du « bâti primaire » et de nervures à partir d'un élément découpé du carter.

La figure 1 montre que le carter contient également un tube en métal qui permet la fixation du filtre à huile par filetage et des bagues métalliques insérées dans les dix trous d'assemblage du carter d'huile avec le carter cylindre. Au total la structure pèse 1005 g.

2.2 Caractérisation microstructurale du PA6GF35

La tomographie aux rayons X est une technique d'imagerie 3D non destructive qui permet d'observer la microstructure d'un matériau à l'échelle du micron.

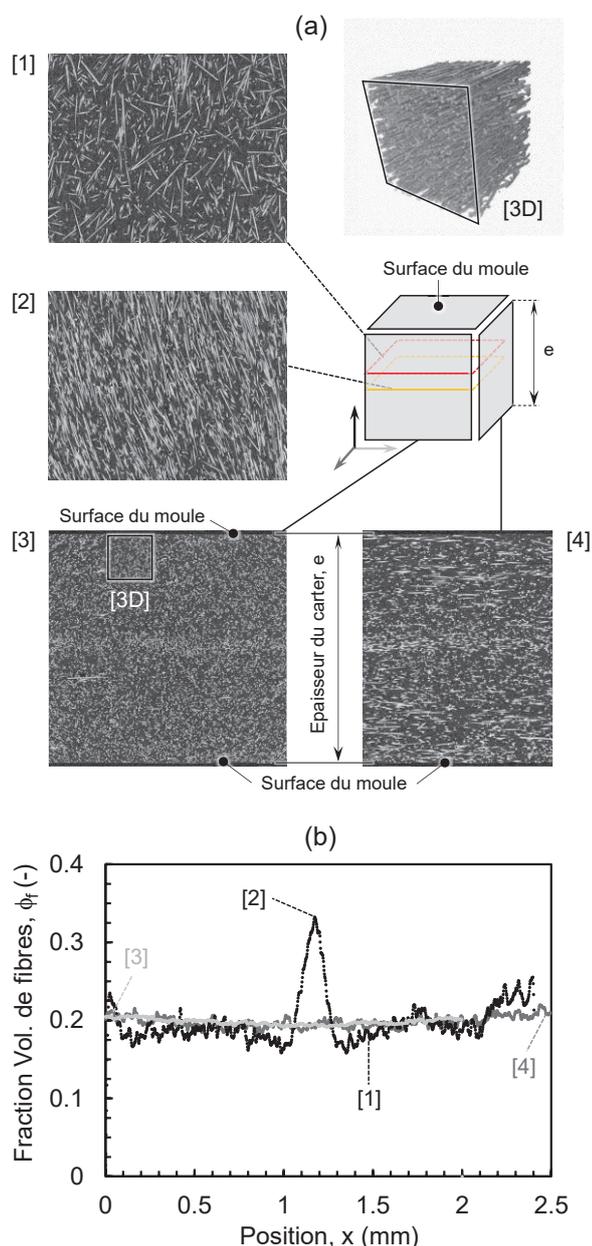


Figure 2 : (a) Images de tomographie aux rayons X d'une éprouvette de PA6GF35 découpée sur le carter d'huile ainsi qu'une reconstruction 3D des fibres de verre d'un volume proche de la surface du moule de dimension $500 \times 500 \times 500 \mu\text{m}^3$ (taille de Voxel = $8 \mu\text{m}^3$). (b) Fraction volumique des fibres de verre suivant les trois directions principales du volume scanné. N.B. Les niveaux de gris coïncident avec le système d'axe de (a).

