

# Identification des propriétés effectives d'élasticité d'un polymère obtenu par fabrication additive SLS à partir d'une modélisation du volume élémentaire représentatif

**B. HADDAG<sup>a\*</sup>, I. BENCHIKH<sup>a</sup>, M. NOUARI<sup>a</sup>, H. MAKICH<sup>a</sup>, M. BORNERT<sup>b</sup>, J. YVONNET<sup>c</sup>**

a. Université de Lorraine, Laboratoire LEM3 UMR CNRS 7239, Institut Mines-Telecom, InSIC 27 Voie de l'Innovation, 88100 St-Dié-des-Vosges, France

b. Université Paris-Est, Laboratoire Navier, UMR CNRS 8205, ENPC, IFSTTAR, 6/8 avenue Blaise Pascal, 77455 Marne-la-Vallée, France

c. Université Paris-Est, Laboratoire MSME, UMR CNRS 8208, 5 bd Descartes, 77454 Marne-la-Vallée, France

[badis.haddag@univ-lorraine.fr](mailto:badis.haddag@univ-lorraine.fr), [issam.bencheikh@univ-lorraine.fr](mailto:issam.bencheikh@univ-lorraine.fr),  
[mohammed.nouari@univ-lorraine.fr](mailto:mohammed.nouari@univ-lorraine.fr), [hamid.makich@univ-lorraine.fr](mailto:hamid.makich@univ-lorraine.fr),  
[michel.bornert@enpc.fr](mailto:michel.bornert@enpc.fr), [julien.yvonnet@univ-paris-est.fr](mailto:julien.yvonnet@univ-paris-est.fr)

## Résumé :

*Cet article traite de l'identification des propriétés élastiques du polymère PA12 obtenu par le procédé de fabrication additive SLS à partir d'une modélisation EF d'un volume élémentaire représentatif (VER). Le polymère PA12 analysé contient des additifs retardateurs de feu comme inclusions et des porosités induites par le procédé SLS. Un VER est construit à partir d'images tomographiques de la microstructure et d'une procédure de maillage pour mettre en place un modèle EF. En appliquant de la traction uniaxiale et du cisaillement simple selon différentes directions au VER, les principales propriétés d'élasticité (module de Young, coefficient de Poisson, module de cisaillement) sont identifiées. Il est constaté que ces propriétés dépendent de la direction de chargement (anisotropie). Le module de Young et le coefficient de Poisson sont proches de ceux de la matrice, du fait que la fraction volumique des inclusions et du vide sont beaucoup plus bas par rapport à celle de la matrice. Par contre, le module de cisaillement dans les différentes directions est plus faible par rapport à celui de la matrice d'environ 30%.*

## Abstract:

*This paper deals with identification of linear elasticity properties of a PA12 polymer obtained by SLS process using FE modelling of a representative elementary volume (RVE). The analyzed PA12 polymer contains fire retardant additives as inclusions and porosities induced by the SLS process. A REV is constructed from micro-tomography images of the microstructure and meshing procedure to obtain the FE mesh. Using uniaxial tension and pure shear loadings in different directions of the REV, the main elasticity properties (Young modulus, Poisson ratio and shear modulus) are identified. It is shown the elasticity properties are direction-dependent (anisotropy). The Young modulus and Poisson ratio are close to that of the isotropic properties of the matrix, since the volume fraction of inclusions and voids are much lower against the matrix one. However the shear modulus in different directions is found lower than the matrix one by about 30%.*

## **Mots clefs : Procédé FA SLS, VER, modélisation EF, propriétés d'élasticité, identification**

### **1 Introduction**

Les procédés de fabrication additive sont couramment utilisés pour fabriquer des composants ayant des formes complexes difficile, voire impossible, à obtenir par les procédés classiques de mise en forme (usinage, injection plastique, etc.). La fusion de la matière localement induit souvent une microstructure hétérogène. Les propriétés mécaniques entre autres se trouvent affectées. Elles peuvent être variables d'un endroit à un autre (hétérogénéité du matériau) et dépendant localement de la direction du chargement (anisotropie). La connaissance des propriétés de ces matériaux constitue un enjeu majeur pour leur utilisation en service, notamment lorsqu'ils sont sollicités. En effet, ces propriétés sont nécessaires pour justifier le choix du matériau d'un composant et de son dimensionnement.

