

Eco-conception de dispositifs plastroniques 3D : Electronique Structurelle Surmoulée sur Acide PolyLActique

Caroline GOUMENT^{1,2}, Valernst Martial GILMUS¹, Philippe LOMBARD¹, Tony GERGES¹, Simon LAMBERT¹, Bruno ALLARD¹, Jean-Yves CHARMEAU², Michel CABRERA¹

¹ Univ Lyon, INSA Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, Ecole Centrale de Lyon, CNRS, AMPERE, UMR 5005, 69621 Villeurbanne, France ; ² Univ Lyon, INSA Lyon, IMP, UMR 5223, 69621 Villeurbanne, France

RESUME – L'Electronique Structurelle Surmoulée (ESS), ou In-Mold Electronics (IME) en anglais, est un procédé de fabrication plastronique 3D qui associe le domaine de la plasturgie à celui de l'électronique imprimé. Cette combinaison permet la fabrication d'objets innovants 3D plus légers et moins volumineux ainsi que des réductions de l'impact environnemental. Ce travail a pour objectif d'étudier les possibilités de remplacement du PolyCarbonate (PC), matériau de référence en ESS issu de la pétrochimie, par un polymère biosourcé, l'acide PolyLActique (PLA). Une preuve de concept de l'ESS sur PLA est présentée avec un circuit électronique simple.

Mots-clés – Acide PolyLActique, Plastronique 3D, Electronique Structurelle Surmoulée, In-Mold Electronics, biosourcé, soutenabilité

1. INTRODUCTION

La plastronique 3D est un domaine technologique permettant d'améliorer l'intégration de fonctions électroniques hétérogènes en tirant profit de la forme complexe 3D du substrat polymère. Le principe consiste à implémenter un réseau conducteur et des Composants Montés en Surface (CMS) aux interfaces 3D des dispositifs à base de matériaux polymères. Ainsi, les interconnexions peuvent être améliorées et les composants mieux agencés. De manière générale, les interactions entre les fonctions électroniques, mécatroniques, optiques et thermiques sont améliorées. Le système et la carte électronique ne font plus qu'un (il n'y a plus de PCB FR-4). Cela amène à une économie en matière. L'Electronique Structurelle Surmoulée (ESS), ou In-Mold Electronics (IME) en anglais, est le procédé plastronique d'intérêt dans ce travail.

2. CONTEXTE

L'ESS est un procédé plastronique de production de masse et bas coût. Il combine des techniques d'électronique imprimée 2D avec des procédés de mise en forme 3D en plasturgie. Il comprend trois étapes principales (Figure 1) [1] : (a) la sérigraphie d'encre conductrice sur film polymère thermoplastique et report des composants électroniques (CMS). Ces derniers sont connectés au circuit électronique à l'aide d'une colle conductrice et l'adhésion est renforcée avec une colle structurale isolante ; (b) le thermoformage en 3D du film portant l'électronique (chauffage et déformation sur un outillage 3D) ; (c) une fois détournée, la « coque » 3D précédemment obtenue est placée dans un moule d'injection pour être surmoulée par

injection. La pièce finale est un dispositif 3D de quelques millimètres d'épaisseur dans lequel le circuit électronique est encapsulé. L'application initialement visée était la fabrication de surfaces intelligentes pour des Interfaces Homme-Machine (IHM). Des applications pour l'intégration d'antennes radiofréquences (voir Figure 9) sont en cours de développement.

