

Electronique imprimée : une ouverture aux nouvelles technologies

Rafika Selmi^{1,2}, Thibault Boisseau¹, Jean-Charles Fustec¹, David Gonzalez Ovejero¹,
Stéphane Avrillon³, Franck Colombel³, Jamal Rammal⁴,
Laurent Pichon¹, Maxime Harnois¹, France Le Bihan^{1,2*}

¹ IETR UMR CNRS 6164 et pôle CNFM de Rennes (CCMO), Campus Beaulieu, Rennes

² IUT département GEII, 3 rue du Clos Courtel, Rennes

³ ESIR, Université de Rennes, Campus de Beaulieu, Rennes

⁴ ESTI Ecole Supérieure des Technologies Industrielles – GIP CEI, Redon

*Auteur de correspondance : France.lebihan@univ-rennes.fr

Résumé : *L'électronique imprimée se développe et permet d'adresser de nouvelles applications en particulier en électronique souple ou 3D. Dans ce contexte fortement lié à nos travaux de recherche, et bénéficiant de matériels semi-industriels, il nous a semblé important de sensibiliser les étudiants en électronique à ces nouvelles technologies et nouveaux savoirs. Nous proposons des formations adaptées à différents parcours en électronique et aux attentes des étudiants et enseignants, qui permettent d'acquérir une vision plus précise des potentialités de ces technologies, de leurs applications industrielles et grand public, ainsi que des défis à relever. L'objectif est de permettre aux étudiants de se former sur des machines d'impression, de façon à appréhender les contraintes et les possibilités de fabrication de circuits électroniques simples. Concrètement, les étudiants sont amenés à manipuler sur une machine d'impression de type jet d'encre, ainsi qu'une machine de sérigraphie pour la réalisation de pistes métalliques, ainsi que de résistances bicouches utilisées comme capteurs de déformation. La formation est finalisée par une caractérisation électrique des éléments fabriqués. Plusieurs cohortes d'étudiants issus de formations différentes ont été impliquées. Pour chacun de ces parcours, le contenu de la formation, pratique et théorique est adapté en fonction du public concerné. L'acquisition des compétences développées est évaluée par un examen de type QCM pour les formations courtes, ou la rédaction d'un rapport de synthèse.*

Mots clés : Electronique imprimée, substrats souples et variés, sérigraphie, jet d'encre, capteurs de déformation.

Abstract: Printed electronics: an introduction to new technologies

Printed electronics is developing and enabling new applications, particularly in flexible and 3D electronics. In this context, which is closely linked to our research work and benefits from semi-industrial equipment, we felt it was important to raise awareness of these new technologies and new knowledge among electronics students. We offer training courses tailored to different electronics courses and to the expectations of students and teachers, which provide a more precise overview of the potential of these technologies, their industrial and consumer applications, and the challenges to be overcome. The aim is to enable students to learn how to use printing machines so that they can understand the constraints and possibilities of manufacturing simple electronic circuits. In practical terms, students are required to use an inkjet printing machine and a screen-printing machine to produce metal tracks and double-layer resistors used as strain sensors. The training is completed with an electrical characterization of the manufactured components. Several cohorts of students from different backgrounds have been involved. For each of these courses, the practical and theoretical content of the training is adapted to the target audience. The acquisition of the skills developed is assessed by a multiple-choice exam for short courses, or by writing a summary report.

Keywords: Printed electronics, flexible substrates, screen printing, inkjet printing, strain sensors.

