

# Développement de capteurs résistifs intégrés dans un composite élaboré par impression 3D

## *Development of resistive sensors integrated into a 3D printed composite*

LE Quynh-Anh<sup>1</sup>, TRUONG-HOANG Thuy-Quynh<sup>1</sup>, Ahmad AKRAD<sup>2</sup>

1 : Pôle Mécanique des Structures Composites et Environnement (MSCE), ESTACA' Lab  
École supérieure des techniques aéronautiques et de construction automobile (ESTACA)  
Parc Universitaire Laval Changé, Rue Georges Charpak, BP 76121, 53061 Laval Cedex 9  
e-mail : [quynhanh.le@estaca.fr](mailto:quynhanh.le@estaca.fr) et [thuy-quynh.truong-hoang@estaca.fr](mailto:thuy-quynh.truong-hoang@estaca.fr)

2 : Pôle Systèmes et Énergie Embarqués (S2ET), ESTACA' Lab  
École supérieure des techniques aéronautiques et de construction automobile (ESTACA)  
Parc Universitaire Laval Changé, Rue Georges Charpak, BP 76121, 53061 Laval Cedex 9  
e-mail : [Ahmad.AKRAD@estaca.fr](mailto:Ahmad.AKRAD@estaca.fr)

### Résumé

La fabrication additive (AM) ou impression 3D a transformé les méthodes de production dans de nombreux secteurs. Cette technologie permet de concevoir des structures en intégrant directement des capteurs intelligents dans les matériaux imprimés, offrant ainsi une meilleure protection des capteurs contre les conditions environnementales. Récemment, les capteurs de déformation basés sur des polymères conducteurs ont suscité un intérêt particulier en raison de leur mécanisme simple et de leur capacité à s'auto-alimenter, réduisant ainsi la production de déchets métalliques. Dans cette étude, le poly(acide lactique) renforcé par des particules de carbone (CB/PLA) est utilisé pour développer des capteurs résistifs capables de suivre les déformations dans un composite à fibres courtes de carbone/PLA (CF/PLA). Les propriétés mécaniques, électriques ainsi que l'impact des capteurs sur les caractéristiques mécaniques du composite ont été analysés. Les résultats obtenus mettent en évidence l'influence de la position et de la forme des capteurs sur les propriétés mécaniques en traction, ainsi que la corrélation entre la résistance électrique et la déformation. Cette technologie offre une alternative prometteuse aux jauges de déformation traditionnelles, permettant de mesurer les déformations au sein de structures imprimées en 3D et ouvrant la voie à des capteurs plus fonctionnels et performants.

### Abstract

Additive manufacturing (AM) or 3D printing has transformed production methods in many sectors. This technology enables to design structure by directly integrating intelligent sensors into the printed materials, offering enhanced protection of sensors against environmental conditions. Recently, strain sensors based on conductive polymer have attracted particular interest due to the simplicity of their mechanism and their ability to self-power, thus reducing the production of metal waste. In this study, carbon black particle-reinforced poly(lactic acid) (CB/PLA) is used to develop resistive sensors capable of tracking the deformations of carbon fiber/PLA composites (CF/PLA). Mechanical and electrical properties were analyzed, as well as the impact of the sensors on the mechanical characteristics of the composite. The results highlighted the influence of sensor position and shape on mechanical tensile properties, and also the correlation between electrical resistance and strains. This technology offers a promising alternative to traditional strain gauges, enabling deformation to be measured within 3D-printed structures, paving the way for more functional and higher-performance sensors.