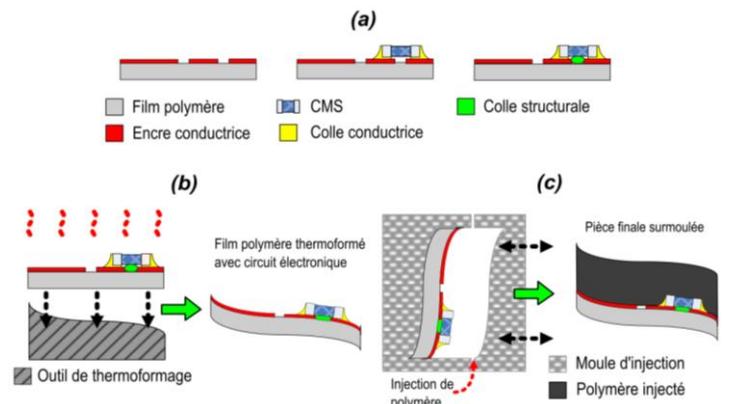


Fig. 1. Schéma de principe du procédé ESS. (a) sérigraphie et collage des CMS, (b) thermoformage, (c) surmoulage par injection.

Bien que le PolyCarbonate (PC) soit le matériau de référence en ESS, c'est un polymère issu de la pétrochimie qui n'est pas facilement recyclable. Pour un procédé plus durable et soutenable, l'acide PolyLActique (PLA) est un polymère plus avantageux. Il est biosourcé (issu de canne à sucre, amidon de maïs, etc.) et biodégradable (en compost industriel). Il possède une très haute rigidité mécanique et une bonne réactivité chimique. Il est également couramment utilisé dans divers procédés plasturgiques tels que l'extrusion, l'impression 3D filaire et le moulage par injection, ce qui en fait un choix intéressant pour l'ESS.

3. OBJECTIF

Remplacer les matériaux issus de la pétrochimie par des matériaux produits à partir de ressources renouvelables est aujourd'hui une transition nécessaire afin de réduire l'impact environnemental de la fabrication de systèmes électroniques innovants. En effet, les objets électroniques représentent aujourd'hui près de 8 kg par personne et par an de déchets électroniques dans le monde [2].

L'objectif principal de ce travail est donc d'utiliser un biopolymère, le PLA, pour remplacer les matériaux non renouvelables conventionnels en électronique et plastronique IME, qui sont respectivement le FR-4 et le PC. Nous cherchons à démontrer la faisabilité de l'utilisation du PLA à chaque étape du procédé ESS afin de mettre en place la fabrication de systèmes plastroniques plus efficaces et respectueux de l'environnement.

4. PARTIE EXPERIMENTALE

De nombreuses caractérisations des matériaux polymères (PCs et PLAs) ont été effectuées et comparées. Le principal inconvénient du PLA provient de ses propriétés thermiques qui limitent aujourd'hui son utilisation à des applications en électronique de signal. En effet, la température de transition vitreuse du PLA se situe autour de 55-60°C. Les encres de sérigraphie commerciales sont à base d'argent et ont été formulées pour une utilisation sur substrat PC avec un séchage à 120°C pendant 20 min recommandé par le fournisseur. Les temps et température de séchage de l'encre ME603 (DuPont) ont donc été adaptés pour le PLA avec une optimisation intéressante trouvée à 55°C pendant 2h30. Une étude d'adhésion et des mesures de résistivité électrique ont ensuite été menées sur l'encre conductrice pour déterminer si les performances restent similaires sur le film PC et sur le film PLA pour les conditions optimales de séchage de l'encre ME603 respectives à chaque substrat. Un test d'adhésion normalisé (scotch test ISO 2409) a été réalisé et a montré que l'adhésion est très bonne pour les deux substrats. Quant à la résistivité présentée Tableau 1, les mesures ont été menées grâce à la méthode 4 pointes pour des pistes dont l'épaisseur moyenne est de 5 à 9 µm sur PC et sur PLA.

Tableau 1. Mesures de résistivité de l'encre conductrice après séchage optimal sur PC et sur PLA.