L'échantillon est positionné entre la source et le détecteur si bien que les niveaux de gris d'une image 2D

reconstruite rendent compte des différences d'absorption des rayons X. De fait, dans le cas du PA6-GF35, cet outil est particulièrement adapté pour dissocier la matrice des fibres et ainsi étudier les propriétés géométriques de ces dernières. Ici, un volume de matière supérieur à $2.5 \times 2.5 \times 2.5 \text{mm}^3$ et localisé dans le bâti primaire a été imagé à une résolution de 2 microns. La figure 2a présente une série d'images illustrant les tailles, les orientations et la dispersion des fibres au sein de ce volume limité de matière. Il est à noter que les plans 3 & 4 représentent des coupes dans l'épaisseur totale du carter. Les images 1 et 2 de la figure 2a, qui correspondent à des plans parallèles à la surface du moule, permettent de constater qu'en s'approchant des surfaces libres (les surfaces en contact du moule pendant l'étape de mise en œuvre), les fibres sont orientées de manière relativement aléatoire dans le plan. Ces orientations de fibres sont typique des pièces moulées par injection, le moule favorisant le refroidissement et le figeage des fibres dans cet état plus désordonné [1]. Les images du plan 3 et 4 permettent d'observer une densité de fibres plus importante vers le centre de l'épaisseur, conséquence également du procédé d'injection [6]. Cette observation est également appuyée par les images 1 et 2, la densité de fibres étant nettement plus importante en 2 qui est le plan central localisé à $e/2$ dans l'épaisseur. Afin de quantifier le taux de fibres et ses variations, les images sont « seuillées » afin de séparer les pixels blancs des fibres des pixels noirs de la matrice et un algorithme FIJI© [8] utilisé pour calculer la fraction volumique correspondante. Aussi les images perpendiculaires aux trois directions principales du cube imagé sont traitées et les profils de fraction volumique sont obtenus en fonction de la position relative selon ces trois axes. Les résultats sont présentés dans la figure 2b. Les profils sont homogènes et uniformes selon les deux directions colinéaires au plan du moule. Par contre, la densité des fibres varie fortement en fonction de la position dans l'épaisseur, conformément aux observations qualitatives de la figure 2a. Sur le volume scanné, La fraction volumique de fibres moyenne s'élève à environ 0.2, une valeur en accord avec la fraction massique moyenne (35%).

La tomographie aux rayons x permet de reconstruire une image 3D de la structure du matériau. Celle-ci confirme que les fibres sont orientées selon une direction privilégiée : la direction du flux de matière lors de la mise en œuvre. A l'anisotropie provoquée par cette orientation privilégiée des fibres vient de plus s'ajouter une contribution imputable aux fluctuations de leur densité et orientation à l'échelle submillimétrique, essentiellement dans l'épaisseur du carter. Les conséquences sur les propriétés macroscopiques locales sont étudiées dans le paragraphe suivant.

2.3 Propriétés viscoélastiques du PA6GF35

La spectrométrie mécanique (DMA pour Dynamic Mechanical Analysis) permet de mesurer le module complexe E^* d'un échantillon pour des fréquences et des températures contrôlées. Une faible déformation sinusoïdale est imposée à l'échantillon et le signal de force, sinusoïdal lui aussi mais déphasé, est mesuré. De ces deux signaux, le module complexe E^* est réduit, donnant accès au module d'Young et facteur de perte du matériau :

$$E^* = E' + i E'' = E' (1 + i \tan \delta) \quad (1)$$

Avec E' le module de stockage (module d'Young et noté E par la suite), E'' le module de dissipation et $\tan \delta$ le facteur de perte.

Une première analyse DMA en flexion trois points a été réalisée sur une éprouvette de forme parallélépipédique de dimensions $2,3 \times 4,7 \times 20 \text{ mm}^3$ et de masse $m = 595,62 \text{ mg}$ sans traitement préalable et découpée dans le « bâti primaire » du carter d'huile. Cette analyse a été menée à trois fréquences 0,2 Hz, 1 Hz et 5 Hz sur une plage de température de 0°C à 150°C (La température de fonctionnement du moteur est de 110°C). Les résultats sont reportés dans la figure 3 où les évolutions du module d'Young et du facteur de perte en fonction de la température sont représentées pour les trois fréquences listées ci-dessus. Plus la température augmente et plus le module d'Young diminue, passant d'une valeur maximale de 9000 MPa à 0°C pour atteindre environ les 3000 MPa vers 150°C .