**Mots Clés :** Impression 3D FDM, polymère conducteur, capteur résistif, essais de traction, propriétés électriques

**Keywords :** 3D printing FDM, conductive polymer, resistive sensor, tensile test, electrical properties

## 1. Introduction

La fabrication additive (AM), également connue sous le nom d'impression 3D, est une technologie en plein croissance permettant la création des pièces complexes. Elle offre de nombreux avantages, notamment la réduction du temps de production, la simplicité d'utilisation, la flexibilité de conception et une diminution significative des déchets produits [1]. Parmi les différentes techniques d'impression 3D, le Fused Deposition Modeling (FDM) est particulièrement populaire grâce à son coût abordable et à la diversité des matériaux compatibles [2]. Cette méthode consiste à extruder un filament chauffé, déposé couche par couche, permettant ainsi la création de pièces complexes. Le poly(acide lactique) (PLA) est un polymère largement utilisé dans le FDM en raison de ses

propriétés mécaniques intéressantes et de son caractère respectueux de l'environnement. En effet, le PLA est un biomatériau issu de ressources renouvelables, offrant des propriétés comparables à celles d'autres polymères pétrochimiques. Dans les domaines électroniques et robotiques, il est renforcé avec des charges conductrices pour fabriquer des composants conducteurs, offrant une alternative aux métaux qui sont plus lourds et sensibles à l'oxydation [3]. Parmi les charges conductrices courantes, on trouve les nanotubes de carbone, le graphène et les particules de carbone, qui confèrent une conductivité électrique aux composites [4].

Cette étude se concentre sur l'intégration de capteurs résistifs directement dans des structures imprimées en 3D, en utilisant deux matériaux principaux : le CB/PLA et le composite CF/PLA. Ces capteurs, dont la résistance électrique varie en fonction de la déformation mécanique, présentent un fort potentiel pour des applications dans les domaines du transport, notamment pour la surveillance des déformations structurelles. Des essais mécaniques et électriques sont réalisés, les résultats obtenus s'inscrivent dans une démarche visant à améliorer la fonctionnalité et l'efficacité des capteurs imprimés en 3D.

## 2. Matériaux et fabrication

### 2.1. Matériaux

Le filament conducteur CB/PLA de 2,85 mm de diamètre de Proto-pasta a été utilisé pour imprimer des capteurs résistifs. Selon les données du fabricant et la littérature [5], il contient 21,5% de particules de carbone en masse ce qui correspond à un taux volumique de 15,2%. Deux formes de capteurs ont été conçus : (i) capteur en forme de U et (ii) capteur en forme de Omega ( $\Omega$ ). Ils ont été imprimés soit sur la surface extérieure soit à mi-hauteur de l'épaisseur des éprouvettes de composite (Fig. 1). Le filament de composite CF/PLA de 2,85 mm de diamètre, fourni également par Proto-pasta, a été utilisé pour imprimer les éprouvettes de traction.

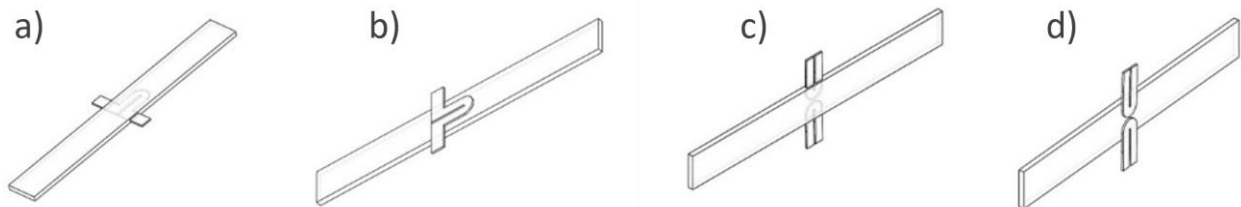


Fig. 1. Eprouvettes de traction avec capteurs intégrés (a) capteur  $\Omega$  à l'intérieur, (b) capteur  $\Omega$  à la surface, (c) deux capteurs U à l'intérieur et (d) deux capteurs U à la surface.

