

# Initiation à la fabrication additive pour l'électronique flexible : Réalisation de capteurs résistifs par sérigraphie

F. Le Bihan,<sup>a</sup> R. Selmi,<sup>a</sup> J-C Fustec,<sup>a</sup> J. Rammal,<sup>b</sup> M. Harnois.<sup>a</sup>

<sup>a</sup> IETR et pôle CNFM de Rennes (CCMO), Université de Rennes, Rennes, France

<sup>b</sup> ESTI Ecole Supérieures des Technologies Industrielles - GIP CEI 6, Redon, France

Contact email : maxime.harnois@univ-rennes.fr

La fabrication additive est une méthode de fabrication qui doit permettre de répondre à certains défis sociaux majeurs et actuels. En effet, par nature, elle répond aux besoins environnementaux de minimisation des étapes de fabrication, d'utilisation de matériaux, de substances chimiques, etc. Elle est aussi une des solutions permettant, à terme, de mettre en œuvre des matériaux très variés, innovants et plus respectueux de l'environnement. Elle est également adaptée à la formation des étudiants sur les technologies additives pour l'électronique flexible. En effet, sa prise en main est rapide et peut conduire à la fabrication et au test de différentes structures électroniques et de capteurs. La formation proposée met en œuvre des connaissances théoriques, technologiques et pratiques, qui couvrent le panel des applications et secteurs d'intérêt, tout en permettant des réalisations avec des matériaux variés pour des applications concrètes telles que des capteurs de température, de déformation ou d'humidité. Son intérêt est également d'apporter aux étudiants quelques compétences sur cette technologie, d'autant plus que celle-ci est soutenue par un tissu industriel composé à la fois de PME et de grandes entreprises réparties sur l'ensemble du territoire.

## I. Introduction

L'objectif est de développer un module d'enseignement qui permet de sensibiliser les étudiants sur l'intérêt et les applications de l'électronique flexible. Le premier objectif consiste à apporter une ouverture scientifique par la présentation de nouvelles technologies électroniques, différentes et complémentaires de celles de l'électronique dite classique. Après une présentation de l'électronique flexible, et de la nécessité de développer des solutions alternatives aux technologies de type silicium, un focus est fait sur l'électronique imprimée. Des exemples d'applications, actuelles ou de prospective sont présentés pour montrer les grandes potentialités de ces technologies. Un cours est dispensé sur cette thématique.

La partie pratique est réalisée grâce au matériel du Centre Commun de Microélectronique de l'Ouest (CCMO) du CNFM et aux équipements de la plateforme nanoRennes (réseau CNRS Renatech+). Ces moyens technologiques permettent en particulier la fabrication, avec collaboration active des étudiants, de composants par sérigraphie ainsi que le test des composants comme capteurs de différents types avec l'exploitation de leurs caractéristiques.

## **II. Présentation de la fabrication additive**

Dans le cours proposé, différentes sections sont traitées pour donner une vision large des possibilités de ces technologies. Ces sections sont détaillées ci-après.

### Naissance et évolution de la fabrication additive dans l'électronique :

L'histoire de l'impression traverse les siècles, débutant par l'invention de l'imprimerie à caractères mobiles par Johannes Gutenberg au XV<sup>e</sup> siècle. Au XVII<sup>e</sup> siècle, la gravure sur bois est devenue courante pour imprimer illustrations et textes. Le XIX<sup>e</sup> siècle a vu l'introduction de presses mécaniques pour une production plus rapide de journaux et de livres. Au XX<sup>e</sup> siècle, l'avènement de l'impression numérique a révolutionné l'industrie en permettant une personnalisation à grande échelle. Chaque étape a marqué une avancée significative dans la diffusion de l'information et de la créativité au travers de la technologie d'impression.

La fabrication additive dans l'électronique plus connue sous la dénomination d'électronique imprimée est un domaine relativement récent qui tire profit des techniques d'impression précédemment citées pour fabriquer des composants électroniques sur divers supports.

