



Micro-assemblage et dispositifs de récupération d'énergie sérigraphiés à Bordeaux : un pas vers l'électronique imprimée autonome

Hélène Debéda^{1*}, Laurent Oyhenart¹, Ludivine Fadel¹, Alexandrine Guédon-Gracia¹,
Jean Tomas¹

¹ Université de Bordeaux, Laboratoire IMS, 351 Cours de la Libération, 33405 Talence Cedex

*Auteur de correspondance : helene.debeda@ims-bordeaux.fr

Résumé : *L'électronique imprimée représente une alternative innovante et en pleine expansion aux procédés classiques de fabrication. À l'Université de Bordeaux, l'enseignement des techniques d'assemblage et d'électronique imprimée évolue pour répondre aux nouvelles exigences industrielles et académiques. Cet article décrit l'adaptation des contenus pédagogiques aux avancées technologiques récentes, notamment dans le cadre de la réforme du BUT GEII. L'objectif final est la réalisation d'une rectenna : une antenne associée à un redresseur RF-DC, imprimés sur substrat souple. Nous détaillons les modules de formation, les méthodologies employées, les retours d'expérience des étudiants et les perspectives d'amélioration.*

Mots clés : Électronique imprimée, rectenna, sérigraphie, substrat souple, encre à l'argent, BUT GEII.

Abstract: **Screen-printed micro-assembly and energy harvesting devices in Bordeaux: a step towards autonomous printed electronics**

Printed electronics offer an innovative and fast-growing alternative to traditional manufacturing. At the University of Bordeaux, teaching in this field is evolving to meet new industrial and academic needs. This article details curriculum adaptations following the reform of the BUT GEII, with the goal of producing a flexible, printed rectenna integrating an RF-DC rectifier. We present the training modules, student feedback, and prospects for improvement.

Keywords: Printed electronics, rectenna, screen printing, flexible substrate, silver ink, BUT GEII.

1. Introduction

De nos jours, l'industrie électronique fait face à des défis multiples et interconnectés. Ces principaux défis sont liés aux performances, au coût, à la taille, à l'empreinte environnementale et à la fiabilité. Les innovations technologiques sont constantes, notamment en électronique imprimée qui est en pleine expansion comme en témoignent les études de marché (fig. 1) [1], avec des applications innovantes dans de nombreux domaines tels le biomédical, les capteurs ou l'automobile (fig. 2) [2-4]. Le marché prévisionnel de l'électronique imprimée/flexible pour l'automobile est par exemple estimé à \$12,7 milliards en 2031 [1]. Avec les exigences de l'électronique - miniaturisation, faible coût, performance accrue et défis environnementaux- cette croissance du marché de l'électronique imprimée est prévisible puisque cette technologie offre de multiples avantages comparativement au procédé de fabrication conventionnel silicium nécessitant une chimie lourde : réduction des coûts pour une production de masse, flexibilité dans la conception avec par exemple la possibilité d'intégration sur des surfaces irrégulières, impact environnemental réduit (« green electronic »). Une illustration des potentialités des techniques d'impression est la plastronique, technologie prometteuse combinant plasturgie et électronique pour intégrer des circuits directement sur des pièces plastiques 3D [5]. Parmi les techniques d'impression utilisées, la technique de sérigraphie (« screen-printing ») reste majoritairement choisie (Fig. 3 et 4) car elle se démarque par sa simplicité et sa versatilité. En effet, cette technique qui utilise un écran en maille fine comme pochoir incorporant le motif à imprimer ne nécessite que 2 étapes :

i) impression proprement dite pendant laquelle l'encre passe à travers les zones ouvertes du pochoir à l'aide d'une raclette, transférant ainsi le motif sur le support choisi ;

ii) traitement thermique.

On conçoit aisément qu'un prototypage est rapide, ne nécessitant que peu d'outillages (équipement de sérigraphie, écran et étuve/four de traitement thermique).

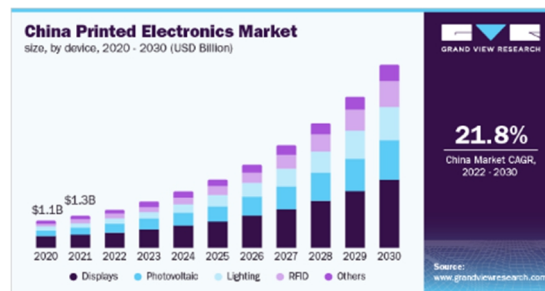


Figure 1. Evolution du marché de l'électronique imprimée par secteur [1]