1. Introduction

L'électronique se diversifie et est en constante évolution, aussi bien du point de vue des technologies mises en œuvre que des applications. Les étudiants doivent, en plus de leur formation de base en électronique, être sensibilisés à ces innovations. En particulier, de plus en plus de technologies utilisent des matériels d'impression, permettant de réaliser de l'électronique sur des substrats de type plastique, en lien avec les nouveaux enjeux applicatifs de type électronique souple, 3D, sur objet pour l'IoT (Internet des objets, objets connectés), etc. La formation à ces technologies est peu développée car les matériels utilisés pour ces technologies sont coûteux et souvent peu accessibles ou disponibles. Or, l'IETR [1] (Institut d'Electronique et des Technologies du numéRique) de l'Université de Rennes dispose de ces équipements, qui sont bien adaptés pour pouvoir les former aux technologies non conventionnelles telle que l'électronique imprimée [2]. Les formations courtes que nous proposons dans ces domaines permettent à la fois de sensibiliser les étudiants sur ces nouvelles technologies, en leur apportant, suivant leur cursus et leurs compétences, des informations scientifiques sur ces nouveaux procédés, les secteurs visés et les applications potentielles, aussi bien pour l'industrie que pour le grand public. Cette présentation classique s'accompagne d'une réelle prise en main de nos équipements d'électronique imprimée, et une mise en œuvre à travers des réalisations simples.

2. Formations proposées

2.1. Equipements et contenus scientifiques

Les enseignants chercheurs et chercheurs impliqués dans ces thématiques effectuent leur recherche au sein du département OASiS (Organic And Silicon Systems) de l'IETR [1] (Institut d'Electronique et des Technologies du numéRique), situé sur le campus qui abrite plusieurs formations en électronique. Ce département est spécialisé dans la fabrication de composants et de capteurs électroniques sur des substrats non conventionnels, notamment sur des substrats souples, plastiques, papiers, 3D, biosourcés, etc. Ces développements nécessitent des matériaux et des technologies spécifiques, en particulier des matériaux organiques, des technologies d'impression.

Dans ces thématiques, le laboratoire dispose d'équipements performants, utilisés pour développer des programmes de recherche, mais également mis à disposition pour la formation des étudiants en électronique. Des équipements d'impression de type jet d'encre (drop-on-demand) et de sérigraphie ont été acquis lors des derniers CPER (Contrats Plan Etat Région) pour le développement d'une électronique sur substrat souple, ou transférable sur support 3D.

Ces technologies sont intéressantes car elles sont additives, ce qui les rend plus simples à mettre en œuvre que les technologies classiques car moins consommatrices en matériaux. Elles entraînent, lors de la fabrication, une bien moindre consommation d'électricité, compte tenu des températures de procédés (souvent ambiantes) utilisées. Elles ont toutefois des limites, et ne se positionnent pas en concurrence avec les technologies classiques de la microélectronique mais en complément, pour ouvrir à de nouvelles applications.

Nous disposons de ces deux technologies complémentaires, l'impression par jet d'encre et la sérigraphie. Un résumé de ces procédés ; montré en figure 1, permet de comprendre les méthodes utilisées.

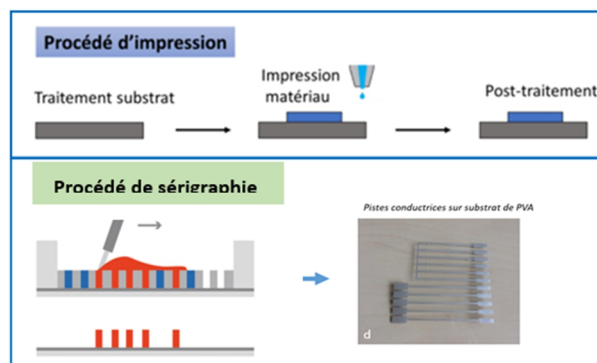


Figure 1. Schéma des procédés d'impression par jet d'encre et par sérigraphie.