L'évolution de l'électronique imprimée a suivi une trajectoire ascendante à travers les décennies. Tout a commencé dans les années 1960 et 1970 où des chercheurs ont entrepris des expérimentations avec des matériaux organiques conducteurs pour créer des composants électroniques. Cependant, ces débuts ont été marqués par des performances limitées. Les années 1980 ont été témoins d'une étape clé avec l'émergence de matériaux conducteurs plus avancés. Des avancées significatives ont été réalisées dans la synthèse de matériaux organiques conducteurs, comme les polymères conducteurs et les matériaux semi-conducteurs organiques. Cela a ouvert la voie à leur utilisation dans des applications électroniques. La décennie suivante, les années 1990, a été marquée par le développement d'encres conductrices spécialement conçues pour l'impression. Ces encres contenaient des particules de métaux conducteurs ou des matériaux organiques conducteurs, contribuant ainsi à l'évolution de l'électronique imprimée. L'entrée dans les années 2000 a été caractérisée par l'adoption croissante de l'impression jet d'encre adaptée à l'électronique. Cette technologie a gagné en popularité en permettant d'imprimer des traces conductrices sur divers supports, tels que le papier, le plastique et le textile. Durant les années 2010, l'électronique imprimée a enfin trouvé son essor, trouvant des applications dans divers domaines tels que les étiquettes RFID, les capteurs imprimés, les dispositifs médicaux, les vêtements intelligents, les panneaux solaires flexibles, et bien d'autres secteurs prometteurs. Aujourd'hui, la recherche dans le domaine de l'électronique imprimée continue de manière active. Les scientifiques et les innovateurs s'efforcent d'améliorer les performances des composants imprimés, de développer de nouvelles applications et d'explorer des matériaux encore plus avancés, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles possibilités pour cette technologie passionnante.

La genèse de l'électronique imprimée est le résultat de décennies de recherche et d'innovation dans le domaine des matériaux et de la technologie d'impression.

### Avantages de la fabrication additive

L'électronique imprimée offre des avantages importants en termes de coût, de flexibilité de conception et de durabilité, ce qui en fait un domaine d'intérêt croissant pour diverses industries.

La fabrication additive est une technologie polyvalente. Elle réduit les déchets en créant des objets couche par couche, permet la personnalisation des produits, offre la possibilité de créer des formes complexes, réduit les coûts de développement, favorise la production à la demande, et assure la légèreté des pièces tout en maintenant leur résistance. De plus, elle réduit les délais de production, stimule l'innovation grâce à un prototypage rapide, convient aux petites séries de production, encourage la fabrication locale, permet la personnalisation de masse, offre plus de flexibilité dans la conception, et facilite l'intégration de multiples composants. Ces avantages font de la fabrication additive une technologie révolutionnaire aux multiples applications, précieuse dans de nombreuses industries, de l'aérospatiale à la médecine en passant par l'automobile, la joaillerie et l'électronique.

### Positionnement de l'électronique imprimée en microélectronique

À ce jour, dans le secteur de l'électronique, son objectif n'est pas de concurrencer les technologies et procédés de fabrication standard de la microélectronique. En effet, la complexité des dispositifs électroniques envisageables est limitée par la variété des matériaux disponibles et les dimensions minimales pouvant être atteintes. Cependant, il est important de noter que ces dernières années, des avancées significatives en recherche ont permis de proposer de plus en plus de solutions, tant d'un point de vue technique que scientifique, pour surmonter les obstacles mentionnés précédemment (1– 4).

La figure 1 met en évidence l'un des principaux avantages de la fabrication électronique par impression, à savoir la réduction des étapes de production. En effet, dans le processus classique de photolithographie utilisé en microélectronique, la création d'un motif à l'échelle micro ou même submicrométrique implique le dépôt d'un matériau (tel qu'un métal), suivi de sa gravure après enduction, insolation, et développement d'une résine photosensible. La résine agit comme un masque physique sélectif pour la gravure du matériau. La dernière étape consiste à graver la résine. Ce processus est qualifié de soustractif et nécessite l'utilisation de produits chimiques et d'eau de rinçage. En revanche, les procédés de fabrication dits additifs, comme les procédés d'impression, consistent à déposer une encre contenant un matériau (sous différentes formes telles que des colloïdes, des micro-feuillets, des polymères, etc.) qui se solidifie après un post-traitement, tel que le séchage naturel ou le frittage.

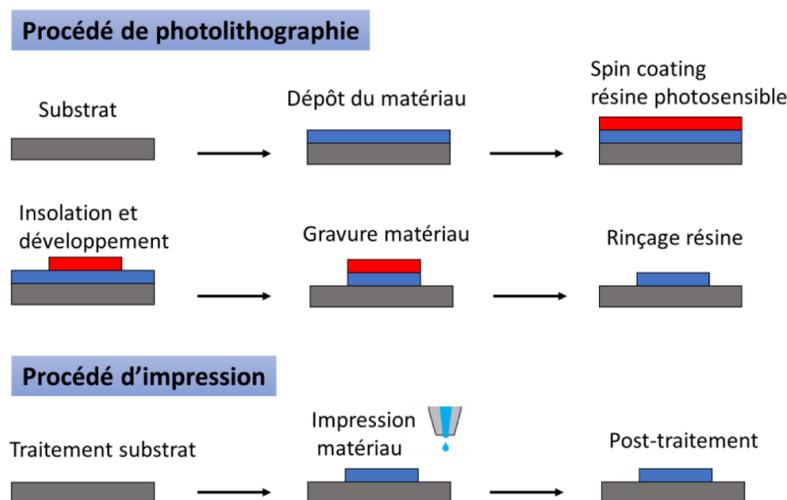


Fig.1. Comparaison entre les procédés de mise en forme d'une couche par photolithographie et par impression (5).