	ME603 sur PC (120°C – 20 min)	ME603 sur PLA (55°C – 2h30)	Argent massif
Résistivité (en $\mu\Omega \cdot \text{cm}$)	31 - 54	250 - 300	1,59

La résistivité après sérigraphie et recuit de ME603 est plus grande pour le substrat PLA que pour le PC. L'adhésion des CMS a également été quantifiée, avant thermoformage et avant surmoulage, en prenant en compte les conditions d'étuvage des colles (conductrice et structurale) suivant la nature du substrat. Le Tableau 2 présente les résultats des essais de cisaillement pour l'utilisation dans un premier temps de colle conductrice ME902 (DuPont) uniquement puis, dans un second temps, avec l'ajout de colle structurale de type cyanoacrylate d'éthyle (Loctite Superglue-3, Henkel).

Tableau 2. Essais de cisaillement avec la machine XYZTEC Condor Sigma pour quantifier l'adhésion de résistances CMS (0805) sur le substrat polymère et sur les pistes conductrices ME603.

	Séchage	Contrainte de cisaillement (N/mm ²)
ME902 sur PC (réf)	120°C – 20 min	7,68
ME902 sur PC	55°C – 2h 30	2,76
ME902 sur PLA	55°C – 2h 30	1,80
ME902 + cyanoacrylate sur PC	55°C – 2h 30	8,67
ME902 + cyanoacrylate sur PLA	55°C – 2h 30	9,10

L'étape de thermoformage des films polymères avec de l'encre conductrice ME603 est réalisée à l'aide de moules

coniques et cylindriques imprimés par stéréolithographie. Comme Gong et al. [3] l'explique, nous souhaitons étudier l'effet des paramètres géométriques (angle de dépouille et rayon de congé) sur les déformations (étirement) du film polymère. Les paramètres géométriques des moules utilisés sont récapitulés dans le Tableau 3.

Tableau 3. Paramètres géométriques des moules de thermoformage imprimés par SLA.

Moule	Angle de dépouille (°)	Congé (mm)	Hauteur (mm)
Cylindre 1	30	5	10
Cylindre 2	10	2	10
Cylindre 3	30	2	10
Cylindre 4	10	5	10
Double cône	(a) 70 mm long (b) 50 mm long		15

Une étude préliminaire en simulation du procédé de thermoformage pour un film PC est effectuée (Figure 2). Les variations d'épaisseur du film sont principalement observées à l'aide d'une coupe. Ainsi, plus la déformation géométrique est importante, plus l'épaisseur du film diminue (étirement plus important).

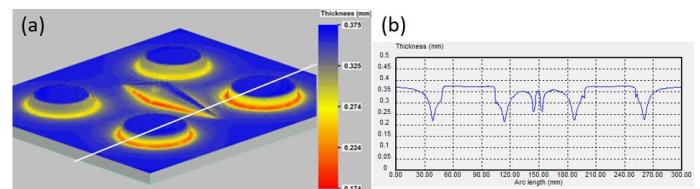


Fig. 2. Simulation avec le logiciel T-SIM, (a) thermoformage d'un film PC de 375 µm d'épaisseur, (b) observation de la variation d'épaisseur réalisée le long de la coupe simulée (trait blanc).

Pour vérifier la justesse de la simulation, une comparaison avec le travail expérimental est réalisée. Le PC est thermoformé à 180°C et le PLA à 110°C. La Figure 3 montre que les mêmes tendances sont observables en simulation et dans le travail expérimental : les zones les plus fines et les zones les plus épaisses se trouvent au même endroit tout le long de la coupe. Ainsi, la simulation confirme les tendances observées avec l'expérimental. De plus, le film PLA, tout comme le film PC, est thermoformé avec une bonne reproduction volumique des motifs 3D sans défaut apparent. Sur PC, les dépôts d'encre s'étirent parfaitement, mais sur PLA ils présentent de légers défauts (stries) au niveau des zones de plus grand étirement (là où l'angle de dépouille est le plus faible). Cela peut être le signe d'une limitation des rapports de formes admissibles.