L'impression par jet d'encre est une technologie qui reste peu connue des étudiants en électronique, mais correspond toutefois à l'idée qu'ils peuvent avoir des nouvelles technologies. Dans ce cas, le matériau conducteur ou isolant est projeté directement sur un substrat sous forme de points, et selon un schéma géométrique global défini par l'utilisateur. La sérigraphie, bien qu'étant une technologie ancienne utilisée depuis longtemps dans les arts graphiques et dans le domaine de l'électronique imprimée, bénéficie aujourd'hui d'une nouvelle diversité d'encres et d'un dynamisme croissant chez les fournisseurs. Cela ouvre la voie à de nouvelles applications que nous avons mises en œuvre sur divers substrats lors de nos travaux scientifiques. En partant d'observations issues de notre recherche, nous avons développé une électronique originale ainsi que divers capteurs électroniques. Nous avons transposé ces éléments pour illustrer les

nouvelles possibilités et les potentialités de l'électronique souple, ainsi que la versatilité des applications qui répondent aux grands défis actuels, tels que l'électronique durable, l'électronique biosourcée et respectueuse de l'environnement, et les solutions frugales.

Ces méthodes sont également intéressantes pour introduire des aspects de technologies de capteurs sur substrats souples ou 3D pour des applications en santé, environnement, smart devices, objets connectés, etc. Des exemples de réalisations par sérigraphie, transférées en 3D sont illustrés en figure 2, pour prouver qu'il est possible de réaliser de l'électronique sur des surfaces 3D complexes et de natures et géométries différentes et montrer une bonne conformabilité, sans rupture, sur les objets.



Figure 2. Réalisations par sérigraphie puis transfert en 3D.

D'une manière générale, ces thématiques sont en forte résonance pour les jeunes et les étudiants en électronique. Même si ces technologies ne sont pas immédiatement matures et applicables pour le secteur public, elles sont chargées de promesses et d'innovation pour les décennies à venir.

C'est dans cet esprit que nous avons proposé d'ouvrir la formation à différents profils d'étudiants sur ces technologies simples, en devenir.

Parmi les deux technologies d'électronique imprimée présentes au laboratoire, et qui sont représentées en figure 3, l'accent est en priorité mis sur la sérigraphie pour la simplicité de sa mise en œuvre.

Nous disposons d'une machine semi industrielle de type ATMA (ATMAOE MF 44), qui permet de travailler sur des grandes surfaces d'impression (40*40cm).

Après une présentation générale des technologies mises en œuvre et des évolutions de l'électronique, des éléments concrets, utilisant la sérigraphie, peuvent être, sur de courtes périodes, fabriqués, transposés sur des objets ou dans des matériaux et caractérisés. Ces technologies donnent alors des pistes concrètes sur ce que peuvent représenter les évolutions technologiques prochaines et ouvrent le champ des possibles. La mention des brevets déposés sur les applications de ces technologies assoit la faisabilité et la réalité de leurs potentialités et conforte l'étudiant dans l'intérêt qu'il peut porter à cette formation, en tant qu'ouverture scientifique, mais également en tant que possible évolution et développement industriel.

Pour la sérigraphie, l'encre est déposée sur un écran composé d'un maillage troué suivant un design électrique prédéfini. Une raclette vient ensuite automatiquement se déplacer de façon à étaler l'encre et l'imprimer sur le substrat placé en dessous. Le résultat est ensuite transféré sous une caméra (à gauche de la machine sur la figure 3 et permet de vérifier la bonne impression, ou de repositionner correctement le film pour faire un alignement si deux couches sont nécessaires. Le procédé est très simple, mais peut devenir plus complexe si le substrat utilisé est plus hydrophobe ou si le mouillage est mauvais, ce qui peut provoquer un décollement de la couche. Les procédés de fabrication par sérigraphie (figure 4) permettent de faire également un focus sur les encres utilisées et leurs propriétés électriques, ainsi que sur la

technologie, en particulier la mise en œuvre d'écrans spécifiques et leur utilisation lors de la réalisation de structures électroniques.

Pour l'impression par jet d'encre, les paramètres importants, outre la mouillabilité du substrat, sont essentiellement la distance entre les gouttes imprimées, ou les paramètres d'éjection des gouttes, permettant d'obtenir une couche continue. Il faut donc, comme illustré en figure 5, agir sur les paramètres d'éjection de la goutte (pulse), vérifier la taille et la reproductibilité des gouttes imprimées (splat) et le recouvrement des gouttes pour une bonne géométrie finale.