Il est évident qu'il y a un gain significatif en réduisant le nombre d'étapes, en éliminant les gravures et les rinçages (ce qui est bénéfique d'un point de vue environnemental) ainsi qu'en optimisant l'utilisation des matériaux, car ils sont déposés uniquement là où ils sont nécessaires. Cependant, comme précédemment mentionné, la plupart des technologies d'impression ont des limitations en termes de dimensions minimales obtenues, qui se situent généralement autour de quelques dizaines de microns (comme dans le cas de la sérigraphie).

### III. Contenu Pédagogique détaillé

Le module d'enseignement complet (3 jours) comporte trois volets. Une demi-journée est consacrée au cours et un jour et demi est consacré aux TP sur les équipements d'impression d'électronique par sérigraphie de l'IETR au sein de la plateforme nanoRennes (réseau CNRS Renatech+) via le Centre Commun de Microélectronique de l'Ouest. La dernière partie correspond aux tests électriques des capteurs réalisés. Ce module est déjà suivi, annuellement, par une quarantaine d'étudiants en première et deuxième année du Mastère MLAI parcours E.I.S.C (Électronique, Industrialisation et *Supply Chain*).

#### Cours avec l'ensemble de la promotion

Le premier volet consiste à introduire la fabrication additive pour l'électronique puis de la positionner par rapport à la fabrication de type soustractive communément utilisée en microélectronique. La section précédente de l'article synthétise les notions abordées dans la première partie du cours. La seconde partie du cours aborde de façon détaillée les technologies d'impression (avantages et limites), incluant les prérequis sur les matériaux pouvant être mis en œuvre. L'arborescence des technologies d'impression sur substrat plan 2D, peut être présentée comme illustrée dans la figure 2. Les techniques de dépôts sont nombreuses et peuvent être classées en deux grandes familles : avec ou sans contact.

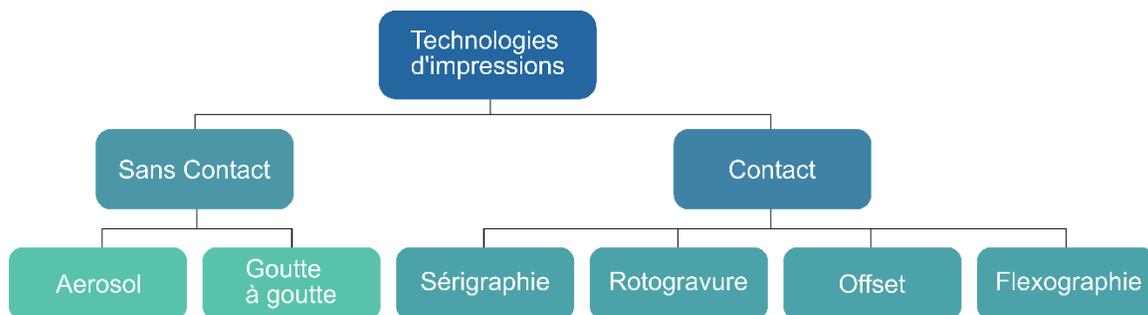


Fig.2. Classification des technologies d'impression en grandes familles. Plus d'information dans la partie bibliographique du manuscrit de thèse SJ Moon (6).

Chaque technique possède ses caractéristiques, certaines avantageant la cadence de production (e.g., la technologie rotogravure), d'autres la souplesse d'utilisation dans la phase de développement par la conception de masque logiciel facilement reconfigurable (e.g., la technologie goutte à goutte aussi appelé « *Drop On Demand* »).

La figure 3 ci-dessous montre un exemple d'impression jet d'encre de pistes métalliques sur une feuille (un substrat) de plastique biodégradable. Cet exemple illustre une des nouvelles possibilités qu'offre la fabrication additive pour la fabrication de PCB (*Printed Circuit Board*) flexible, i.e. l'utilisation de nouveaux substrats, puisque le matériau, ici du métal, est déposé localement sans utilisation de bain chimique.

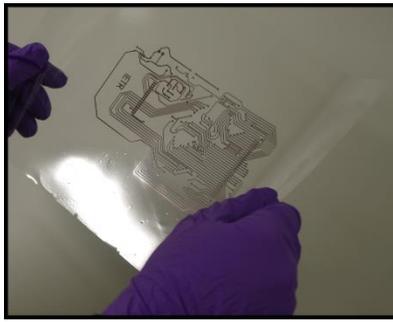


Fig.3. Exemple d'impression de lignes conductrices par technologie d'impression gouttes à gouttes sur un film plastique biodégradable.