### 2.2. Processus de fabrication

Les fichiers CAO des éprouvettes intégrant les capteurs ont été conçus à l'aide du logiciel SolidWorks, puis convertis en fichiers exploitables par l'imprimante 3D grâce au logiciel Ultimaker Cura. L'imprimante Ultimaker S5 a été utilisée avec deux buses de 0,8 mm de diamètre. Des éprouvettes rectangulaires de dimensions 175 x 20 x 3 mm<sup>3</sup> ont été élaborées avec un angle d'impression de 0°, où le filament CF/PLA fondu était déposé selon la direction longitudinale de l'éprouvette. Les capteurs U et  $\Omega$  ont des dimensions de 25,5 mm x 11 mm et de 25,5 mm x 39 mm de longueur et de largeur, respectivement. L'épaisseur des capteurs a été fixée à 1 mm afin d'avoir une conductivité électrique mesurable. Les capteurs ont été imprimés avec un remplissage concentrique. Les paramètres d'impression ont été choisis selon les préconisations de la littérature [6] : densité de remplissage 100%, température des buses réglées à 225°C, température de plateau fixée à 60°C, vitesse d'impression du CB/PLA et du CF/PLA : 10 mm/s et 60 mm/s respectivement, hauteur de couche à 0,1 mm.

### 2.3. Protocole expérimental

Les propriétés mécaniques et électriques des matériaux étudiés ont été évaluées à l'aide d'essais de traction quasi-statique, couplés à des mesures de résistance électrique. Les tests ont été réalisés sur une machine d'essai INSTRON 3369 équipée d'une cellule de charge de 50 kN. Les éprouvettes ont été maintenues entre les mors de la machine avec une longueur utile de 95 mm. Des extensomètres longitudinal et transversal avec des longueurs de jauges respectivement de 50 mm et 20 mm ont été utilisés pour mesurer les déformations longitudinales et transverses au cours du chargement mécanique. La vitesse de déplacement de la traverse a été fixée à 1 mm/min. La résistance électrique est mesurée à l'aide d'un multimètre Keithley DMM6500 connecté aux bornes des capteurs ou directement aux extrémités des éprouvettes CB/PLA, où deux fils métalliques avaient été préalablement collés (Fig. 2).