Le maximum de l'amortissement, souvent assimilé à la température de transition vitreuse T_g de la matrice de PA6, est localisé aux environs de 25°C , augmentant lorsque la fréquence de sollicitation augmente. La T_g ici mesurée est caractéristique d'un PA6 plastifié par l'eau [9].

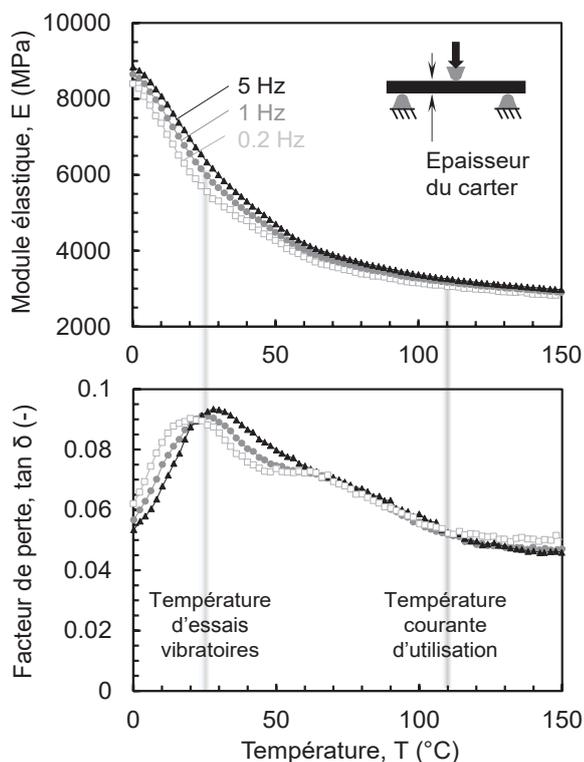


Figure 3 : Courbes du module d'Young et du facteur de perte en fonction de la température et de la fréquence obtenues par DMA d'une éprouvette de PA6GF35 découpée sur le carter d'huile.

Pour illustrer l'importance de la teneur en eau sur les performances mécaniques du PA6GF35 aux alentours de la température ambiante, la teneur en eau a été modifiée sur une même éprouvette et le module complexe mesuré. Les différents états d'hygrométrie sont obtenus par séchage (étuve sous vide) et immersion en bain d'eau. Le taux d'hygrométrie a été contrôlé en pesant l'éprouvette avant et après chaque essai (après pour confirmer que le taux d'hygrométrie n'avait pas varié au cours de l'essai).

La figure 4 présente l'évolution du module d'Young en fonction de l'hygrométrie entre 30°C et 70°C pour une fréquence de sollicitation de 1 Hz.

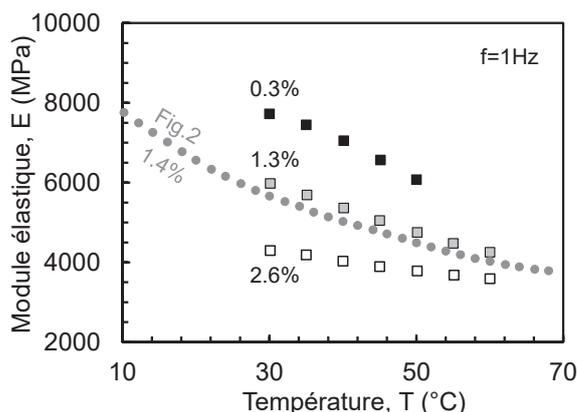


Figure 4 : Courbes du module d'Young mesuré en DMA en fonction du taux d'hygrométrie et de la température à 1 Hz.

Les niveaux d'hygrométrie correspondent aux valeurs en % (accotées aux différentes courbes) dans la figure 4. L'étude tracée illustre que le module d'Young diminue lorsque l'hygrométrie augmente, la valeur du module à 30°C passe de 8000 MPa pour le cas le plus sec ($0,3\%$ d'humidité) à 4200 MPa pour le cas le plus gorgé en eau ($2,6\%$ d'humidité), soit une diminution du module du composite d'un facteur deux par rapport à son état « sec ». Séché, la T_g de la matrice PA6 avoisine les 50°C . De fait, le module d'Young du PA6 séché et mesuré à température ambiante augmente fortement.