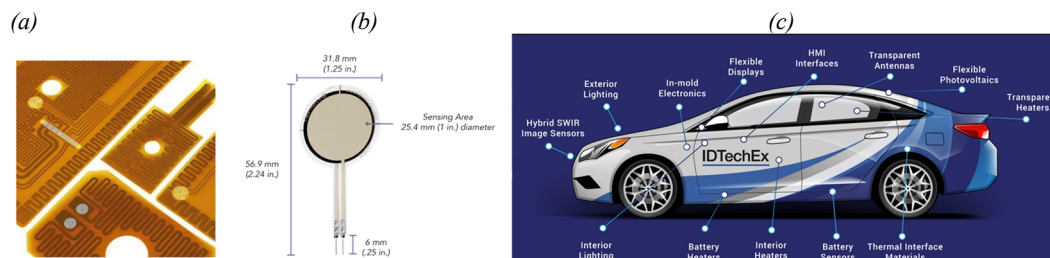


Figure 2. Applications de l'électronique imprimée a) Substrat chauffant sur polyimide (épaisseur 0,2mm) utilisé en TP capteurs Licence SPI pour étalonner des thermocouples [2] b) Capteur de force FlexiForce™ étalonné en TP capteurs Licence SPI (Ø25 mm) [3] c) Opportunités de marché dans le domaine de l'automobile d'après étude IDTechEx. [4]

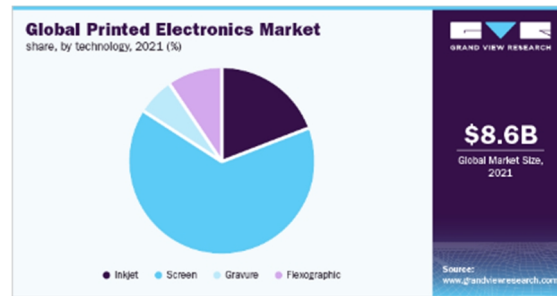


Figure 3. Marché avec la répartition des techniques d'impression [1]

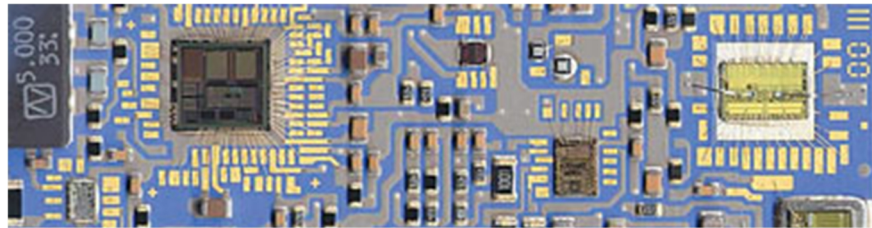


Figure 4. MCC-C (Multichip Module Ceramic) : illustration de la sérigraphie avec couches argent/palladium, or et diélectrique (bleu) ; composants CMS assemblés par refusion avec brasure sérigraphiée]

À l'Université de Bordeaux, l'enseignement sur l'assemblage (« packaging ») et l'électronique imprimée s'est structuré autour de formations dédiées depuis de nombreuses années. La récente réforme du BUT GEII a permis d'adapter ces enseignements aux avancées technologiques et aux besoins du marché du travail. Dans ce cadre, un projet pédagogique innovant a été introduit : la fabrication d'antennes sur substrats souples pour des applications en récupération d'énergie RF. Cet article propose une analyse détaillée de cette formation, de sa mise en œuvre à son impact sur les étudiants

2. La formation

2.1. Historique

Les formations en assemblage et impression en microélectronique ont été initiées pour les niveaux Licence, IUT et école d'ingénieur, et récemment étendues aux doctorants de l'École Doctorale SPI [6]. Un premier TP sur les capteurs imprimés avait déjà été proposé aux étudiants de Licence (L3 EEA, LPro CAFIEM IUT GEII) et de Bordeaux INP (ENSEIRB-MatMeca). Une jauge de déformation à base de noir de carbone était imprimée sur une carte comportant l'électronique de conditionnement (composants montés en surface CMS). Il s'agissait là de réaliser le circuit de conditionnement associé à la jauge pour détecter un seuil de déformation par allumage de diodes électroluminescentes. L'ensemble était intégré sur un PCB (Printed Circuit Board) de type FR4 (epoxy avec fibres de verre). L'évolution récente de la formation BUT GEII pour les étudiants de troisième année, parcours Electronique Systèmes Embarqués « ESE » concerne principalement l'intégration de la fabrication d'antennes sur substrat flexible.