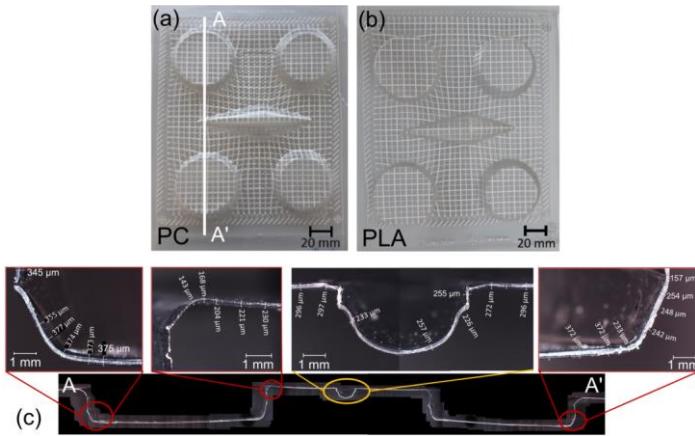


Fig. 3. Thermoformage de films (a) PC, (b) PLA, (c) observation d'une section du film PC au microscope numérique.

Nous avons vérifié cette dernière observation par des mesures de résistivités avant et après thermoformage sur PC et sur PLA. Le moule utilisé est un cône à 6 paliers (le plus haut palier a un rayon de courbure de 30 mm et le plus petit palier a un rayon de courbure de 5 mm). Les échantillons obtenus sur PC et sur PLA sont présentés à la Figure 4.

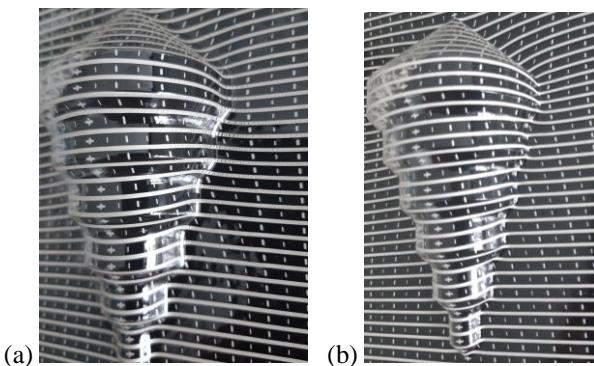


Fig. 4. Thermoformage de 49 lignes ME603 avec un moule conique à 6 paliers (a) sur PC et (b) sur PLA.

Le Tableau 4 récapitule les valeurs moyennes de résistivités avant et après thermoformage pour les pistes conductrices déformées par le moule ou non et pour les conditions optimales de séchage sur chaque substrat (PC 120°C – 20 min et PLA 55°C – 2h30). Plusieurs conclusions peuvent être tirées de ces valeurs.

Tableau 4. Valeurs moyennes de résistivités avant et après thermoformage sur PC et sur PLA.

Thermofor-mage	Résistivité (en $\mu\Omega \cdot \text{cm}$)			Lignes craquées
	AVANT	APRES		
PC	34,57	Lignes déformées	50 à 100	21 sur 30
		Lignes planes	20	0 sur 19
PLA	250,7	Lignes déformées	600 à 1100	0 sur 30
		Lignes planes	500	0 sur 19

Tout d'abord, la résistivité est initialement plus élevée sur PLA que sur PC et les valeurs concordent avec les ordres de grandeur déterminé précédemment. Ensuite, la résistivité moyenne des lignes planes diminue après thermoformage sur PC

tandis qu'elle augmente sur PLA (d'un facteur 2) : les tendances sont donc contraires. Enfin, il est important de considérer qu'après thermoformage, toutes les lignes déformées sont encore continues sur PLA tandis que 21 se sont fissurées sur PC. Mu et al. [4] ont expliqué ce phénomène par le fait que plus la température de séchage de l'encre est élevée, moins elle sera étirable. Et inversement, plus la température de séchage est basse, plus la capacité de l'encre à s'étirer est importante. Nos résultats démontrent clairement ce phénomène. De plus, dans les deux cas, une augmentation significative de la résistivité des lignes déformées est observée, principalement due à l'allongement de la ligne conductrice et dépendant du rayon de courbure de la déformation. La thermoformabilité du PLA est démontrée et nous avons également conclu qu'un séchage de l'encre ME603 à température élevée est défavorable au thermoformage pour des rayons de courbures supérieures à 10 mm.