### Le dernier point abordé dans le cours porte sur l'électronique 3D

En marge de l'électronique imprimée en 2D, d'autres formes d'électronique directement imprimée en 3D ont vu le jour depuis quelques années. Nous pouvons citer : l'impression par dispense d'une encre conductrice en sortie de seringue (7), la stéréolithographie, la technologie « *Laser Direct Structuring* », l'impression hydrographique (8 - 11), ...

La figure 4 ci-dessous montre un exemple de technologie brevetée en cours de développement à l'IETR dénommée « *water transfer printing* », permettant de transférer de façon additive de l'électronique sur un objet 3D pouvant être lui-même fabriqué additivement (12).

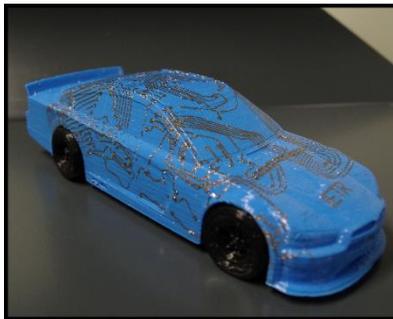


Fig.4. Exemple d'impression de lignes conductrices en 3D par la technologie de transfert hydrographique.

A l'issue du cours, les étudiants ont pu appréhender les notions de fabrication soustractive et additive, connaissent la genèse et l'état de l'art de l'électronique imprimée.

### Travaux pratiques en petits groupes (6 étudiants) : partie fabrication

Le deuxième volet du module consiste à réaliser, lors des séances de travaux pratiques, des dispositifs multicouches par sérigraphie, tels que celui illustré en figure 5. La plateforme nanoRennes de l'IETR s'est dotée de l'ensemble de la chaîne de production permettant la sérigraphie de dispositifs électroniques, grâce au soutien financier du CPER MAT&TRANS, de Rennes Métropole et du CNFM. Cette chaîne comprend la conception assistée par ordinateur (CAO) des dispositifs électroniques multicouches, l'insolation et la révélation des écrans, l'équipement de sérigraphie semi-industriel, le nettoyage des écrans et les tests des dispositifs.

Au cours de ces travaux pratiques, les étudiants créent un écran de sérigraphie de grande taille (75\*85 cm), impriment des dispositifs résistifs multicouches sur un substrat plastique flexible, puis les soumettent à des tests électriques sous contraintes mécaniques, en différentes conditions de température et d'humidité.

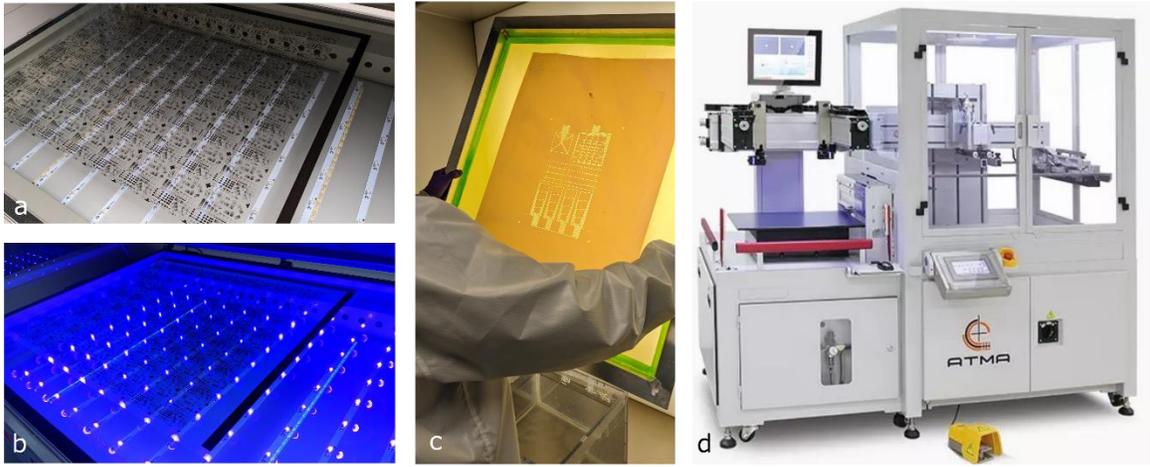


Fig.5. Principales étapes et équipements à disposition des étudiants lors du TP. a) châssis d'insolation LED *LuxDryer* avec typons sur la vitre protectrice, b) châssis d'insolation LED en fonctionnement, c) écran après développement, d) équipement de sérigraphie avec alignement automatique (ATMA MF44).