2.2. Objectifs pédagogiques

Les formations proposées sous forme de mini -stage (2 à 3 jours), ou de cours avec Travaux Pratiques, visent à sensibiliser les étudiants aux exigences indus-trielles (« Smaller, Lighter,

Faster, Cheaper »), et aux technologies d'assemblage. La figure 5 illustre des réalisations pratiques permettant de mettre l'accent sur les points suivants :

1. Techniques d'impression pour l'électronique.
2. Matériaux pour l'électronique et leur impact sur les performances (supports d'interconnexion composites, céramiques ou métalliques, pistes conductrices, joints d'assemblage).
3. Contraintes liées au choix des matériaux et des pro-cédés d'assemblage.
4. Techniques de report des composants (brasure, col-lage, frittage) et connexions (câblage filaire). Embarqués « ESE » concerne principalement l'intégration de la fabrication d'antennes.

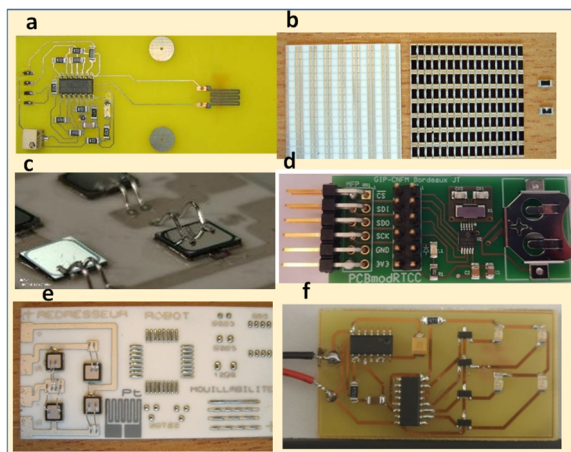


Figure 5. Exemple de réalisation d'assemblages à Bordeaux : (a) Jauge de déformation + électronique de conditionnement (b) Chips résistances (c) Diodes câblées (d) Carte PCMOD Temp e) Redresseur + sonde Pt f) Circuit chenillard

2.3. Contenu de la formation BUT3 GEII

Cette formation comprend 4 heures de cours dispensées à un groupe de 36 étudiants, ainsi que deux travaux pratiques (TP) de 3 heures, réalisés en groupes de 6. Ces TP permettent d'illustrer et d'appliquer les concepts abordés en cours. Les étudiants découvrent les différents procédés d'assemblage (collage, brasage, câblage, frittage), les moyens techniques associés (four, machine de câblage, presse de frittage), ainsi que les supports d'interconnexion (circuits imprimés et leurs finitions, substrats céramiques, etc.). Les familles de composants sont également présentées et illustrées à travers divers exemples concrets.

Les objectifs visés sont :

- savoir identifier les niveaux d'assemblages, les boîtiers électroniques et les supports d'interconnexions ;
- connaître la composition de la brasure ;
- maîtriser les techniques de report sur carte ou fond de boîtier des puces nues ;
- appréhender le procédé de refusion ainsi que les ordres de grandeurs liés aux dimensions et températures de procédé.

2.3.1 Assemblages : études de cas

Pendant le cours, les 2 niveaux d'assemblage premier niveau (puce dans le boîtier) et second niveau (composants sur la carte) sont illustrés à travers des études de cas. La figure 6 illustre un module de puissance qui doit être décrit par les étudiants devant identifier les différents

éléments de l'assemblage, les techniques d'assemblages, et l'intérêt des choix matériaux pour l'application de puissance (résistance thermique à minimiser).



Figure 6. Module de puissance avec sa semelle, le substrat DBC (Direct Bonding Copper) et les puces de puissance brasées sur le cuivre puis câblées

2.3.2 Encres pour l'électronique : études de documentations techniques

Pendant le cours, afin de mieux comprendre les compositions (fig. 7) et les spécificités des pâtes imprimables pour brasures et conducteurs à base d'argent, chaque étudiant doit analyser les documents techniques des pâtes commerciales. L'objectif est d'extraire les informations clés telle que le matériau actif, la composition, les applications, le support d'interconnexion et les conditions d'impression, ainsi que le traitement thermique requis.