La détermination des propriétés macroscopiques (ex. propriétés mécaniques, thermiques) à partir des propriétés des constituants élémentaires (phases, fibres, porosités, etc.) est un champ de recherche ouvert, tant les matériaux présentent une diversité de microstructures et de comportements. Si on se focalise sur les propriétés élastiques, qui est l'objet d'étude dans cet article, Yoshimura et al. [1] ont résumé les principales lois analytiques et semi-analytiques donnant les propriétés élastiques équivalentes en fonction de la fraction volumique de porosités. Mackenzie [2] a proposé un développement analytique donnant les constantes d'élasticité pour le cas particuliers des solides contenant des cavités sphériques. Plus récemment, Faes et al. [3] ont analysé la variabilité, l'hétérogénéité et l'anisotropie du comportement du PA12 obtenue par FA SLS. Ils ont identifié, entre autres, les propriétés d'élasticité anisotrope de ce matériau. Des modélisations micromécaniques ont également été proposées pour des matériaux contenant des inclusions et/ou des porosités. Mais quand la forme des porosités et leur distribution est complexes, l'utilisation de modèles de comportement avancés a ces limites. Néanmoins, pour s'affranchir des développements analytiques se basant sur des hypothèses simplificatrices ou de relations empiriques nécessitant des essais, il est intéressant d'explorer la démarche de simulation numérique du comportement à d'échelle locale du matériau pour identifier les propriétés mécaniques des matériaux obtenus par FA.

Dans ce présent travail, une procédure d'identification des propriétés d'élasticité linéaire (module de Young, coefficient de Poisson et module de cisaillement) du polymère PA12 ayant des retardateurs de feu obtenus par le procédé SLS est mise en place. Les principales étapes de l'étude sont les suivantes : (i) obtention du matériau par le procédé SLS avec un jeu de paramètres process optimal, (ii) construction de la microstructure du matériau à partir d'images obtenus par  $\mu$ -tomographie, (iii) construction d'un maillage volumique de la microstructure à partir de l'empilement d'images, (iv) mise en place d'un modèle EF d'un VER maillé, (v) sollicitation du VER en traction et cisaillement suivant différentes directions, (vi) identification des propriétés d'élasticité suivant les différents directions à partir des états de contraintes et de déformations obtenus par les simulations EF. La dépendance de ces propriétés identifiées de la microstructure du matériau est discutée.

## 2 Procédure suivie

### 2.1 Obtention de la microstructure du matériau

Le procédé de fabrication additive SLS permet d'obtenir des composants par frittage laser sur un lit de poudre couche par couche. Des éprouvettes en PA12 (matrice) ayant des retardateurs de feu (inclusions) ont été réalisées par ce procédé. Des paramètres process optimaux (puissance du spot laser, vitesse de balayage, vitesse de contournage, espacement de balayage, épaisseur de la couche, etc.), recommandés par le fabricant de la machine, ont été utilisés. La Figure 1(a) montre une éprouvette cylindrique obtenue par ce procédé. Cette éprouvette a été scannée au tomographe, obtenant ainsi une pile d'images (stacks) de la microstructure du matériau. La Figure 1(b) montre une image typique obtenue à une certaine profondeur et mettant en évidence les phases du matériau.

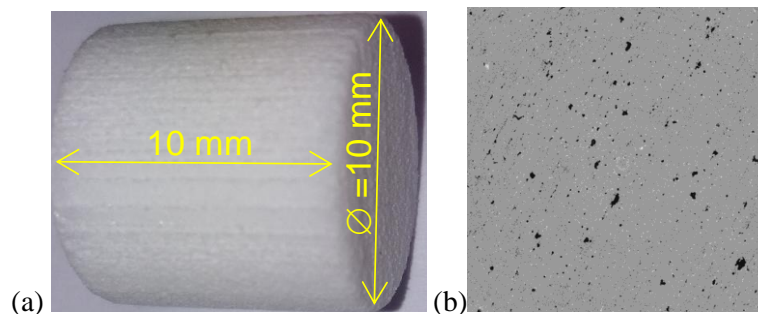


Figure 1 : (a) Eprouvette cylindrique obtenue pas le procédé de FA SLS et (b) exemple d'une image tomographique (taille de l'image  $\approx 6\text{mm} \times 6\text{mm}$ , résolution en pixel =  $6\mu\text{m}$ ) de la microstructure du matériau (noire = porosités, blanc = inclusions et gris = matrice).

