



**HAL**  
open science

# Propriétés élastiques effectives d'éprouvettes issues d'une impression 3D, dans un contexte d'optimisation des propriétés - FreeCAD, PrusaSlicer, Scilab

Pierre Maréchal, Simon Bernard, Hugues Duflo

## ► To cite this version:

Pierre Maréchal, Simon Bernard, Hugues Duflo. Propriétés élastiques effectives d'éprouvettes issues d'une impression 3D, dans un contexte d'optimisation des propriétés - FreeCAD, PrusaSlicer, Scilab. Congrès National de la Recherche des IUT (CNRIUT), Feb 2023, Saint-Pierre de la Réunion, France. hal-04220326

**HAL Id: hal-04220326**

**<https://hal.science/hal-04220326>**

Submitted on 27 Sep 2023

**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.

# Propriétés élastiques effectives d'éprouvettes issues d'une impression 3D, dans un contexte d'optimisation des propriétés – FreeCAD, PrusaSlicer, Scilab

---

Pierre Maréchal, Simon Bernard, Hugues Duflo

[pierre.marechal@univ-lehavre.fr](mailto:pierre.marechal@univ-lehavre.fr), [simon.bernard@univ-lehavre.fr](mailto:simon.bernard@univ-lehavre.fr), [hugues.duflo@univ-lehavre.fr](mailto:hugues.duflo@univ-lehavre.fr)

IUT Le Havre, Université Le Havre Normandie  
Laboratoire Ondes et Milieux Complexes, LOMC UMR 6294 CNRS

**Thèmes** – Matériaux - Mécanique

**Résumé** – *Les programmes mis en œuvre ici visent à soulever la problématique de la résistance des matériaux de pièces issues de fabrication additive, plus précisément par fusion de filament en acide poly-lactique, communément dénommé PLA (poly-lactic acid). La fabrication additive ouvre de nouvelles perspectives pour la réalisation de pièces sur-mesure. Les propriétés élastiques effectives obtenues par la pièce in fine dépendent des multiples paramètres d'impression, et de la reproductibilité de l'impression 3D. Le choix du logiciel libre, dont celui de découpage en tranches (slicer), s'est porté sur Prusa Slicer (<https://github.com/prusa3d/PrusaSlicer>). L'étude présentée ici vise à concevoir et imprimer des éprouvettes normalisées en PLA, de les solliciter jusqu'à la rupture via des essais de traction, et enfin d'en évaluer les propriétés élastiques effectives via une analyse des données numériques (<https://www.scilab.org/>) issues des essais mécaniques réalisés. La question des conditions de fabrication est très souvent relayée à l'arrière plan bien que cruciale pour la tenue mécanique, d'où l'intérêt de sensibiliser et former les étudiants sur ce sujet, et d'en faire un lien entre l'environnement pédagogique et de recherche universitaire et celui plus informel et émancipateur des fablabs, propice au partage des connaissances et de l'expérience. Bien que des paramètres d'impression par défaut soient proposés ( finition, température, vitesse, orientation, densité), le compromis qualité / matière / temps d'impression demeure une préoccupation première pour les usagers des pièces réalisées. Ces paramètres constituent donc un sujet majeur pour la formation au choix de compromis techniques, économiques, mais aussi éthique au sens de l'amélioration continue de l'utilisation des ressources à disposition.*

**Mots-Clés** – Logiciel libre, fabrication additive, analyse des données.

## Introduction

La fabrication additive par dépôt de filament fondu dite FFF (*Fused Filament Fabrication*), de filament de polymère s'est largement diffusée et popularisée depuis les années 2008 avec le projet RepRap (pour *replicating rapid prototyper*) [1]. De nombreux polymères ont été testés: le PCL (*poly-capro-lactone*), l'ABS (*acrylonitrile butadiene styrene*), jusqu'au PLA (*poly-lactic acid*), largement utilisé aujourd'hui. La large diffusion de cette technologie et son appropriation par des communautés d'utilisateurs au sein de tiers-lieux tels que les *FabLabs* [2] ont été des moteurs d'amélioration continue. Plus particulièrement, les logiciels libres ont été des vecteurs accélérateurs de diffusion de cette technologie, en favorisant le partage des expériences [3]. Ce choix du logiciel libre pour la fabrication additive par FFF s'illustre par : la conception par CAD (*computer aided design*) via FreeCAD (<https://www.freecadweb.org/>) ; la conversion et le découpage en tranches (*slicer*) via Prusa Slicer (<https://github.com/prusa3d/PrusaSlicer>) ; le traitement et l'analyse des données issues des essais de traction via Scilab (<https://www.scilab.org/>). Ainsi, une imprimante 3D Prusa a été choisie et mise en œuvre pour la fabrication d'éprouvettes normalisées en PLA. Une étude paramétrique sur le type de remplissage a montré la variabilité des propriétés mécaniques effectives obtenues *in fine*, via des essais de traction jusqu'à la rupture.