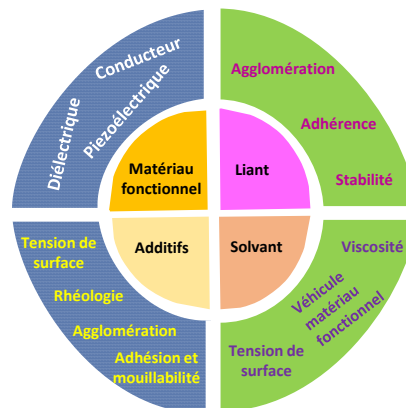


Figure 7. Composition d'une encre d'après [7]

3. TP réalisation d'une rectenna

Deux circuits sont réalisés : un assemblage 1er niveau : redresseur sur alumine (brasage de diodes, câblage et tests) et une antenne sur substrat souple. Ces travaux pratiques permettent de comprendre les techniques pour réaliser les joints puce/piste, broches/piste et de réaliser une impression d'un conducteur à base d'argent. L'objectif de ce TP est de mettre en pratique avec les étudiants leur connaissance sur les antennes, les redresseurs, leur dimensionnement, leur fabrication et leur caractérisation.

3.1. Impression d'antennes par sérigraphie

La technique d'impression par sérigraphie est très intéressante pour imprimer les antennes sous forme planaires. Dans ce TP, une attention particulière est portée à 2 géométries d'antennes planaires dipôles demi-ondes (fig. 8) déjà conçues lors d'un travail précédent [8].

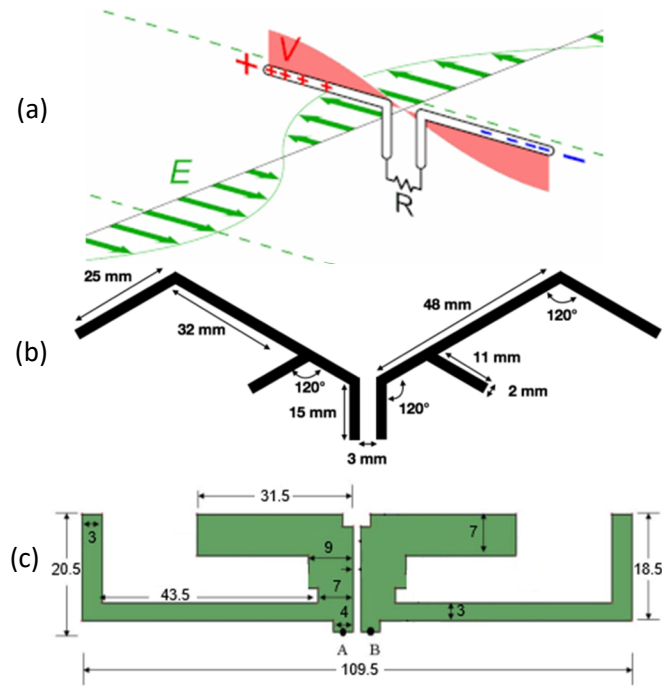


Figure 8. (a) Courant, tension et champ électrique d'une antenne dipôle demi-onde [9] , (b) et (c) géométrie des deux antennes dipôle bi-bandes 900 MHz et 2.4 GHz

Nous avons sélectionné 3 encres pour réaliser les 2 géométries d'antennes, ces encres seront déposées sur des écrans compatibles, leurs caractéristiques sont synthétisées dans le tableau 1. Il est à noter que la température et la durée de séchage des encres est ajustée en fonction du type de support et de leur température de transition vitreuse (T_g) : 60°C pour le support PET-polyéthylène terephthalate- ($T_g = 62^\circ\text{C}$), avec une durée d'environ 30 min ; 130°C pendant 20 min pour le papier et le polyimide - kapton © ($T_g = 360^\circ\text{C}$).

Tableau 1. Caractéristiques des encres utilisées (*1)= tour/min, (*2) = nombre de fils par pouce (*3)millinch

<i>ENCRE Ag : dénomination/fabricant</i>	<i>KA801 Polyimide Ag /DUPONT</i>	<i>5029 Polymeric Ag for smart card- /DUPONT</i>	<i>Polymer Ag conductor 1901-SB /FERRO</i>
<i>Viscosité à 25°C (Pa.s)</i>	20-50 à 10 rpm (*1)	35-50 à 10 rpm	25 à 1 rpm
<i>Ecran avec maillage acier</i>	325 meshes (*2)	200 meshes	250meshs
<i>Traitement thermique</i>	130-200°C 10-30 min	120-130°C 15-30 min	125°C 20min
<i>Résistance par carré (m• /□/mil(*3))</i>	5	4-8	<100

La première étape est la réalisation des pochoirs de sérigraphie, (Fig. 9a). L'impression d'antennes à base d'argent est effectuée sur les 3 types de supports flexibles : le support papier et les deux supports plastiques de température de transition vitreuse différentes PET et polyimide (Fig. 9b). Pour caractériser les antennes, un connecteur SMA est fixé sur chacune d'entre elles (Fig 9c).