### 2.2 Construction du VER

La pile d'images tomographiques ont été récupérées dans le logiciel AVIZO pour identifier les différentes phases (segmentation) et pour leur maillage (utilisation dans le cadre d'une modélisation EF), comme le montre la Figure 2(a). La taille du voxel cubique est de  $6\mu\text{m}$ . Ensuite, une zone de forme cubique de taille 1mm a été définie (Figure 2(b)), correspondant au volume élémentaire représentatif de la microstructure du matériau. Ce VER a été segmenté pour définir les différentes phases (matrice, inclusions et porosités).

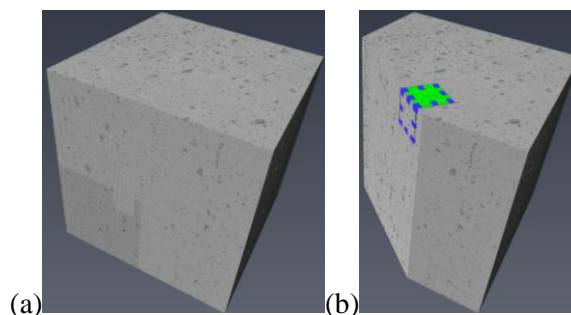


Figure 2 : (a) Pile d'images tomographiques de la microstructure du matériau et (b) définition d'un VER.

## 2.3 Modélisation éléments finis du VER

Après l'étape de segmentation du VER (définition des phases), un maillage surfacique 3D, avec des éléments triangulaires, des frontières de la matrice et des inclusions est généré dans AVIZO selon l'algorithme des "marching cubes" [4]. Par la suite, un maillage volumique des deux phases, avec des éléments tétraédriques (environ un million), est généré dans AVIZO suivant la méthode "advancing front". En dernière étape, le maillage du VER est importé dans le code ABAQUS pour attribuer le type d'éléments finis (EF tétraédrique linéaire C3D4), le comportement des phases et les conditions aux limites. Les porosités sont représentées par un volume vide non maillé. Le comportement de chaque phase (matrice et inclusions) est représenté par la loi d'élasticité linéaire isotrope. Le Tableau 1 donne ces propriétés.

Tableau 1 : Propriétés d'élasticité isotrope de la matrice et des inclusions.

Matrice (M)		Inclusions (I)	
$E_M$ (MPa)	$\nu_M$	$E_I$ (MPa)	$\nu_I$
1800	0.4	3000	0.3

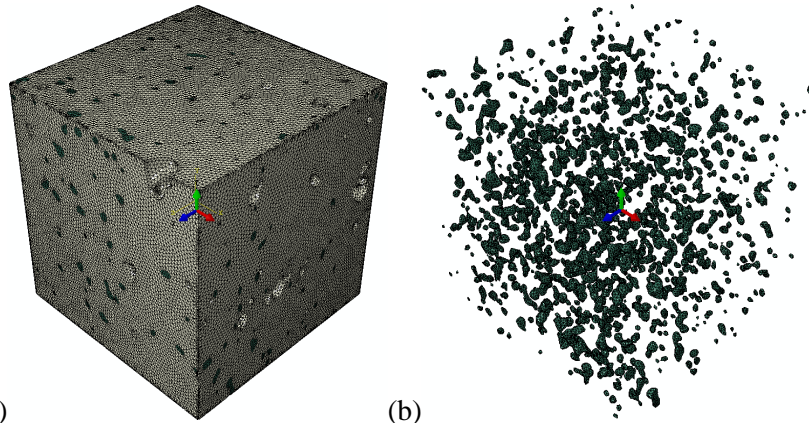


Figure 3 : (a) Modèle EF du VER et (b) mise en évidence des inclusions.

## 2.4 Procédure d'identification des propriétés effectives d'élasticité du matériau

La procédure d'identification consiste à simuler des chargements de type traction uniaxiale et cisaillement simple suivant les trois directions principale du VER. Il est postulé que le comportement global est élastique orthotrope, exprimé par la relation (1). A partir de cette loi de comportement, il est possible de déduire les propriétés effectives d'élasticité du matériau en utilisant les relations d'identification (2) et (3).