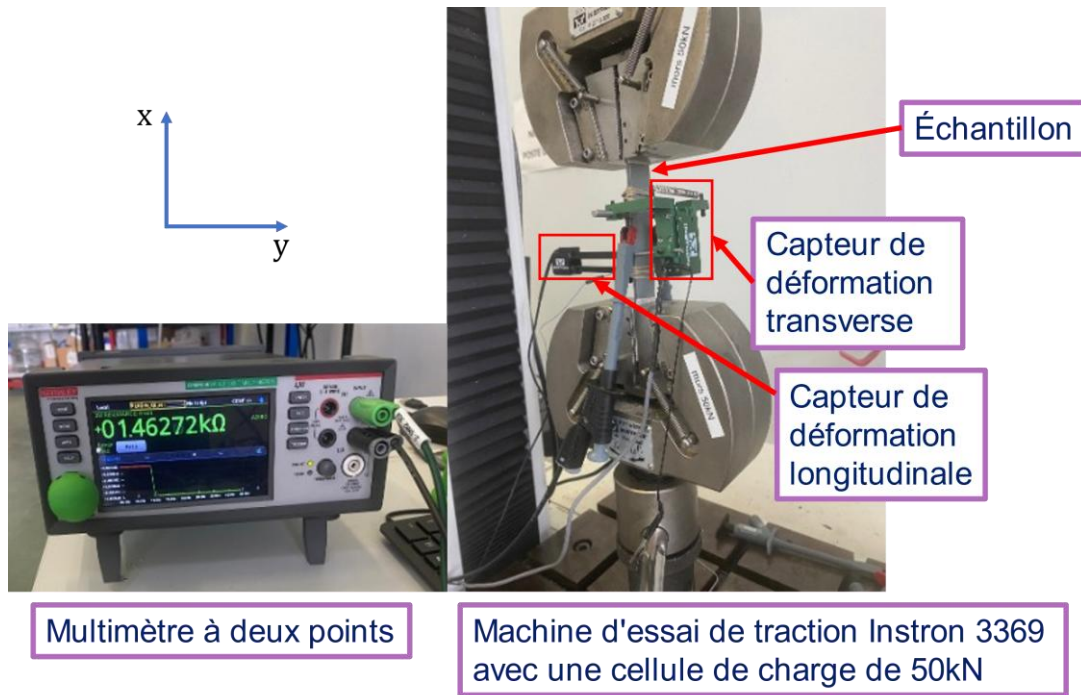


Fig. 2. Essai de traction avec mesure de la variation de résistance électrique

Lors de ces essais mécaniques, la résistance électrique  $R(t)$  et la déformation longitudinale  $\varepsilon_{xx}(t)$  ont été utilisées pour déterminer la résistance électrique relative ( $F$ ) et le facteur de jauge ( $G$ ) selon les équations (1) et (2) suivantes :

$$F = \frac{R(t) - R_0}{R_0} \times 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

$$G = \frac{\Delta\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)}{\Delta\varepsilon_{xx}} \quad (\text{Eq. 2})$$

### 3. Résultats

#### 3.1. Comportement mécanique des matériaux

Des essais de traction monotone ont été réalisés sur des éprouvettes de CB/PLA et de composite CF/PLA  $0^\circ$  afin d'évaluer leurs propriétés mécaniques initiales. La Fig. 3 présente les courbes de contrainte-déformation longitudinale représentatives de ces deux matériaux. Comme attendu, le composite CF/PLA possède des propriétés mécaniques plus élevées que celles du polymère conducteur. Ce dernier a un module de Young presque trois fois plus petit que celui du composite ( $2,51 \pm 0,10$  GPa contre  $6,81 \pm 0,13$  GPa). En revanche, les déformations à la rupture sont très similaires pour les deux matériaux. Concernant la contrainte à la rupture, le CB/PLA atteint une

contrainte inférieure de 36,67% à celle du CF/PLA. L'ajout des fibres de carbone dans la matrice de PLA a donc permis d'augmenter de manière très conséquente la rigidité et la résistance à la traction du matériau. Ces résultats sont en accord avec la littérature pour le même matériau [5], [7]. Le Tab. 1 résume les principales caractéristiques mécaniques des deux matériaux étudiés.

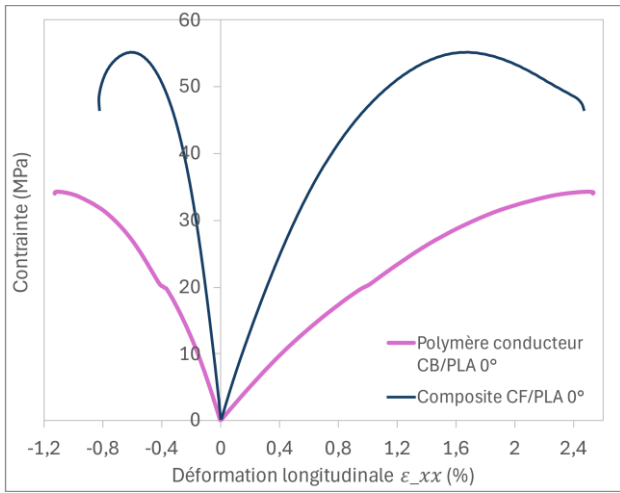


Fig. 3. Propriétés mécaniques en traction du CB/PLA et du composite CF/PLA

	CB/PLA 0°	CF/PLA 0°
<b>Module de Young (GPa)</b>	2,51±0,10	6,81±0,13
<b>Contrainte maximale (MPa)</b>	31,94±5,07	56,44±1,06
<b>Contrainte à la rupture (MPa)</b>	30,86±5,49	48,73±2,11
<b>Déformation à la rupture (%)</b>	2,47±0,39	2,67±0,31
<b>Coefficient de Poisson</b>	0,37±0,01	0,34±0,00