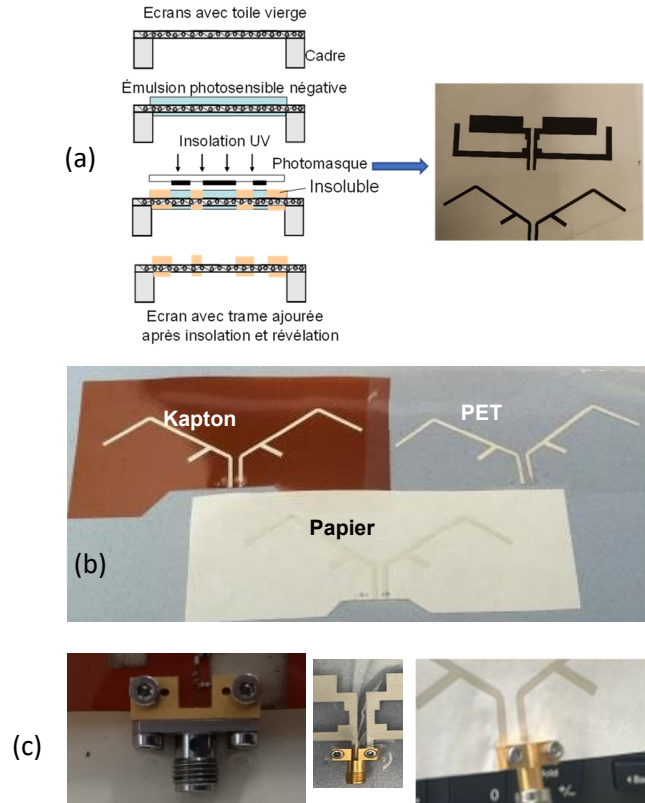


Figure 9. (a) Étapes de fabrication d'un écran de sérigraphie. La toile est caractérisée par son maillage en meshs nombre de fils par pouce. (b) : Antenne fabriquée sur 3 substrats différents (c) : Pose du connecteur SMA sur les antennes

3.2. Caractérisations des antennes souples

Pour caractériser des dispositifs hyperfréquences, notamment des antennes, il est nécessaire de disposer d'une source, d'un coupleur et d'un détecteur hyperfréquence. Un analyseur de réseau intègre ces éléments pour mesurer sur une plage de fréquence le coefficient de réflexion (S_{11}) et le coefficient de transmission (S_{21}) du dispositif testé (Fig 10).



Figure 10. Mesure des coefficients de réflexion et transmission d'une paire d'antennes imprimées

Après calibration de l'analyseur de réseau, la mesure du coefficient de réflexion permet d'identifier les deux bandes de fréquence de fonctionnement des antennes dipôles réalisées, à 900 MHz et 2,4 GHz (Fig. 11a). En analysant le coefficient de transmission pour une distance donnée entre une paire d'antennes identiques, il est possible de déterminer une caractéristique fondamentale d'une antenne : son gain (Fig. 11b). Le gain obtenu est faible car les antennes étaient maintenues par les élèves. Il sera nécessaire de rajouter des dispositifs de maintien des antennes.

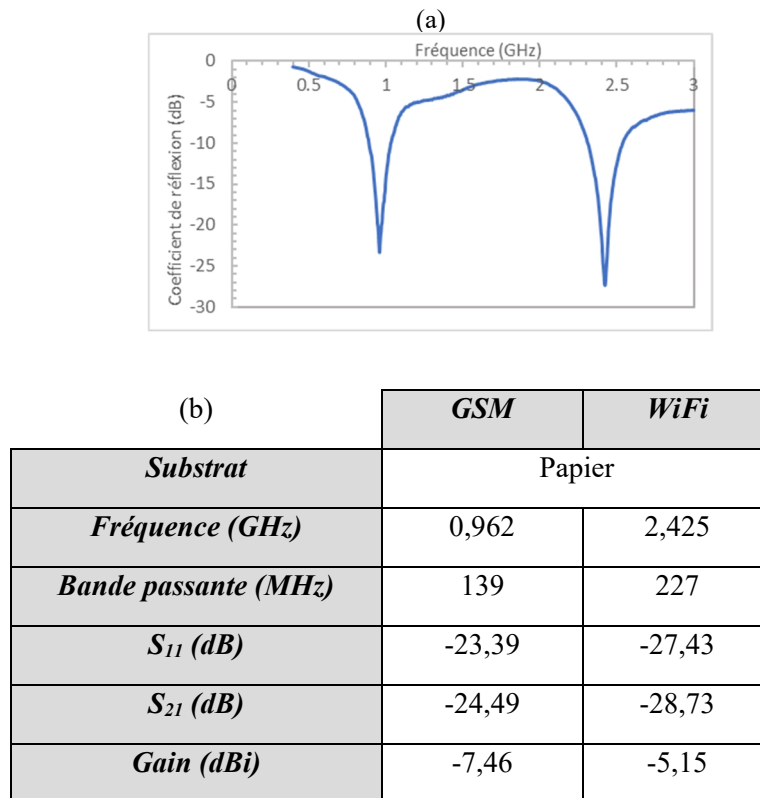


Figure 11. Mesure du coefficient S_{11} et caractéristique de l'antenne bi-bande de la Fig 8b