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & -\nu_{31}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{32}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

- Pour la traction uniaxiale :

$$E_i = \frac{\sigma_{ii}}{\varepsilon_{ii}}, \quad \nu_{ij} = -\frac{\varepsilon_{ii}}{\varepsilon_{jj}} \quad (2)$$

avec  $\sigma_{ii} = \frac{F_i}{S_i}; \frac{F_i}{S_0}, \quad \varepsilon_{ii} = \frac{U_i}{l_i}; \frac{l_i - l_0}{l_0}$

- Pour le cisaillement simple :

$$G_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\gamma_{ij}} \quad (3)$$

avec  $\sigma_{ij} = \frac{F_i}{S_j} = \frac{F_i}{S_0}, \quad \gamma_{ij} = \frac{U_i}{l_j} = \frac{U_i}{l_0}$

### 3 Résultats

Des simulations EF dans le code ABAQUS des chargements de type traction uniaxiale et cisaillement simple suivant les trois directions principales du VER ont été réalisées, comme le montre la Figure 4. Ces simulations révèlent l'hétérogénéité des champs de contraintes et de déformations à l'échelle de la microstructure du matériau.

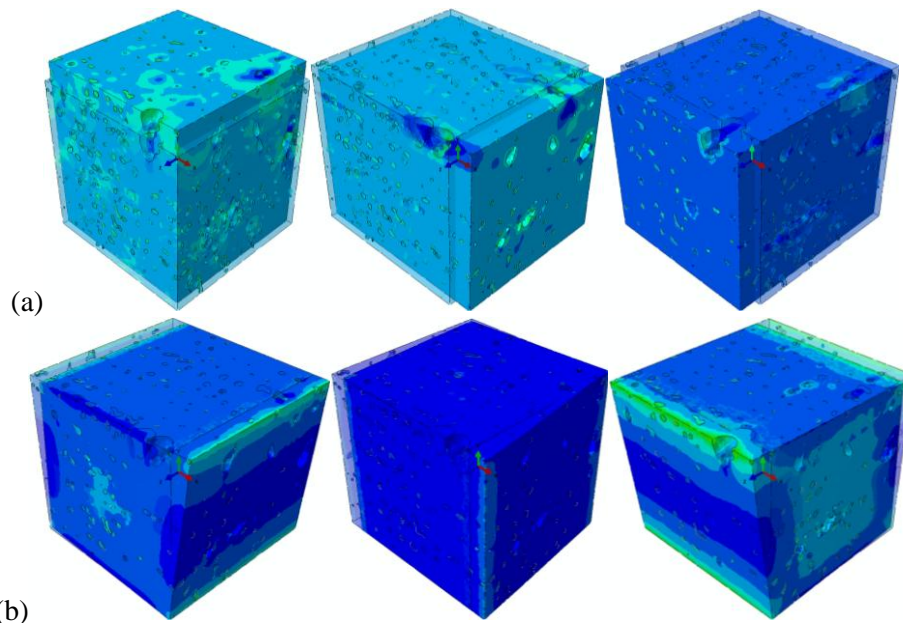


Figure 4 : Simulation EF (a) de la traction uniaxiale et (b) du cisaillement simple suivant les trois directions principales du VER.

À partir des efforts résultants sur les faces sollicitées du VER et du déplacement de ces faces, et en appliquant la procédure d'identification (relations (2) et (3)), les propriétés effectives d'élasticité du matériau ( $E_i, \nu_{ij}, G_{ij}$ ) sont évaluées. La Figure 5 montre les valeurs obtenues. Globalement, ces propriétés dépendent de la direction de sollicitation (anisotropie). Le module de Young et le coefficient de Poisson sont proches de ceux de la matrice, qui s'explique par un taux volumique des

inclusions et des porosités beaucoup plus bas par rapport à celle de la matrice (environ 3%). Par contre, le module de cisaillement dans les différentes directions est plus faible par rapport à celui de la matrice d'environ 30%. Ceci suggère que le module de cisaillement est beaucoup plus sensible au taux de porosités. La variation de ces propriétés en elles s'explique aussi par la forme et la distribution des inclusions et des porosités. Ceci implique que le procédé de FA SLS induit une anisotropie de l'élasticité du matériau, à prendre en compte à l'échelle de la pièce dans une démarche de dimensionnement par exemple.