## 1 Contexte et motivation

Bien que d'usage répandu, les imprimantes 3D sont souvent utilisées de façon empirique, et la maîtrise des paramètres d'impression nécessite souvent un compagnonnage ou une longue période d'apprentissage. Les nombreuses expériences d'utilisateurs expérimentés, partagées via les réseaux permettent une appropriation rapide de l'outil, au dépend de liens avec des acquis, apprentissages, connaissances techniques et scientifiques, car parfois ressentis trop théoriques par les étudiants. Derrière l'ergonomie apparente, les choix de paramètres d'impression proposés par défaut sont cruciaux. Parmi les principaux phénomènes physiques abordées par des étudiants en sciences et techniques, on peut évoquer les transferts thermiques (conduction, convection) et les diffusions et temps de refroidissement associés ; les changements de phase (fusion, solidification) et les adhésions associées ; les effets de dilatation (coefficient d'expansion) et les contraintes et déformations associées.

L'étude des paramètres d'impression fait appel à des connaissances pluridisciplinaires et montre les limites de reproductibilité des résultats. Ce cadre d'étude, bien que limité, permet d'illustrer une application multiphysique en sciences et techniques de matériaux.

## 2 Fabrication additive

La fabrication additive d'échantillon comporte de nombreux paramètres de réglage, dont le taux de remplissage, les angles d'impression, le motif de remplissage, l'épaisseur des couches, la température d'impression, la température du plateau, la vitesse d'impression... Chacun de ces paramètres ont une influence sur les propriétés effectives de l'éprouvette réalisée *in fine* [4-5]. La caractérisation d'éprouvettes normalisées est mise en œuvre via des essais de traction, et à l'extraction de leurs propriétés effectives mécaniques.

### 2.1 Méthode

Afin de dégager des grandeurs mesurables et d'en évaluer l'amplitude, seuls deux paramètres d'influence ont été étudiés : le taux de remplissage et les angles d'impression. Un jeu d'éprouvettes de traction a ainsi été fabriqué selon la norme ISO 527-2 [6], en conservant les autres paramètres constants : motif de remplissage rectiligne, épaisseur des couches de 0,3 mm, température d'extrusion à 215°C, température de plateau à 60°C, vitesse d'impression à 50 mm/s.

Table 1 – Configurations d'impression étudiées.

Éprouvette	Remplissage	Angles d'impression
P100_45	100 %	+45°/-45°
P100_90	100 %	+90°/0°
P60_45	60 %	+45°/-45°
P60_90	60 %	+90°/0°

Deux échantillons de chaque configuration (Table 1) ont été fabriqués. Un protocole expérimental a été développé : éprouvette normalisée conçue par CAD (format STL) ; conversion par Prusa Slicer (format GCODE) ; réalisation d'essais de traction selon la norme ISO 527-1 [7] sur une machine de traction Instron 5800, pilotée par BlueHill 2 ; traitement des données (format CSV) et tracé de courbes avec Scilab ; extraction des propriétés mécaniques : module d'Young et coefficient de Poisson  $\{E, \nu\}$ .

## 3 Résultats

Les valeurs moyennes des paramètres  $\{E_{moy}, \nu_{moy}\}$ , respectivement des modules d'Young et des coefficients de Poisson (eq. (1) et (2)), ont été évaluées :

$$E_{moy} = \frac{1}{\varepsilon_{l,max} - \varepsilon_{l,min}} \int_{\varepsilon_{l,min}}^{\varepsilon_{l,max}} \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon_l} d\varepsilon_l \quad (1)$$

$$\nu_{moy} = \frac{1}{\varepsilon_{l,max} - \varepsilon_{l,min}} \int_{\varepsilon_{l,min}}^{\varepsilon_{l,max}} \frac{\partial \varepsilon_t}{\partial \varepsilon_l} d\varepsilon_l \quad (2)$$

avec  $\{\varepsilon_{l,min}, \varepsilon_{l,max}\} = \{0,05\%, 0,25\%\}$

Les courbes de traction sont illustrées (Fig. 1) pour les éprouvettes  $Px_a$  (Table 1) avec un remplissage  $x = \{100\%; 60\%\}$  et des plis orientés avec des angles  $a = \{+45^\circ/-45^\circ; +90^\circ/0^\circ\}$ . Elles montrent les zones de déformation élastiques de pente quasi-constante pour  $\varepsilon < 1\%$ , et les zones de déformation plastique au-delà.

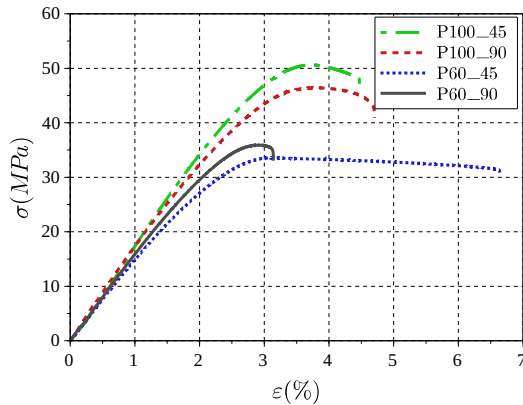


Figure 1 – Courbes de traction  $\sigma(\varepsilon)$ .