Le TP est constitué de plusieurs étapes qui sont détaillées ci-dessous

- Etape 1 : Fabrication de l'écran

Des notions scientifiques et techniques sont tout d'abord transmises par l'encadrant de TP concernant le choix des écrans, telles que le matériau les constituant (nylon ou inox), l'orientation du maillage, la taille des ouvertures régissant le volume d'encre déposé, et la tension du maillage. La qualité de fabrication des écrans dans le processus de sérigraphie est l'étape clé permettant d'obtenir une qualité optimale des motifs après impression. Cette étape est donc cruciale et requiert un savoir-faire dans la pose du film capillaire. Si ce dernier n'est pas correctement posé en raison d'un écran mal dégraissé ou légèrement abrasé, le capillaire se détache complètement ou en bordure des motifs. Dans un premier temps, les étudiants se familiarisent avec la pose d'un film capillaire sur des écrans de petites dimensions (10 cm \* 10 cm), puis de plus grandes dimensions, et ainsi prennent conscience des défis liés à l'échelle. Le film capillaire utilisé est la référence SAATI DCF 1-22 (22  $\mu$ m d'épaisseur).

Après la pose des capillaires, les écrans sont exposés à la lumière (figures 5a et 5b) à l'aide du châssis LED, puis développés à l'eau DI. **Les notions de sur-exposition et de sous-exposition des écrans sont abordées lors de cette étape.** La figure 5c montre un écran après les étapes de pose du film capillaire, d'exposition et de développement.

- Etape 2 : Réalisation de dispositifs résistifs par sérigraphie

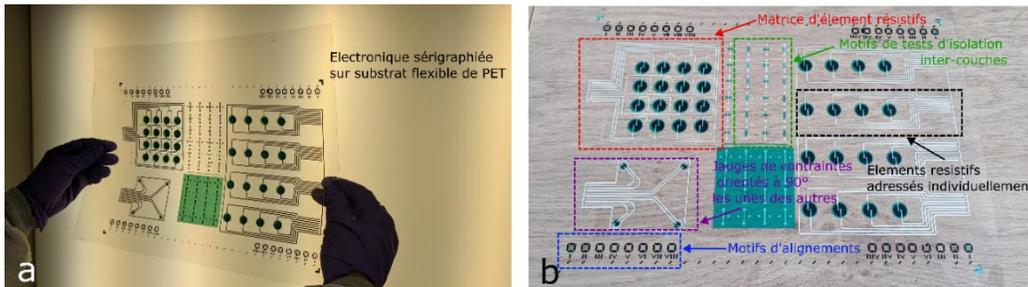


Fig.6. Dispositifs résistifs multicouches sérigraphiés sur substrats flexibles. a) illustration de la transparence et du format grande surface (A4 dans le cadre du TP), b) schéma d'implantation des dispositifs.

La figure 6 présente les dispositifs réalisés sur un substrat en plastique de type PET, d'une épaisseur de 125  $\mu\text{m}$  et au format A4. La figure 6b détaille l'ensemble des dispositifs réalisés et se décompose comme suit :

- une zone indiquée en bleu sur la figure 6b, comporte des motifs d'alignement, à l'image de ce qui est également pratiqué dans les procédés microélectroniques. L'équipement ATMA MF44 est doté d'un système de visualisation et d'alignement automatique, permettant aux étudiants d'observer en direct les étapes d'alignement. En parallèle, l'enseignant illustre le concept et la méthodologie au tableau (la rotation de l'échantillon pour obtenir une symétrie au niveau des motifs d'alignement entre les deux objectifs, suivie de translations selon les axes x et y).
- une zone indiquée en vert, comporte des motifs de tailles variables nécessaires pour effectuer des tests d'isolation électrique entre couches conductrices. Ces motifs sont donc d'un empilement de 3 couches dans l'ordre suivant : une couche conductrice d'argent (Encre d'argent : Speedy Cure HF ; VFP Ink), d'un vernis diélectrique UV (Référence ECV003 ; VFP Ink), d'une couche conductrice d'argent. Des tests tension-courant peuvent être effectués afin de qualifier la capacité d'isolation de la couche de vernis en fonction des paramètres expérimentaux (Dose UV, nombre de couches, température et temps de recuit, etc.).
- une zone est indiquée en noire ou les éléments résistifs sont adressés individuellement. La couche résistive est en carbone (Ref : Carbone Electron, VFP Ink), la géométrie de cet élément (valeur de la résistance) est définie par l'espacement et la surface en vis-à-vis des électrodes d'argent, ici maintenus constants avec un ratio longueur\*largeur égale 2mm\*1mm.
- une zone indiquée en violet comporte les éléments résistifs arrangés à 90° les uns des autres. Cette configuration est pertinente lorsque les éléments résistifs sont utilisés en tant que capteur de contraintes. En effet, en fonction de l'orientation de la déformation mécanique, les capteurs n'auront pas la même intensité de réponse.
- une zone en rouge comporte les capteurs adressés matriciellement (16 éléments résistifs : 4 lignes \* 4 colonnes). Cette configuration nécessite l'empilement de 4 couches fonctionnelles comme suit :
  - o Couche 1 : élément résistif en carbone (Réf. Carbone Electron, VFP Ink),
  - o Couche 2 : pistes conductrices en argent définissant la géométrie (longueur et largeur : 2 mm \* 1 mm) de l'élément résistif (Encre d'argent : Speedy Cure HF ; VFP Ink).
  - o Couche 3 : vernis diélectrique (Référence ECV003, VFP Ink) assurant l'isolation inter-métal avec une ouverture circulaire (diamètre 1 mm) permettant la reprise de contact (*via*).
  - o Couche 4 : pistes conductrices en argent (Référence : Speedy Cure HF) partant des *via* et allant vers le connecteur (FPC Molex série Easy On), non représenté sur la figure 6.