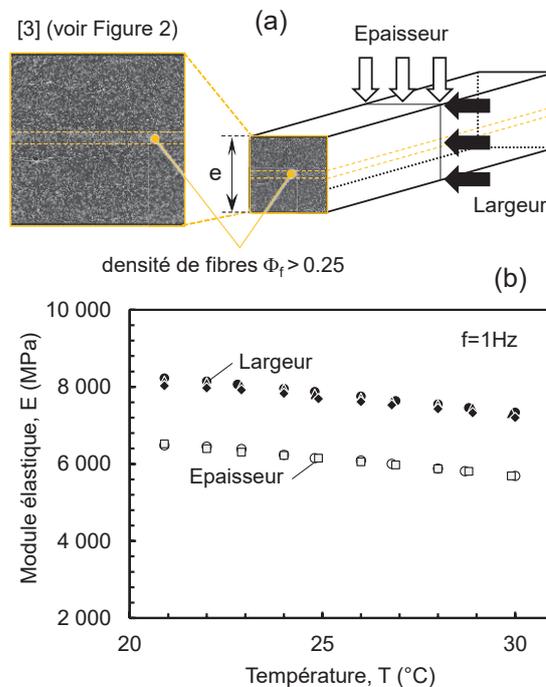


Figure 5 : (a) Essais de flexion 3-points, et illustration de l'agencement des fibres relativement à la sollicitation imposée. (b) Effet de l'orientation de l'éprouvette sur le Module d'Young mesuré en flexion 3-points en DMA au voisinage de la température ambiante. Plusieurs séries de mesure témoignent de la répétabilité des mesures.

Enfin, des essais ont été menés pour tester les hypothèses d'anisotropie mécanique suggérées par l'étude de la microstructure. Cette anisotropie est mise en évidence par DMA où un même échantillon a été testé en flexion 3-points selon deux directions privilégiées qui sont détaillées dans la figure 5a. La comparaison entre les modules d'Young mesurés au voisinage de la température ambiante suivant que l'éprouvette soit testée dans le plan (largeur) ou dans l'épaisseur du « bâti primaire » est présentée dans la figure 5b. Une différence d'environ 2000 MPa, soit une variation relative d'environ 30% est obtenue confirmant l'anisotropie du PA6GF35.

2.4 Analyse modale expérimentale du carter

L'analyse modale expérimentale a été réalisée sur un carter d'huile en PA6GF35 similaire en tout point à celui utilisé pour découper les éprouvettes destinées à la caractérisation matériau détaillée dans les sections précédentes.

Dans un premier temps un ensemble de points a été sélectionné sur le modèle du carter numérique à l'aide du logiciel ANSA. Ces points feront office de points d'impact pour les mesures. Après extraction des coordonnées de ces nœuds sur la CAO, le maillage de points nécessaire pour l'analyse modale expérimentale a été reconstitué avec le logiciel DeweFRF. La correspondance entre ces points sur les deux logiciels est illustrée sur la figure 6.

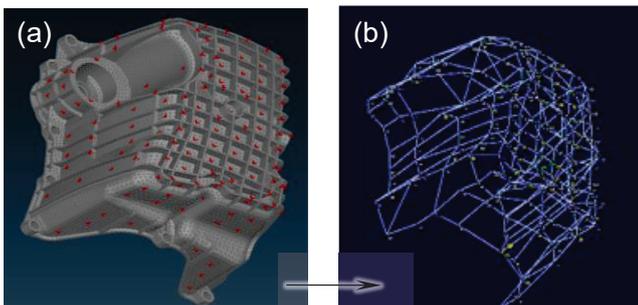


Figure 6 : (a) L'extraction d'un set de nœuds du modèle numérique avec ANSA. (b) Reconstruction du maillage de points de mesure avec le logiciel DeweFRF.