3.3. Application à la récupération d'énergie

Actuellement, le TP se conclut par la caractérisation des antennes. Nous souhaitons y intégrer une section sur la récupération d'énergie. Pour cela, nous disposons d'un redresseur à

quatre étages avec doubleur de tension (Fig. 12), opérant sur les bandes de 900 MHz et 2,4 GHz [8].

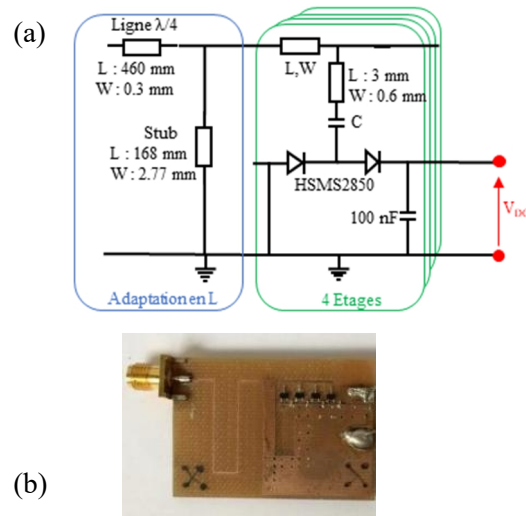


Figure 12. Schéma du redresseur 4 étages, (b) Réalisation du redresseur sur substrat FR4

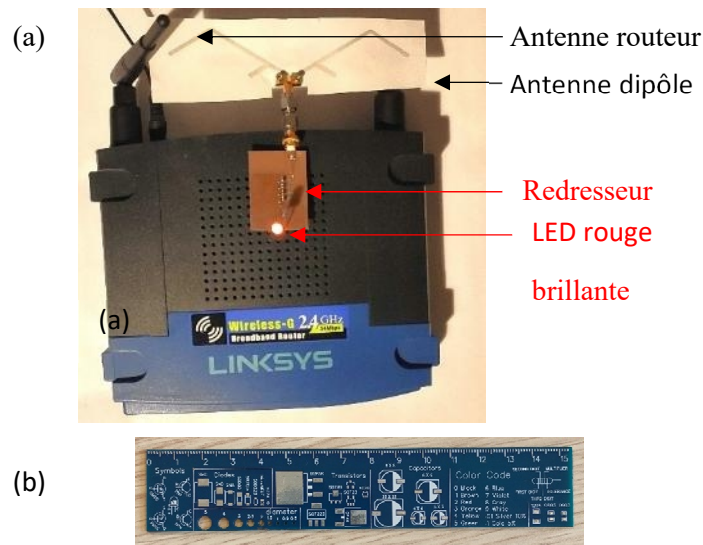


Figure 13. (a) Scénario d'utilisation du dispositif routeur Linksys WRT54G avec antenne + redresseur + Led (b) Règle « électronique » offerte aux étudiants

L'antenne planaire connectée au redresseur permettra de récupérer une tension continue suffisante pour alimenter une LED. Le nombre d'étages a été optimisé afin d'obtenir une tension de sortie supérieure à la tension de seuil d'une LED rouge. La figure 13 illustre avec succès ce test : la LED s'illumine par intermittence, en fonction de l'émission électromagnétique des antennes du routeur au fil du temps. Il est observé que le routeur LINKSYS WRT54G émet alternativement sur l'une de ses deux antennes.

À terme, l'objectif est d'intégrer l'ensemble du dispositif antenne + redresseur + LED sur un même substrat. Dans un premier temps, un substrat rigide de type FR4 sera utilisé, avant d'être remplacé par un substrat souple en PET. Pour contourner la contrainte liée à l'étape de

refusion à 230°C, deux solutions sont envisagées pour l'assemblage des composants CMS sur substrat souple :

- Report des CMS avec une brasure plus basse température (<150°C) type alliages à base d'étain, bismuth et/ou indium [10].
- Report des composants CMS avec des colles à l'argent avec l'étape de polymérisation (« curing ») à adapter (température et durée) selon le substrat (réduction de la température et augmentation de la durée sur substrat PET).