La réalisation entière des dispositifs (les 4 couches) nécessite 3 jours. Le TP ne durant que 1,5 jours, les étudiants réalisent deux couches (argent et diélectrique). Ces deux couches sont choisies car la méthode de « post process » des encres est radicalement différente. L'encre d'argent est une encre à base de particules qui devient conductrice après frittage en température (120°C pendant 5 minutes) et l'encre diélectrique polymérique réticule par un traitement UV. Ceci permet aux étudiants de s'initier à des techniques et des phénomènes physiques différents (polymérisation et frittage) avec des encres ayant des fonctions électroniques antinomiques, à savoir un conducteur et un isolant.

## Partie « caractérisation » des dispositifs résistifs sérigraphiés en tant que capteurs

Les caractérisations s'effectuent sur des dispositifs comportant toutes les couches. Trois types de caractérisations sont effectués. En effet, les performances de l'élément résistif en tant que capteur de température, d'humidité et de jauge de contraintes sont évaluées. L'ensemble des caractérisations s'effectue par un test courant-tension via un analyseur de paramètres B1500 Agilent. Des notions théoriques sont abordées sur le fonctionnement des capteurs, en particulier pour les jauges de contraintes, et pour la détermination des performances des capteurs, en particulier par le calcul des différentes sensibilités de détection.

### ○ Capteurs d'humidité et de température

Les capteurs d'humidité et de température sont parmi les plus communs dans notre vie quotidienne et constituent donc un bon support pédagogique.

Les capteurs d'humidité flexibles et conformables basés sur de l'encre de carbone ont été testés avec différents niveaux d'humidité (de 40 % RH à 90 % RH). La caractérisation de détection de l'humidité du capteur en carbone est réalisée en le plaçant à l'intérieur d'une enceinte climatique (Binder MKF115) à une température constante de 25 °C. La réponse  $\Delta R/R_0$  (%) du capteur d'humidité est calculée par  $\Delta R = R_H - R_0$ , où  $R_H$  représente la résistance à une humidité spécifique (de 40 % RH à 90 % RH) et  $R_0$  est la résistance de référence du capteur en carbone obtenue à 40 % RH."

Comme le montre la Figure 7a, le capteur d'humidité au carbone repose sur un mécanisme de détection résistive. La résistance des capteurs d'humidité augmente simultanément avec le taux d'humidité (% RH). Les étudiants déduisent du tracé la sensibilité (S) du capteur :

$$S=0,034\%/ \%RH.$$

Des capteurs résistifs métalliques réalisés en encre d'argent sont également testés en température. Cette température varie par palier de 20° à 80° à taux d'humidité fixe de 50%. Lors de cette expérience, on observe bien une augmentation de la résistance avec la température (Fig.7.d.). Le tracé de cette variation montre un capteur de type linéaire (Fig.7.c), et conduit à une sensibilité de 0,24%/°C.

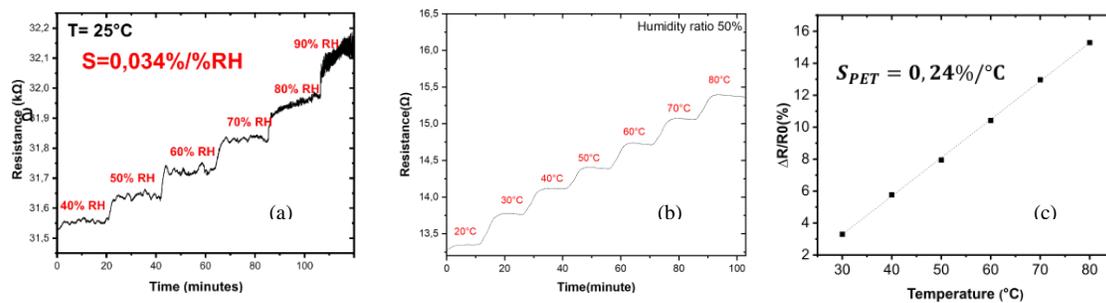


Fig.7. Dispositifs résistifs testés en humidité (a), température (b et c).