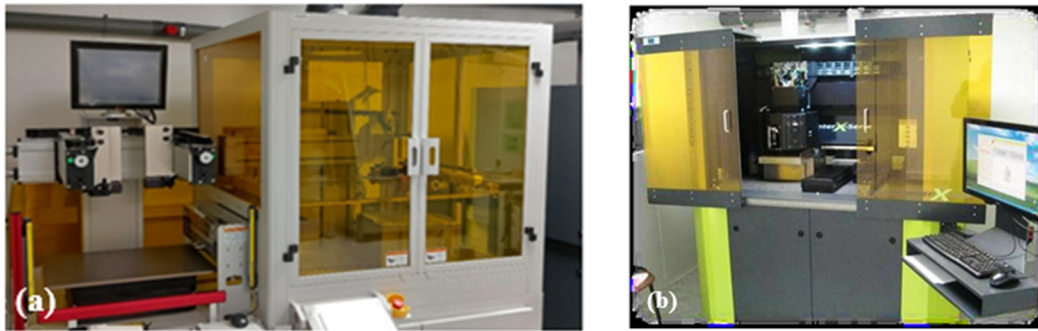


Figure 3. Machines de sérigraphie (a) et d'impression jet d'encre (b).

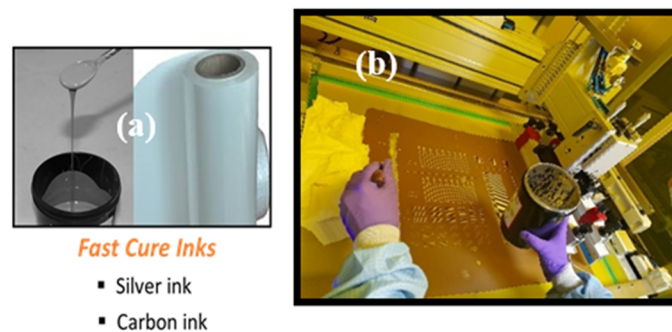


Figure 4. Procédés de sérigraphie : (a) exemple d'encre d'argent et de substrat plastique, (b) étalement de l'encre sur le côté de l'écran représentant les motifs à imprimer (cette encre sera ensuite étalée sur l'écran de manière programmée par le déplacement de la raclette).

En fonction des formations, nous proposons des sessions pratiques en sérigraphie, en impression jet d'encre, ou les deux. Ces deux équipements sont situés dans la même pièce, ce qui facilite leur utilisation.

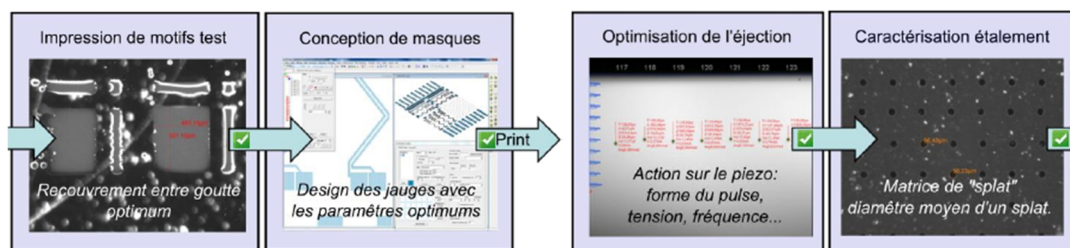


Figure 5. Illustration du procédé d'impression par jet d'encre et démarche permettant la qualification d'une encre, d'un substrat et l'optimisation de la conception des motifs désirés.

2.2.Fabrications

Les principales étapes de la fabrication par sérigraphie de dispositifs monocouches (résistance, capteur résistif), sont la réalisation d'un écran, suivie de l'étape de sérigraphie proprement dite, puis le post-traitement (recuit) des échantillons. Notre technologie permet de traiter de grands substrats et de réaliser de nombreux composants en une seule étape du procédé.