Les mesures des fonctions de transfert accélération / force ont été effectuées sur une plage de fréquences de 0 Hz à 2000 Hz, le carter étant suspendu par un lien élastique comme le montre la figure 7. Un accéléromètre a été fixé sur un point de mesure et un marteau de choc a été utilisé pour exciter le carter suivant les 182 points d'impact qui correspondent au nuage de points précédemment sélectionné et illustré dans la figure 6. Les mesures ont été menées à une température moyenne de 27°C et une hygrométrie relative moyenne de 34%. La masse du carter est de 1005 g comprenant la masse du tube (110g) et celle des inserts métalliques (38.6g).

Les mesures ont été post-traitées à l'aide du logiciel PULSE Reflex de B&K qui permet d'obtenir la moyenne des fonctions de transferts mesurées sur tous les points. L'algorithme d'analyse modale expérimentale du logiciel PULSE permet ensuite d'extraire la base modale expérimentale (fréquences propres et déformées propres du carter). 16 modes sont identifiés et détaillés dans le tableau 1.

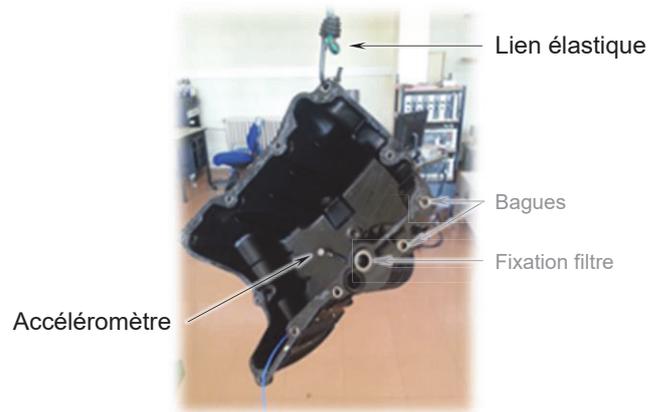


Figure 7: Conditionnement du carter d'huile pour les mesures vibratoires.

3 Analyse modale numérique

L'analyse modale numérique du carter d'huile plastique a été effectuée sur une plage de fréquences de 0 Hz à 2000 Hz. Le coefficient de poisson utilisé est de $\nu=0.33$ et la densité est de $\rho = 1400 \text{ kg/m}^3$. Le module d'Young est de $E=5550 \text{ MPa}$ et correspond au module obtenu par DMA dans les mêmes conditions de température et d'hygrométrie. Il est à noter qu'en l'état, l'étude numérique n'intègre pas les particularités de comportement identifiées précédemment, le propos de ce travail visant à identifier le niveau de raffinement nécessaire pour obtenir une bonne corrélation calculs /essais.

Le volume du carter a été maillé avec des éléments tétra paraboliques et 534717 degrés de liberté (maillage convergé). La figure 8 montre que le tube métallique et les inserts ont été modélisés avec des éléments de masse ponctuelle CONM2 avec des valeurs de masse respectivement 110 g pour le tube de fixation du filtre et 3,86 g pour chaque insert. Le calcul a été effectué en utilisant le code de calcul par éléments finis Nastran.

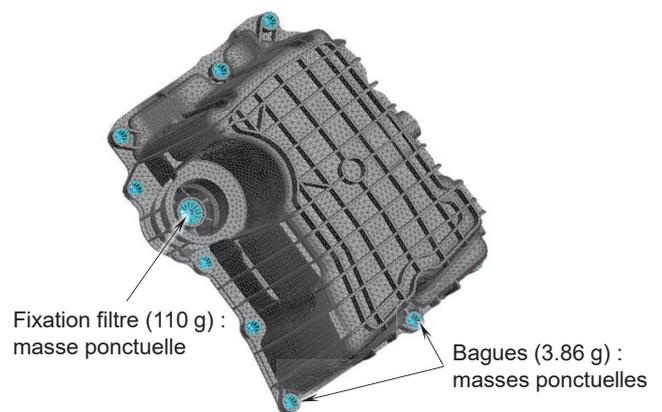


Figure 8 : Maillage du carter d'huile et utilisation des éléments CONM2 pour le tube et les inserts.