Actuellement une règle graduée comportant les différents masques des composants est offerte aux étudiants de Licence (Fig.13b), nous envisageons d'intégrer la « rectenna » sur une règle souple pour offrir un dispositif dynamique et interactif.

4. Evaluation par les étudiants

Dans une démarche d'amélioration continue des formations, des sondages ont été menés auprès des étudiants ayant suivi nos cursus, notamment les étudiants de BUT et les doctorants.

Pour les étudiants de BUT3 GEII, parcours ESE, la question posée suite à tous leurs enseignements de semestre était du type : « *Quelle est votre impression sur le cours « xxx »* ». Pour le cours « Electronique Packaging », aucun des 22 étudiants ayant renseigné le sondage n'a choisi la réponse « Très insatisfait ». Plus de 80% s'avèrent satisfaits ou très satisfaits (54,5% et 27,3% respectivement). De manière logique des enseignements considérés comme plus accessibles pour les étudiants tels que « Électronique Layout », « Électronique Semiconducteur », « Électronique Simu » affichent les taux de satisfaction les plus élevés. En revanche, pour des cours perçus comme plus exigeants tels que notre enseignement « Packaging », « Capteurs », « Fiabilité » ou « Electronique organique », les retours restent globalement positifs et suivent une même tendance. Il est à noter que pour les évaluations auprès des doctorants, étudiants qualifiés déjà expérimentés mais ne venant pas toujours du domaine, révèlent un très bon niveau de satisfaction (fig. 14).

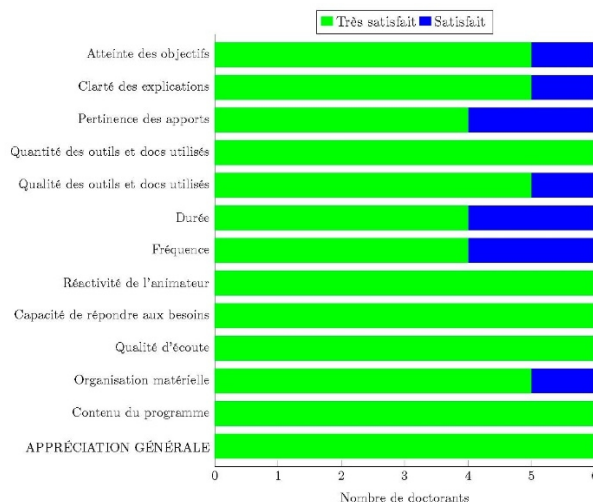


Figure 14. Retour d'évaluation étudiants doctorants école SPI

5. Conclusion

L'enseignement dispensé depuis deux ans aux étudiants du BUT GEIL, parcours ESE, est conçu en étroite adéquation avec les exigences de l'industrie électronique (« Smaller, Lighter, Faster, Cheaper »). Il vise à les familiariser avec les contraintes technologiques, le choix des matériaux et les techniques d'assemblage garantissant des performances et une fiabilité optimales. Les approches pédagogiques adoptées, combinant études de cas en cours et réalisations pratiques d'assemblages ou d'impressions lors des travaux pratiques, ont conduit à un bon taux de satisfaction des étudiants. Dans la perspective d'un circuit redresseur intégré à une antenne imprimée sur un substrat flexible (papier ou polyimide), un système autonome et conformable pourrait être appliqué sur des surfaces de formes variées, à l'instar de celles présentées dans [11]. Cette avancée vers un système autonome imprimé s'inscrit pleinement dans les enjeux de l'électronique « verte » et pourrait être étendue à d'autres filières bénéficiant déjà des travaux pratiques d'assemblage de premier niveau (redresseur sur céramique) et 2nd niveau avec un chenillard sur PCB. Enfin, un Printed Circuit Board « PCB » bio-dissolvable dans l'eau [12] pourrait également constituer une alternative prometteuse, mieux alignée sur les principes de l'économie circulaire dans le domaine de l'électronique.

Remerciements

Accompagnement du pôle PCB-CNFM à travers le programme AMI-CMA : INFORISM. Accueil dans la plateforme assemblage de l'IMS.