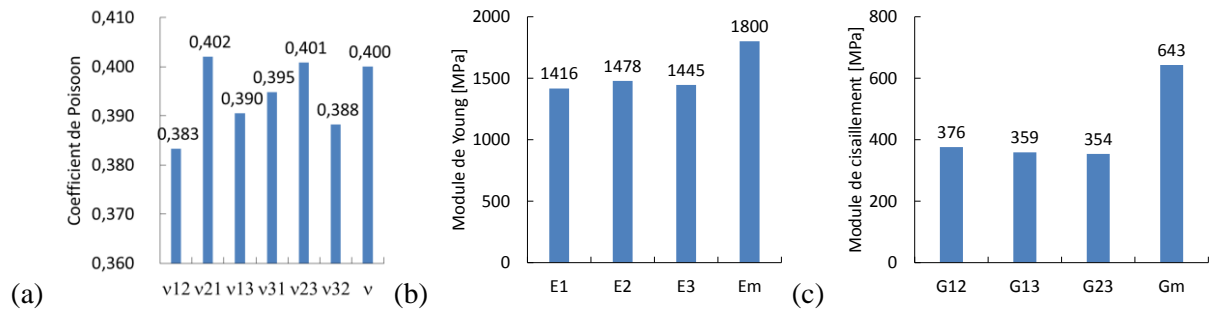


Figure 5 : Comparaison des propriétés effectives d'élasticité avec celles de la matrice: (a) coefficient de Poisson, (b) module de Young et (c) module de cisaillement.

## 4 Conclusion

Une procédure d'identification des propriétés d'élasticité du polymère PA12, obtenu par le procédé de FA SLS, à partir d'une modélisation EF du VER a été proposée.

- (1) Il est constaté que ces propriétés dépendent de la direction de sollicitation (anisotropie). Le module de Young et le coefficient de Poisson sont proches de ceux de la matrice, du fait que la fraction volumique des inclusions et des porosités est beaucoup plus basse par rapport à celle de la matrice.
- (2) Par contre, le module de cisaillement dans les différentes directions est plus faible par rapport à celui de la matrice d'environ 30%. Ceci suggère que le module de cisaillement est beaucoup plus sensible au taux de porosités.
- (3) La variation de ces propriétés s'explique aussi par la forme et la distribution des inclusions et des porosités. Ceci implique que le procédé de FA SLS induit une anisotropie de l'élasticité du matériau.
- (4) Enfin, les perspectives de cette étude sont larges : analyse de la variabilité du comportement, en variant la taille du VER et l'endroit où il est extrait (dans les couches ou entre les couches), et identification d'autres propriétés mécaniques du matériau (ex. ductilité, endommagement et rupture).

## Remerciement

Ce travail est réalisé dans le cadre du projet MMELED (Multiscale modeling and experimental investigation of damage in composite components obtained by additive manufacturing processes) financé par l'Agence Nationale de la Recherche. Les auteurs remercient la société PRISMADD pour la réalisation des éprouvettes.

## Références

- [1] H.N. Yoshimura, A.L. Molisani, N.E. Narita, P.F. Cesar, H. Goldenstein, Porosity dependence of elastic constants in aluminum nitride ceramics., *Materials Research* (2007) 10(2)
- [2] J.K. Mackenzie, The Elastic Constants of a Solid containing Spherical Holes, *Proceedings of the Physical Society. Section B* (1950) 63(1)
- [3] M. Faes, Y. Wang, P. Lava, D. Moens, Variability, heterogeneity, and anisotropy in the quasi-static response of laser sintered PA12 components, *Strain* (2016) 53(2)
- [4] P. Wils, Post-traitement des données du CTscan avec Avizo Lite 9.0.1, [www.ums2700.mnhn.fr/sites/ums2700.mnhn.fr/files/upload/attached/avizo9.0aide.pdf](http://www.ums2700.mnhn.fr/sites/ums2700.mnhn.fr/files/upload/attached/avizo9.0aide.pdf)