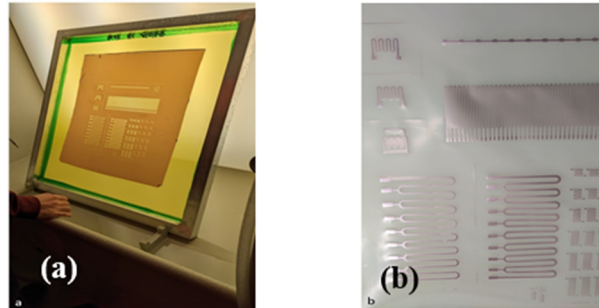


Figure 6. Ecran pour la réalisation de dispositifs (a) et résultat obtenu (b) après impression par sérigraphie sur un film plastique.

Les technologies les plus simples sont des technologies monocouches, permettant de réaliser des résistances sur différents substrats, notamment le polymère de type PET (polytéréphtalate d'éthylène). Elles utilisent de l'encre d'argent, très conductrice, ou des encres de carbone, plus résistives mais plus sensibles aux déformations, les rendant intéressantes pour fabriquer des jauges de contraintes de manière simple.

Une autre possibilité que nous privilégions est de réaliser des structures bicouches, avec une couche sensible en encre de carbone, et les contacts réalisés en encre d'argent. Ceci permet de montrer et de mettre en œuvre les techniques d'alignement entre les 2 couches, garantissant la réalisation correcte des structures. Dans ce cas, la première couche de carbone est réalisée en amont de la formation, de manière à optimiser le temps de fabrication et laisser du temps pour la partie caractérisation.

Un suivi de process est réalisé par une mesure électrique de résistance, en fin d'étape de sérigraphie et après post traitement par recuit. Ceci permet de valider les réalisations et de montrer l'importance des post-traitements. Ces structures, montrées en figure 7, permettent également, de par leurs géométries, de réaliser des jauges de contraintes qui seront ensuite caractérisées.

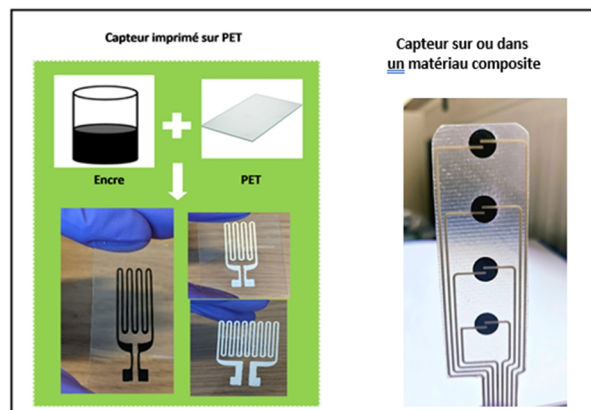


Figure 7. Résistances / jauges de contraintes réalisées avec différentes encres (carbone noir et argent) en technologie monocouche ou bicouche (à droite).

Pour la partie impression par jet d'encre, les étudiants sont sensibilisés aux aspects théoriques de cette technologie, puis aux paramètres clés permettant de réaliser une impression correcte, ainsi que les limites de cette technologie, en particulier en termes de dimensionnels.

Une fabrication simple de géométrie de contact sur substrat PET permet d'illustrer les problématiques de mouillage, de recouvrement, de discontinuité, etc., comme illustré en figure 8.

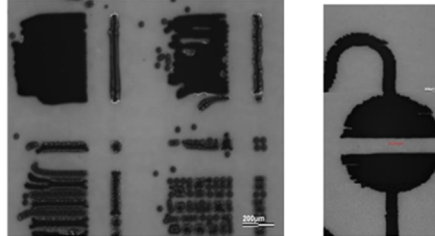


Figure 8. Résultats obtenus par impression jet d'encre illustrant un mauvais réglage des paramètres technologiques et des phénomènes observés (mouillage, discontinuités des motifs).