Enfin, pour l'étape de surmoulage, deux moules plaques d'injection sont considérés à la Figure 5 avec arrivée de matière soit sur un côté soit centrale. Ces configurations ont été testées pour observer un possible délavage du réseau conducteur et des CMS. Le PC est injecté à 300°C avec un moule maintenu à 110°C tandis que le PLA est injecté à 200°C avec un moule à température ambiante.

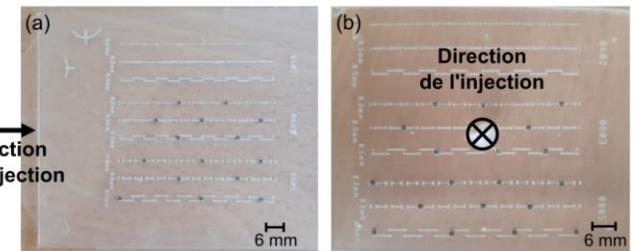


Fig. 5. Surmoulage par injection de PLA sur un film PLA sérigraphié avec CMS. Utilisation du moule avec un point d'injection (a) latéral, (b) central.

D'une part, en dehors des zones comportant des motifs de pistes ME603 ou des CMS, l'injection de PLA sur PLA et de PC sur PC s'est déroulée sans problème. L'adhésion de la plaque injectée sur le film polymère est qualitativement excellente car les deux polymères sont de même nature chimique. D'autre part, les CMS ont été collés et séchés à 55°C pendant 2h30 pour le PLA, et suivant les mêmes conditions avec un supplément de 120°C pendant 6 minutes pour le PC. Dans un premier temps, seule la colle conductrice ME902 a été utilisée. Un délavage, correspondant à un cisaillement, des composants électroniques a été observé suite à l'injection du PLA et du PC en utilisant le moule avec le point d'injection latéral. Les images réalisées au microscope numérique Figure 6 montrent ce léger déplacement des CMS dans la direction du flux d'injection. Ce problème de délavage est moins visible pour le PLA que pour le PC car la température plus élevée d'injection du PC conduit les CMS à être plus cisaillés. Cela démontre principalement l'importance d'utiliser un adhésif structural isolant pour coller les CMS de façon à renforcer l'adhésion sur le film polymère.

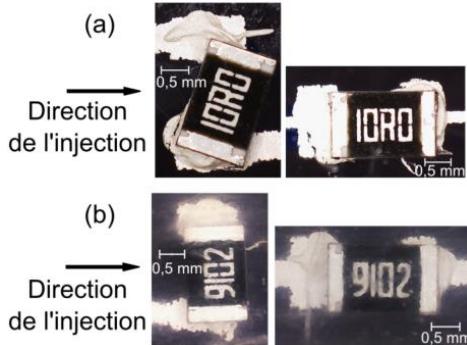


Fig. 6. Images microscopiques du délavage des CMS collés avec ME902 (a) sur PC, (b) sur PLA.

Dans un second temps, les CMS ont été collés avec ME902 conductrice et cyanoacrylate d'éthyle isolante qui est compatible pour un séchage à basse température sur PLA. L'injection de PLA sur le film électronique PLA n'a aucun effet sur la position de l'encre et des composants électroniques : l'encre ME603 et les CMS n'ont pas bougé ou ne sont pas délavés. Nous pouvons donc conclure que le délavage des CMS n'est observé que lorsque la colle ME902 est utilisée seule et pour un point d'injection latéral. Par conséquent, pour obtenir des performances optimales pour la preuve de concept, l'utilisation de colle structurale et le moule avec le point d'injection central sont privilégiés.