### ○ Capteurs mécaniques de type jauges de contrainte

Au cours de ces expérimentations, les étudiants se familiarisent avec la caractérisation électrique d'un capteur soumis à déformation et appréhendent les notions de base d'un capteur de déformation.

Les capteurs à jauges de contrainte sont largement utilisés dans les systèmes de surveillance de l'état des structures (SHM) car ils sont peu coûteux, faciles à installer et suffisamment sensibles pour détecter une défaillance structurelle et un risque potentiel d'effondrement dans divers objets, bâtiments ou structures (13). Comme l'effet le plus couramment utilisé dans les capteurs à jauges de contrainte est la piézorésistivité, les capteurs fabriqués dans ce travail sont basés sur cet effet. Il s'agit de la variation de la résistance électrique lorsqu'une contrainte mécanique est appliquée. L'effet peut être expliqué en utilisant l'expression de la résistance de la formule [1].

$$R = \rho \times \frac{L}{S} \quad [1]$$

où ( $\rho$ ) est la résistivité, ( $L$ ) correspond à la longueur et ( $S$ ) est la surface du matériau capteur. Lorsqu'un matériau est déformé par une contrainte mécanique appliquée, un changement électrique se produit et la valeur de la résistance varie.

Pour quantifier la sensibilité d'un matériau à la contrainte, le facteur de jauge (GF) est déterminé par la formule [2]. Il est formé de deux composantes clés : la distribution géométrique ( $1+2\nu$ ) et la variation de la résistivité en fonction de la contrainte ( $(\Delta\rho/\rho)/\varepsilon$ ), où  $\nu$  est le coefficient de Poisson,  $\rho$  est la résistivité et  $\varepsilon$  est la contrainte axiale appliquée.

$$GF = \frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\nu) + \frac{\Delta\rho}{\rho} \quad [2]$$

Dans le cas de la jauge de contrainte métallique, GF est généralement faible (11) car la résistivité des fils métalliques ne varie pas significativement avec la contrainte. Par conséquent, la formule peut être écrite comme suit :

$$GF = \frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\nu) \quad [3]$$

Les tests de caractérisation consistent à soumettre les dispositifs à divers rayons de courbure et à déterminer leur sensibilité à la déformation à l'aide de la formule (14) :

$$\varepsilon = \pm \frac{d_f + d_s}{2 \times R_c} \quad [4]$$

où  $d_f$  et  $d_s$  sont respectivement l'épaisseur de l'encre et du substrat, et  $R_c$  est le rayon de courbure. Le signe plus ou moins dépend de la contrainte appliquée (tension ou compression).

Pour illustrer la théorie des jauges de contraintes, deux types de capteurs de déformation sont exploités, des capteurs à base d'encre d'argent et des capteurs à base d'encre de carbone.

Les mesures sous contrainte sont illustrées dans la figure 8. La réponse  $\Delta R/R_0(\%)$  du capteur de jauge de contrainte en carbone ou en argent est tracée en fonction de la contrainte mécanique  $\varepsilon$  (%), (cf. figure 8), avec  $\Delta R = R_s - R_0$ ,  $R_s$  étant la résistance à une valeur de contrainte spécifique (ou une valeur de  $R_c$ ), et  $R_0$  étant la résistance en position plate. La figure met en évidence que la valeur de GF est de l'ordre de 15 pour un capteur en carbone, bien supérieure à celle d'un capteur en argent, qui est de l'ordre de 2, démontrant ainsi les potentialités de ce matériau en termes de sensibilité à la déformation.