2.3.Caractérisations

Des caractérisations électriques sont effectuées en cours de fabrication des structures imprimées par sérigraphie, en particulier le suivi des résistances avant et après recuit thermique. Pour les structures finalisées, nous avons la possibilité d'utiliser une caractérisation électrique plus poussée, à travers une mesure courant / tension et un programme dédié sous Labview, ou en utilisant un analyseur de paramètres B1500 de chez Keithley. Ces éléments servent à la caractérisation des résistances, ainsi qu'à celles des jauges de contraintes sous différentes déformations. Nous disposons également d'une enceinte climatique permettant de réguler la température et l'hygrométrie.

La caractérisation la plus complète consiste à qualifier les jauges de contraintes réalisées. Des mesures sous différentes déformations ε calibrées permettent, compte tenu des éléments théoriques, rappelés ci-dessous, de déterminer le facteur de jauge (GF) pour différents matériaux.

$$GF = (\Delta R/R)/\varepsilon \quad (1)$$

$$\varepsilon = \pm (d_f + d_s)/(2 \cdot R_c) \quad (2)$$

Avec ΔR la variation de la résistance sous déformation et à plat, d_f l'épaisseur de la couche imprimée, d_s l'épaisseur du substrat, et R_c le rayon de courbure de la déformation.

Les gammes de résistances et les facteurs de jauge obtenus sont très dépendants des encres utilisées. Une illustration de déformation est proposée en figure 9. Un facteur de jauge intéressant (figure 9), de 30 environ, est obtenu pour les jauges de contraintes en carbone, sous certaines conditions de réalisation (dans un matériau composite), et permettent simplement une mesure précise des déformations. On peut également facilement montrer la variation de la résistance sous déformation manuelle.

La caractérisation électrique peut donc être ajustée en fonction du temps disponible, de la formation et de la curiosité des étudiants.

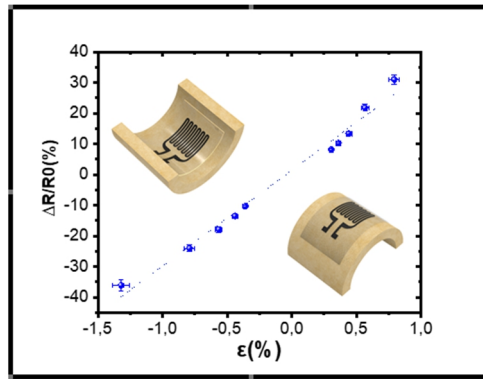


Figure 9. Caractérisation des jauges de contraintes et extraction du facteur de jauge GF (pente de la droite).

3. Formations concernées

La formation est mise en place et adaptée à des profils d'étudiants différents, et sur des durées variables. Celle-ci a particulièrement été mise en place pour :

- Des étudiants de BUT3 GEII en parcours Electronique et Systèmes embarqués, (1/2 journée)
- Des étudiants de l'ESIR (Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Rennes), en spécialité Systèmes Numériques et Réseaux en apprentissage, parcours Systèmes Numériques Sans Fil, (2 jours)
- Des étudiants en Mastere EISC, Option Électronique, Industrialisation et Supply Chain (EISC), du GIP CEI de Redon. (6 jours)