Tab. 1. Caractéristiques mécaniques

### 3.2. Influence des capteurs résistifs sur les propriétés mécaniques du composite CF/PLA

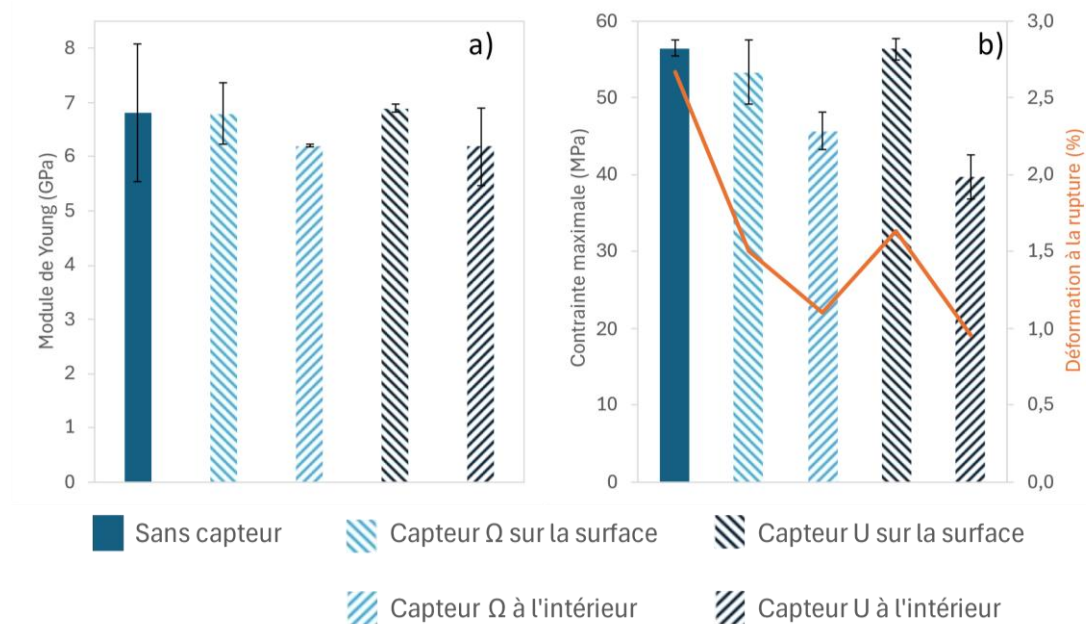


Fig. 4. Comparaison des propriétés mécaniques entre les échantillons de composite initiaux et les échantillons intégrant des capteurs : (a) Module de Young, (b) Contrainte maximale–Déformation à la rupture

La Fig. 4 présente les propriétés mécaniques du CF/PLA avec et sans capteurs intégrés. Il apparaît que le module de Young n'est pas affecté par la présence des capteurs en tenant en compte des écarts-types. Par contre, les déformations à la rupture et les contraintes maximales sont réduites de manière significative lorsque les capteurs sont intégrés à l'intérieur des éprouvettes.

### 3.3. Comportement électrique du polymère conducteur CB/PLA

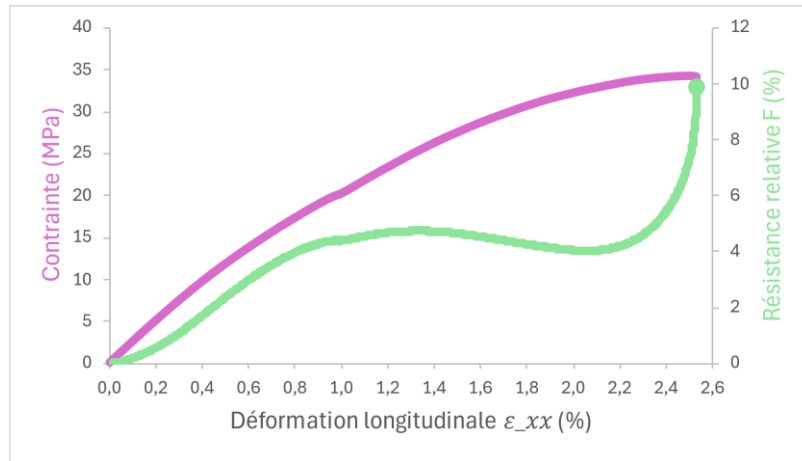


Fig. 5. Evolution de la contrainte mécanique et de la résistance relative du polymère conducteur CB/PLA.