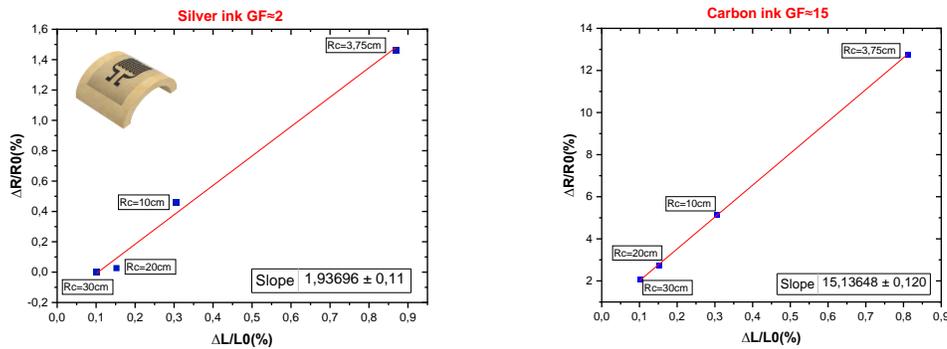


Fig.8. Caractérisation et résultats des jauges de contraintes en argent ou en carbone. Les différents rayons de courbure ( $R_c$ ) sont reportés sur les courbes, et les facteurs de jauge sont déterminés et indiqués au dessus des courbes.

## IV. Conclusion

En conclusion, le module d'enseignement sur la sensibilisation à l'électronique flexible et la sérigraphie par la réalisation de capteurs, dispensé à l'IETR sur la plateforme nanoRennes via le CCMO, à destination d'un public d'apprenant en études supérieures permet d'appréhender de nombreuses notions dont les notions de base en électronique imprimée. Il se veut à la fois théorique avec une partie cours, et pratique lors de séances en petits groupes avec des équipements semi industriels de fabrication et de tests. Ce TP est en phase avec les demandes des acteurs socio-économiques de former des personnes qualifiées dans un secteur industriel clef en France et qui constitue une des priorités actuelles.

## Remerciements

Ce TP n'aurait pu être mis en place sans :

- - les infrastructures et les compétences des personnels impliqués sur la plateforme NanoRennes membres du réseau RENATECH+ labélisé par le CNRS.
- - les financements pour l'achat des équipements émanant du CPER MAT&TRANS, de Rennes Métropole via le dispositif d'aide à l'acquisition d'équipements scientifiques, du GIP CNFM via le CCMO et l'action TPs innovants incluse notamment dans le projet INFORISM (ANR-23-CMAS-0024).
- - le GIP campus esprit dans le cadre du projet ESLAP.

## Références

1. Y. Bonnassieux, *et al.* The 2021 flexible and printed electronics roadmap. *Flexible and Printed Electronics* **6**, 023001 (2021).
2. P. Martins, *et al.* Advances in Printing and Electronics: From Engagement to Commitment. *Advanced Functional Materials* 2213744 (2023).
3. A. Bastola, *et al.* Formulation of functional materials for inkjet printing: A pathway towards fully 3D printed electronics. *Materials Today Electronics* 100058 (2023).
4. C. S. Buga, & J. C. Viana, A review on materials and technologies for organic large-area electronics. *Advanced Materials Technologies* **6**, 2001016 (2021).
5. M. Robin, Développement de transistors à effet de champ organiques et de matériaux luminescents à base de nanoclusters par impression à jet d'encre. (Université Rennes 1, 2017).
6. S. J. Moon, Development of inkjet printing technology for fully solution process dedicated to organic electronic circuits. (Rennes 1, 2020).

7. H. W Tan, Y. Y. C. Choong, C. N.Kuo, H. Y. Low, & C. K.Chua, 3D printed electronics: Processes, materials and future trends. *Progress in Materials Science* **127**, 100945 (2022).
8. B. Le Borgne, E. Jacques, & M. Harnois, The use of a water soluble flexible substrate to embed electronics in additively manufactured objects: From tattoo to water transfer printed electronics. *Micromachines* **9**, 474 (2018).
9. B. Le Borgne, *et al.* Eco-friendly materials for daily-life inexpensive printed passive devices: Towards “Do-It-Yourself” electronics. *Electronics* **8**, 699 (2019).
10. R. Rogel, B. L. Borgne, T. Mohammed-Brahim, E. Jacques & M. Harnois, Spontaneous buckling of multiaxially flexible and stretchable interconnects using PDMS/fibrous composite substrates. *Advanced Materials Interfaces* **4**, 1600946 (2017).
11. R. Selmi, J.-C. Fustec, M. Harnois & F. Bihan, Organic and Metallic Sensors on Complex 3-D Object Using an Original Method: Water Transfer Printing. *IEEE Sensors Letters* **7**, 1–4 (2023).
12. M. Harnois, M., J. Emmanuel & B. Le Borgne, *Solvent transfer printing method.* (2022).
13. I. Kang, M.J. Schulz, J.H. Kim, V. Shanov, V. & D. Shi, A carbon nanotube strain sensor for structural health monitoring. *Smart materials and structures* **15**, 737 (2006).
14. H. Gleskova, S. Wagner, & Z. Suo, Failure resistance of amorphous silicon transistors under extreme in-plane strain. *Applied Physics Letters* **75**, 3011–3013 (1999).