4 Résultats

La figure 9 présente la corrélation calcul/essai des fréquences propres du carter plastique en fonction de

l'ordre des modes. On constate que les courbes ont la même tendance jusqu'à environ 1500 Hz et les fréquences propres sont proches en général avec une erreur moyenne de 4% comme indiqué dans le tableau 1. Néanmoins, au-delà de 600 Hz très peu de modes expérimentaux ont pu être extraits de l'analyse modale expérimentale en grande partie à cause du fort amortissement du carter dans cette bande de fréquence. Toutefois, il est à noter que le module d'Young obtenu par mesure DMA a permis d'obtenir une prédiction numérique assez satisfaisante du comportement vibratoire du carter jusqu'à 600 Hz malgré le modèle simpliste du module d'Young imposé.

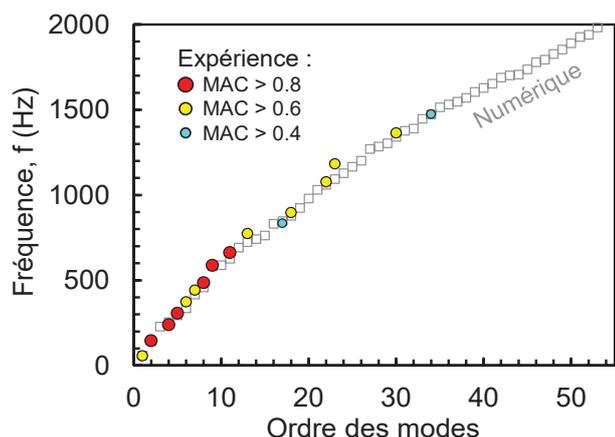


Figure 9 : Corrélation calcul/essai des fréquences propres du carter d'huile. Les couleurs et la taille des symboles « o » indique la valeur du critère MAC.

Le tableau 1 indique les valeurs de l'indice MAC (Modal Assurance Criterion) qui permet d'évaluer la corrélation calcul/essai des déformées modales. Une valeur de MAC de 1 indique une parfaite corrélation entre déformée modale expérimentale et déformée modale numérique. Inversement, une valeur de 0 indique une corrélation inexistante. Il est communément admis que l'on peut considérer la corrélation calcul/mesure comme satisfaisante pour un indice MAC au-dessus de 0.8. Ainsi, le tableau 1 démontre que le modèle a permis d'obtenir une bonne corrélation calcul/essai en déformées uniquement pour 6 modes sur les 16 obtenus par l'analyse modale expérimentale. On observe également qu'à partir de 600 Hz et jusqu'à 1500 Hz les déformées modales sont pour la plupart non détectées ou moins bien corrélées, ce qui montre que l'analyse modale expérimentale ne permet pas, en l'état, de conclure sur la représentativité d'un modèle numérique avec module d'Young simpliste par rapport à la réalité du comportement du matériau. Il sera donc nécessaire de compléter cette étude expérimentale par des simulations de réponses en fréquence à plus haute fréquence et en parallèle, de raffiner encore le modèle afin d'approcher au plus la réalité en considérant notamment l'effet de la fréquence, et de l'anisotropie du module d'Young [10]. La prise en compte de l'amortissement dans la simulation est également à considérer [11].

Tableau 1 : Valeurs des fréquences propres mesurées et calculées, des erreurs relatives et de l'indice MAC.

Calcul (Hz)	Mesure (Hz)	Erreur (%)	Indice MAC (%)
58,5	56,5	3,6	76,1
142,5	145,9	2,4	97,5
253,5	239,6	5,8	85,3
294,1	306,7	4,1	87,5
336,0	373,7	10,1	58
416,6	442,5	5,8	75,6
457,5	486,2	5,9	87
581,7	587,3	1,0	84
626,3	662,8	5,5	91,8
722,9	773,6	6,6	56,2
846,5	834,7	1,4	42,2
877,5	897,6	2,3	68,2
1059,6	1077,6	1,7	78,4
1093,3	1183,0	7,6	57
1340,7	1364,3	1,7	71,2
1472,9	1474,2	0,1	42,5

5 Conclusion

Dans cette étude le matériau PA6-GF35 a été caractérisé, ce qui a permis de comprendre certains de ses comportements notamment la forte influence de l'hygrométrie sur son module d'Young ainsi que sa structure « multicouche » induite par le module d'Young hétérogène suivant la géométrie et plus spécifiquement suivant l'épaisseur (conséquence des charges renforçantes).