Pour les étudiants de BUT GEII qui ont choisi le parcours ESE (Electronique et systèmes Embarqués), un module d'ouverture recherche est mis en place, pour profiter de l'environnement favorable des enseignants du département GEII de l'IUT impliqués dans des travaux de recherche. Ainsi, les étudiants ont une ouverture vers les travaux du LTSI (laboratoire de traitement du Signal et de l'Image), spécialisé en traitement du signal pour le biomédical, et vers l'IETR, en particulier le département OASiS, impliqué dans la fabrication d'électronique sur substrat souple, les technologies en couches minces, l'électronique imprimée et la cybersécurité matérielle. Ce que nous proposons en lien avec ce document concerne spécifiquement la partie électronique imprimée et microcapteurs électroniques. La première partie consiste à décrire ces technologies et la physique des capteurs qu'il est possible de développer avec de l'électronique, en particulier imprimée. Les niveaux théoriques et la formation initiale des étudiants permettent de comprendre ces différents concepts. Une visite de la centrale de technologie et la découverte de différents échantillons dédiés à différentes applications complètent cette formation. Une partie de la formation est consacrée à la fabrication de capteurs résistifs par sérigraphie. Une démonstration est réalisée. Les capteurs sont ensuite testés sous contrainte et montrent la bonne sensibilité de détection pour un procédé de fabrication simple. Une ouverture vers un grand nombre d'applications possibles est ensuite discutée.

Les étudiants, immergés dans le laboratoire, sont réceptifs à cette formation et généralement curieux. Une évaluation sous forme de QCM est réalisée en fin de module. Deux cohortes ont été pour l'instant formées, représentant environ 15 étudiants.

Les étudiants de l'ESIR disposent d'une formation de 2 jours particulièrement centrée sur les aspects pratiques de l'électronique imprimée. Dans ce cadre, une démonstration d'impression par sérigraphie est réalisée. D'autres substrats sont ensuite fournis aux étudiants. Ils doivent alors prendre en main la machine de sérigraphie et adapter les paramètres d'étalement en fonction de la mouillabilité de leur substrat. Ils découvrent ainsi l'ajustement nécessaire des paramètres, l'importance des propriétés d'interface entre les matériaux ainsi que les procédés de modification des surfaces, par l'ajout d'un traitement par plasma oxygène pour favoriser l'adhérence de la couche. La formation est également enrichie en caractérisation électrique, en particulier en lien avec la théorie des jauges de contraintes et l'analyse des résultats de caractérisation.

Enfin, les étudiants en première et deuxième année du Mastère MLAI, parcours E.I.S.C (Electronique, Industrialisation et Supply Chain) ont des profils orientés vers la fabrication et le test de cartes électroniques. Ils disposent d'une formation pratique plus poussée, étalée en première et seconde année. Chaque année, environ 3 groupes de 6 étudiants en Mastère 1 EISC, sont formés. Ces étudiants ont des profils alternants en fabrication de cartes électroniques et connaissent donc déjà un certain nombre d'équipements de fabrication et de test de cartes électroniques.

Dans cette partie, nous démarrons par un cours de technologie de fabrication additive, centré plutôt sur les matériaux et méthodes, avec la description de composants simples passifs et de capteurs passifs (résistances et sensibilisation aux jauges de contraintes). Cette formation est surtout centrée sur l'utilisation des machines d'impression et le réglage de leurs paramètres. En première année, les étudiants sont formés à l'impression par sérigraphie sur un substrat plastique. Une démonstration est faite. Des échantillons de matériaux de natures différentes sont ensuite fournis et les étudiants prennent en main l'équipement et optimisent les paramètres d'impression en fonction des propriétés des substrats utilisés. Ils réalisent des résistances monocouches et bicouches (avec un alignement) par cette technologie.

En seconde année de Mastère EISC, toujours avec 3 groupes de 6 étudiants, la formation est focalisée sur la technologie imprimée de type jet d'encre (Drop on demand). Le matériel est ensuite utilisé pour l'impression de pistes simples. Suivant la mouillabilité et la nature du substrat utilisé, les étudiants doivent, après avoir été formés sur l'équipement, modifier les paramètres d'impression de manière à obtenir des pistes et couches continues et sans défaut.

Pour chacune des années, les étudiants doivent remettre un rapport (compte rendu de TP) individuel reprenant les éléments clés vu lors de la formation et de la fabrication.