Références

- [1] <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/printed-electronics-market> ; date consultation 10/02/2025
- [2] <https://fr.rs-online.com/web/p/tapis-chauffants/7983753> date consultation 10/02/2025
- [3] <https://www.mescan.com/flexiforce-a401>, date consultation 10/02/2025
- [4] <https://www.eetimes.eu/printed-electronics-to-enhance-both-exterior-and-interior-in-eps/> ;date consultation 10/02/2025
- [5] L. Ténchine, *Plastronics. Electronics Fonctionnement of Plastic Parts*, Techniques de l'ingénieur, 2023.
- [6] H. Debéda, A. Gracia, L.Fadel, L. Oyhenart, J. Tomas., *Découverte des processus de fabrication en microassemblage électronique, du BUT 3 au doctorat*, J3eA vol .23, 2024
- [7] B. Das and S. Mohanty, *A comprehensive review on piezoelectric inks: From concept to application*. Sensors and Actuators: A. Physical 366 (2024)
- [8] R. Berges, L. Fadel, L. Oyhenart, V. Vigneras, T; Taris, *Conformable dual-band wireless energy harvester dedicated to the urban environment*, Microwave Opt. Technol. Lett. 2020, 62, 3391.
- [9] Wikipedia Dipole antenna; date consultation 10/02/2025
- [10] Y. Liu and K.N. Tu , *Low melting point solders based on Sn, Bi, and In elements*, Materials today advances, , Volume 8, December 2020, 100115,
- [11] Y.Khan, A. Thielens, S. Muin, J. Ting, C. Baumbauer, A.C. Arias, *New Frontier of Printed Electronics: Flexible Hybrid Electronics*, November 2019, Advanced Materials 32(15)
- [12] <https://www.jivamaterials.com/> ; date consultation 10/02/2025

Biographie des auteurs

Hélène Debéda : Professeur à l'université de Bordeaux, exerçant ses activités de recherche au Laboratoire d'Intégration du Matériau au Système (IMS) et ses enseignements à l'Unité de formation Science d'ingénieur (UFSDI). Responsable de l'équipe PRIMS (PRinted MicroeletromechanicalSystems), ses recherches sont centrées sur l'étude et la microstructuration de composants et microsystèmes à l'aide de technologies alternatives au technologie silicium, notamment la technique couches épaisses sérigraphiées. Sur le volet enseignement, Hélène Debéda est responsable de la mention de licence SPI. Elle enseigne principalement en licence SPI et en master, ses enseignements sont en lien avec ses activités de recherche : capteurs et technologies d'assemblage.

Laurent Oyhenart : Maître de conférences à l'université de Bordeaux, il est responsable du thème de recherche DEVICES du laboratoire IMS et est également rattaché au consortium LightTECH où il étudie la propagation de la lumière dans les milieux complexes. Parallèlement, il est responsable de la 2^e année du parcours systèmes embarqués du Master MA, où il enseigne à la fois les fondamentaux des systèmes embarqués et les thématiques liées à ses recherches.

Alexandrine Guédon-Gracia : Maître de conférences à l'université de Bordeaux, elle est rattachée au Laboratoire d'Intégration du Matériau au Système (IMS) pour ses activités de recherche et à l'Unité de formation Science d'Ingénieur (UFSDI) de l'Université de Bordeaux pour ses enseignements. Responsable de l'équipe RIAD (Reliability of Innovative Assemblies and Devices), le thème principal de ses recherches est l'étude de la fiabilité des composants et systèmes microélectroniques en se basant sur des essais expérimentaux et des simulations. Après avoir été responsable du parcours IMSAT de la licence SPI, elle est désormais responsable de la 2^{ème} année du parcours Systèmes Electroniques du Master ISC..

Ludivine Fadel : Maître de conférences à l'Université de Bordeaux, elle est rattachée au laboratoire IMS dans le groupe de recherche ONDES. Ses travaux portent sur le développement de dispositifs de détection innovants et de réseaux de capteurs, avec des applications en santé, environnement et énergie. Elle s'intéresse particulièrement aux capteurs MEMS, aux matériaux fonctionnels et aux procédés de micro-technologies tels que la micro-lithographie et l'impression jet d'encre. Ses recherches récentes explorent les enjeux de l'autonomie énergétique des objets connectés, notamment le transfert et la récupération d'énergie sans fil, ainsi que les technologies d'impression pour les applications WBAN. Elle enseigne par ailleurs au département Mesures Physiques de l'IUT de Bordeaux, où elle est responsable des études de troisième année.

Jean Tomas : Maître de conférences à l'université de Bordeaux, il est rattaché pédagogiquement à l'Unité de formation Science d'Ingénieur (UFSDI). Il poursuit ses activités de recherche dans l'équipe Hardware Hybrid Computing (2HC) du Laboratoire d'Intégration du Matériau au Système (IMS), plus particulièrement sur la conception de circuits mixtes (analogiques-numériques) pour des applications bio-inspirées. Il est directeur du Pôle CNFM de Bordeaux (PCB).