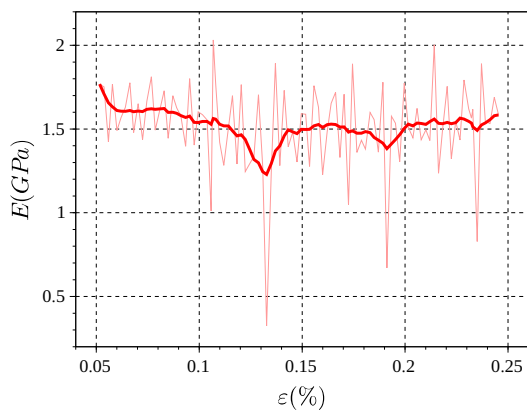


Figure 2 – Pente de la courbe de traction  $\partial\sigma/\partial\varepsilon$  (GPa) pour une éprouvette P60\_90.

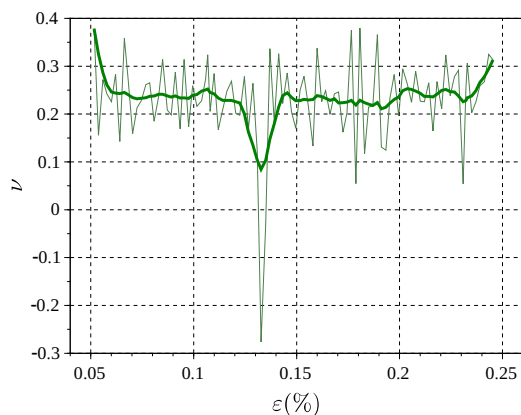


Figure 3 – Coefficient de Poisson  $\nu$  pour une éprouvette P60\_90.

Les variations de  $E$  (Fig. 2) et  $\nu$  (Fig. 3) illustrent les erreurs absolues et les variations obtenues (Eq. (1) et (2)), autour des moyennes obtenues deux essais (Table 2).

Table 2 – Résultats des essais de traction.

Éprouvette	$E_{moy}$ (GPa)	$\nu_{moy}$	$p$ (%)
P100_45	$2,05 \pm 0,05$	$0,32 \pm 0,01$	$0,75 \pm 0,25$
P100_90	$1,90 \pm 0,07$	$0,30 \pm 0,01$	$3,30 \pm 0,05$
P60_45	$1,50 \pm 0,30$	$0,30 \pm 0,01$	$13,4 \pm 0,4$
P60_90	$1,55 \pm 0,05$	$0,24 \pm 0,01$	$14,0 \pm 0,4$

$E_{moy}$  (GPa) : module d'Young ;  $\nu_{moy}$  : coefficient de Poisson ;  $p$  (%) : taux de porosité.

## 4 Conclusion

Un protocole expérimental a été mis au point pour caractériser des éprouvettes issues de fabrication additive. Les résultats obtenus, reproductibles, montrent que les propriétés élastiques effectives  $\{E, \nu\}$  sont directement liées à des paramètres d'impression tels que le taux de remplissage et les angles d'impression. La méthodologie développée peut s'appliquer à de nouvelles études de cas.

## Références

- [1] Jones, R., Haufe, P., Sells, E., Irvani, P., Olliver, V., Palmer, C. and Bowyer, A.: "RepRap – the replicating rapid prototyper", *Robotica*, vol.29, p.177-191, 2011, (doi.org/10.1017/S026357471000069X).
- [2] Lhoste, É.F. and Barbier, M.: "FabLabs. L'institutionnalisation de Tiers-Lieux du « soft hacking »", *Revue d'anthropologie des connaissances*, vol.10, p.43-69, 2016, (doi.org/10.3917/rac.030.0043).
- [3] Rumpala, Y.: "Dynamiques de la production matérielle entre pairs sur la base de communs. Vers une réappropriation des conditions de vie?", *Sociologie*, vol.10, p.303-320, 2019, (doi.org/10.3917/socio.103.0303).
- [4] Popescu, D., Zapciu, A., Amza, C., Baci, F. and Marinescu, R.: "FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review", *Polymer Testing*, vol.69, p.157-166, 2018, (doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.05.020).
- [5] Verbeeten, W.M., Lorenzo-Bañuelos, M. and Arribas-Subiñas, P.J.: "Anisotropic rate-dependent mechanical behavior of Poly(Lactic Acid) processed by Material Extrusion Additive Manufacturing", *Additive Manufacturing*, vol.31, p.100968, 2020, (doi.org/10.1016/j.addma.2019.100968).
- [6] ISO 527-2: "ISO 527-2, Plastics-Determination of Tensile Properties, Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics", 2012.
- [7] ISO 527-1: "ISO 527-1, Plastics-Determination of Tensile Properties, Part 1: General principles", 2012.