La Fig. 5 montre l'évolution de la résistance relative en fonction de la déformation longitudinale  $\epsilon_{xx}$  du polymère conducteur CB/PLA lors d'un essai de traction monotone. Elle est constituée de trois étapes distinctes : (i) Une augmentation de la résistance électrique dans le domaine élastique, expliquée par l'éloignement progressif des particules de carbone lorsque la contrainte augmente, (ii) une diminution de la résistance électrique observée au début du domaine plastique, jusqu'à environ 2% de déformation, (iii) puis une augmentation significative de celle-ci jusqu'à la rupture. Cette évolution a également été observée dans des travaux antérieurs [5]. Ce comportement peut s'expliquer par plusieurs hypothèses : la création de nouveaux chemins électriques par effet Poisson, et leur destruction lorsque des particules de carbone s'éloignent suivant l'axe de traction jusqu'à la rupture.

### 3.4. Evolution électrique des capteurs intégrés

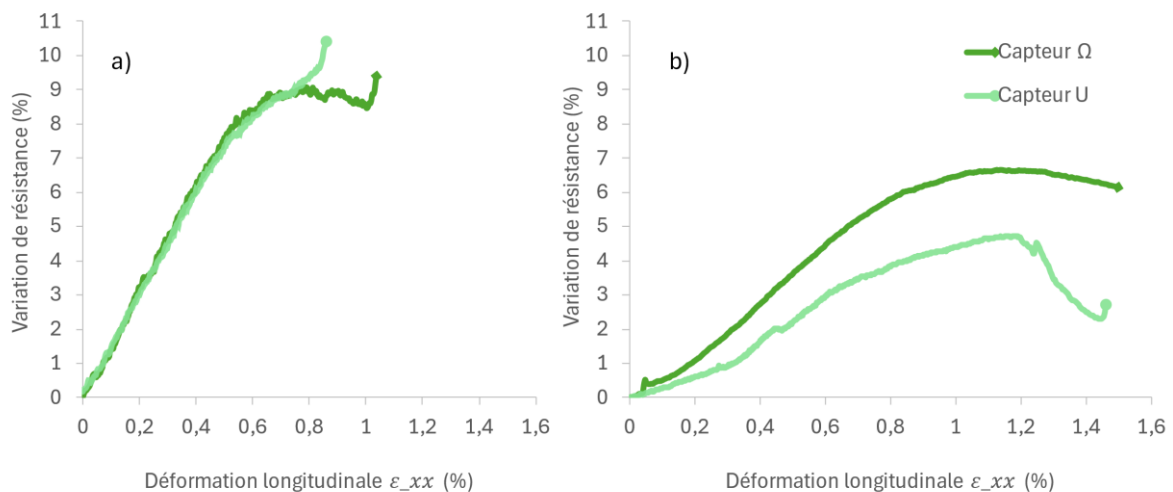


Fig. 6. Comparaison de la variation de résistance relative pour les deux types de capteurs  $\Omega$  et  $U$  en fonction de leur position : a) à l'intérieur ; b) sur la surface

La Fig. 6 présente les différentes variations de la résistance électrique des capteurs intégrés en fonction de leur position. On observe que l'intégration du capteur à l'intérieur du matériau génère des signaux électriques plus réguliers et des variations de résistance relative plus importantes, ce qui se traduit par un meilleur facteur de jauge (Fig. 7). En revanche, lorsque le capteur est placé à la surface de l'éprouvette, la variation de résistance électrique diminue, d'environ 2% pour le capteur  $\Omega$  et 5% pour le capteur  $U$ . Le capteur  $\Omega$  présente toutefois une variation de résistance plus importante et plus stable que le capteur  $U$ .