D'autre part, le module d'Young obtenu par DMA a été utilisé comme donnée d'entrée dans un calcul d'analyse modale numérique et a permis de réaliser une comparaison entre le calcul et les mesures d'analyse modale expérimentale. Il a été ainsi constaté que la corrélation calcul/essai en fréquences propres et en déformées modales est assez satisfaisante jusqu'à une fréquence de 600 Hz mais au-delà le faible nombre de modes détectés par l'analyse modale expérimentale ne permet pas d'observer le comportement vibratoire du carter entre 600 Hz et 2000 Hz. Des mesures de réponse en fréquence sont à réaliser pour statuer sur la corrélation calcul/essai en moyennes fréquences. La prise en compte de l'orientation des fibres dans le matériau est également à considérer pour modéliser

de manière plus pertinente le module d'Young, et son caractère anisotrope.

Remerciements

Ce travail a été réalisé au sein du Labex CeLyA de l'Université de Lyon, géré par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR-10-LABX-0060/ ANR-11-IDEX-0007).

Références

- [1] A. Bernasconi, D. Rossin, C. Armani. Analysis of the effect of mechanical recycling upon tensile strength of a short glass fibre reinforced polyamide 6,6. *Engineering Fracture Mechanics* 74 (2007): 627-641.
- [2] Crupi, V., Guglielmino, E., Risitano, G., & Tavilla, F. (2013, June). Application of Digital Image Correlation for the effect of glass fibres on the strength and strain to failure of polyamide plastics. In convegno IGF XXII Roma 2013.
- [3] Steffens, I. C., & Atzler, D. I. M. Method for Simulating the NVH Behavior of Plastic Materials.
- [4] Bernasconi, A., & Cosmi, F. (2011). Analysis of the dependence of the tensile behaviour of a short fibre reinforced polyamide upon fibre volume fraction, length and orientation. *Procedia engineering*, 10, 2129-2134.
- [5] Bernasconi, A., Cosmi, F., & Dreossi, D. (2008). Local anisotropy analysis of injection moulded fibre reinforced polymer composites. *Composites Science and Technology*, 68(12), 2574-2581.
- [6] Horst, J. J. (1997). Influence of fibre orientation on fatigue of short glassfibre reinforced Polyamide. TU Delft, Delft University of Technology.
- [7] Castagnet, S., Nadot-Martin, C., Bernasconi, A., Lainé, E., Conrado, E., & Caton-Rose, P. Through process modeling for the fatigue life assessment of notched injection-molded specimens. In *Proceedings of ECCM16-16th European Conference on Composite Materials*.
- [8] <http://fiji.sc/>.
- [9] Kohan, M. I. (Ed.). (1995). *Nylon plastics handbook* (Vol. 378). New York: Hanser.
- [10] Risitano, G., Corallo, D., Sellani, F. L., Davitti, A., & Bellato, N. (2012, March). Analisi numerica-sperimentale dell'influenza delle caratteristiche elastiche dei materiali compositi sulle proprietà di vibrare. In *Workshop IGF: Problematiche Di Frattura Ed Integrità Strutturale Di Materiali E Componenti Ingegneristici, Forni Di Sopra (UD), 1-3 Marzo 2012* (p. 120). Gruppo Italiano Frattura.
- [11] Calmels S., Lesueur M., & Cheruet A. (2015). Anisotropic Damping Behavior of Reinforced Plastic Parts for NVH Simulations. In *SPE Automotive Composites Conference & Exhibition*.