La technologie imprimée peut donc s'adapter à différents niveaux et différents profils d'étudiants. Une mise en œuvre est simple et permet d'illustrer en peu de temps une fabrication additive, une application cible, une caractérisation parlante. Les acquis sont évalués par QCM (en BUT) ou via un compte rendu de TP.

4. Conclusion

Au travers de ces exemples, nous avons montré que les technologies d'électronique imprimée sont un bon support pour des contenus pédagogiques liés à l'électronique « circuit ». Une ouverture vers l'électronique souple ou 3D est illustrée à travers l'impression par jet d'encre ou la sérigraphie, qui reste une technologie évolutive et d'avenir. Un contenu scientifique s'ajuste facilement, en mettant en œuvre, suivant les profils d'étudiants, les aspects matériaux, technologie et structure de composants, capteurs simples, tests électriques... Les

étudiants peuvent rapidement, sur de courtes durées, s'approprier les technologies et effectuer des réalisations simples, qui sont ensuite caractérisées.

Ces formations leur donnent également une ouverture scientifique vers l'électronique flexible et les technologies du futur à travers les nouveaux matériaux, l'électronique biosourcée ...

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 des CPER MAT&TRANS et MATECOM, de Rennes Métropole via le dispositif d'aide à l'acquisition d'équipements scientifiques, du GIP CNFM via le CCMO et l'action TP innovants.

Références

- [1] <https://www.ietr.fr/departement-organic-and-silicon-systems-oasis>
- [2] <https://acsiel.fr/au-coeur-de-lelectronique/comprendre-les-technologies-de-lelectronique/electronique-mprimee-2/les-avantages-de-lelectronique-imprimee/> et <https://acsiel.fr/au-coeur-de-lelectronique/comprendre-les-technologies-de-lelectronique/electronique-imprimee-2/fonctionnalites-de-lelectronique-imprimee/>

Biographie des auteurs

Rafika SELMI est actuellement en dernière année de thèse à l'IETR, Université de Rennes et a enseigné à l'IUT au département GEII. Elle est particulièrement impliquée dans la fabrication de capteurs par sérigraphie et transfert sur des objets ou dans des matériaux, et elle participe à la formation des étudiants à ces technologies.

Thibault BOISSEAU est agrégé de mécanique et en thèse au sein de l'IETR. Il utilise les technologies de sérigraphie pour différentes applications en particulier la réalisation de méta surfaces pour des applications antennaires.

Jean-Charles FUSTEC est ingénieur maturation au sein de l'IETR avec une expertise sur les procédés de fabrication additive d'électronique et plus particulièrement les procédés de sérigraphie. Il dispense des travaux pratiques en microtechnologies et électronique additive.

David GONZALEZ OVEJERO est Chargé de Recherche CNRS à l'IETR et développe des applications antennaires à partir de technologies développées à l'IETR.

Stéphane AVRILLON est Maître de conférences à l'ESIR et à l'IETR, et responsable de la spécialité Systèmes Numériques et réseaux (SNR) par apprentissage.

Franck COLOMBEL est maître de conférences à l'ESIR et à l'IETR et enseigne en électronique et mathématique.

Jamal RAMMAL est Professeur associé et Directeur de l'Ecole Supérieure des Technologies Industrielles, ESTI, du GIP CEI de Redon où sont formés les étudiants de mastère MLAI.

Laurent PICHON est Professeur à l'IETR et l'IUT département GEII. Il est également directeur du CCMO (Centre de Formation en Microélectronique de l'Ouest), pôle de formation qui propose en particulier des travaux pratiques innovants dans ce domaine.

Maxime HARNOIS est ingénieur de recherche au CNRS et a développé de nombreuses technologies et applications, en particulier en lien avec l'électronique flexible, la sérigraphie et les technologies de transfert. Il est également très impliqué dans la formation des étudiants à ces différentes technologies.

France LE BIHAN est Professeur à l'IETR et au département GEII. Elle est spécialisée dans les microcapteurs électroniques, leurs technologies, caractérisations et applications.