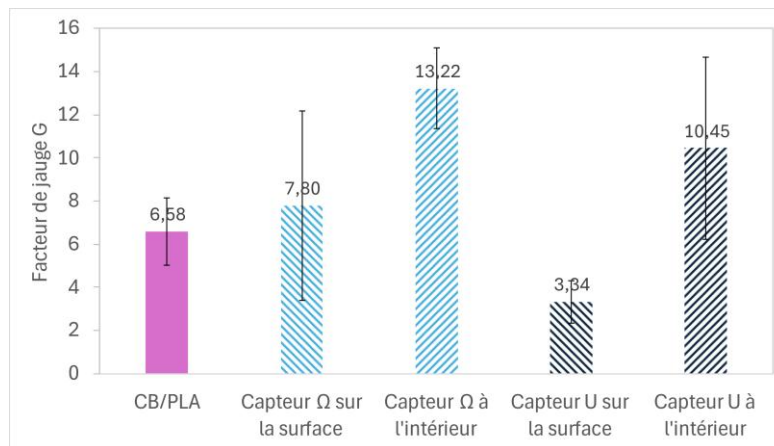


Fig. 7. Facteur de jauge des capteurs en CB/PLA intégrés dans les composites CF/PLA.

#### 4. Conclusion

Dans cette étude, les propriétés mécaniques et électriques du CB/PLA ont été investiguées en vue de l'utiliser comme capteur de déformation dans le composite CF/PLA élaboré par impression 3D. Elle a permis de mettre en évidence l'impact des capteurs sur le comportement mécanique du composite CF/PLA. Les résultats montrent que le module de Young du composite CF/PLA n'est pas affecté par la présence de capteurs, quelle que soit leur forme ou leur position. Cependant, leur intégration entraîne une diminution de la déformation et de la contrainte à la rupture. Malgré cela, ces capteurs internes présentent un facteur de jauge élevé, ce qui est une caractéristique essentielle pour le développement de jauges de déformation performantes.

#### Références

- [1] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen, and D. Hui, "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges," *Composites Part B: Engineering*, vol. 143, pp. 172–196, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
- [2] S. Kumar *et al.*, "A comprehensive review of FDM printing in sensor applications: Advancements and future perspectives," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 113, pp. 152–170, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.jmapro.2024.01.030.
- [3] X. Zhou, L. Wu, and J. Wang, "Recent developments in conductive polymer composites for fused deposition modeling," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 174, p. 107739, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.compositesa.2023.107739.
- [4] S. Park, W. Shou, L. Makatura, W. Matusik, and K. (Kelvin) Fu, "3D printing of polymer composites: Materials, processes, and applications," *Matter*, vol. 5, no. 1, pp. 43–76, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.matt.2021.10.018.
- [5] L. Roumy, T.-Q. Truong-Hoang, F. Touchard, C. Robert, and F. Martinez-Hergueta, "Electro-Mechanical Characterisation and Damage Monitoring by Acoustic Emission of 3D-Printed CB/PLA," *Materials*, vol. 17, no. 5, p. 1047, Feb. 2024, doi: 10.3390/ma17051047.
- [6] D. Robin *et al.*, "Multiscale characterisation of the electrical response of 3d printed carbon black polylactic acid," *J Mater Sci*, vol. 58, no. 32, pp. 13118–13135, Aug. 2023, doi: 10.1007/s10853-023-08840-6.
- [7] R. T. L. Ferreira, I. C. Amatte, T. A. Dutra, and D. Bürger, "Experimental characterization and micrography of 3D printed PLA and PLA reinforced with short carbon fibers," *Composites Part B: Engineering*, vol. 124, pp. 88–100, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.compositesb.2017.05.013.