Un circuit électronique simple consistant à faire clignoter un voyant lumineux a permis de montrer la faisabilité du procédé ESS avec le PLA. Le circuit électronique est constitué d'un NE555 IC timer ainsi que de trois résistances, d'un condensateur et d'une diode électroluminescente (DEL). Tous les composants électroniques sont des CMS et le composant le plus épais est le NE555 avec une hauteur de 1,8 mm. Des rivets métalliques sont installés pour permettre de connecter le dispositif plastronique après surmoulage à une source d'alimentation électrique externe. Ce circuit est présenté à la Figure 7 avec la preuve de concept en PLA. Le moule d'injection avec point d'injection central a les dimensions de 100 mm x 80 mm x 3-3,5 mm. La sérigraphie des pistes conductrices ME603 et la connexion des CMS avec les colles ME902 et cyanoacrylate d'éthyle sont d'abord réalisés sur PLA. Le séchage a lieu à 55°C pendant 2h30. Des rivets en cuivre sont ajoutés. Le film électronique PLA est ensuite thermoformé à 110°C par formage sous vide contre un moule cylindrique imprimé par stéréolithographie (hauteur 1.5 mm, diamètre 40 mm et angle de dépoli 30°). Enfin, le tout est surmoulé par injection de PLA à 200°C et avec un insert de la forme du pion de thermoformage.

Le résultat est un dispositif fonctionnel d'une épaisseur totale en PLA d'environ 3,2 mm avec le circuit électronique parfaitement encapsulé et donc protégé des agressions extérieures.

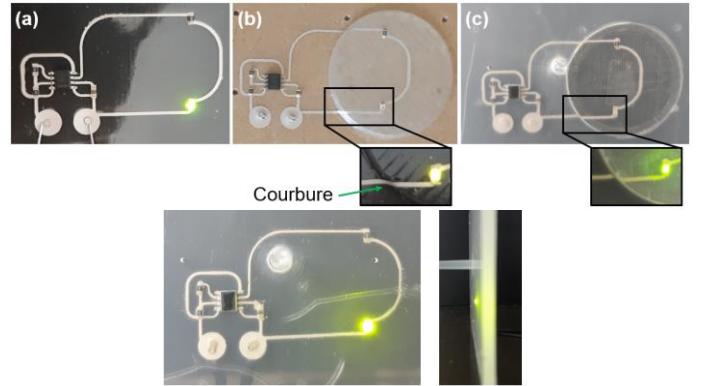


Fig. 7. DEL allumée (a) après sérigraphie et collage des CMS, (b) après thermoformage, (c) après surmoulage.

Une observation importante sur ce démonstrateur est que bien que le PLA soit un matériau fragile (allongement à la rupture de moins de 5%), nous avons remarqué la rigidité structurelle intéressante ainsi qu'une surprenante résistance aux chocs des pièces IME finales.

Pour compléter la comparaison, la preuve de concept illustrée à la Figure 8 a été reproduite avec le PC et pour les conditions suivantes : les pistes conductrices ME603 sont sérigraphiées, les CMS sont collés avec ME902 et cyanoacrylate d'éthyle. Le séchage est effectué à 120°C pendant 20 min. Des rivets en cuivre sont ajoutés. Le film électronique PC est ensuite thermoformé à 180°C par formage sous vide contre le moule cylindrique imprimé en SLA. Enfin, le tout est surmoulé par injection de PC à 300°C et avec un insert de la forme du pion de thermoformage. L'objet ESS en PC est parfaitement transparent et brillant.

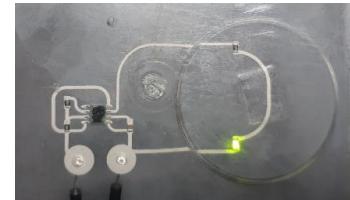


Fig. 8. Dispositif plastronique en PC mis en forme par IME.

En complément de cette comparaison, le PLA s'avère suffisamment translucide pour des applications d'éclairage ou de guidage d'ondes, de sorte qu'il est possible d'envisager des applications pour les Interfaces Homme-Machine, au même titre que le PC.

Un développement est actuellement en cours pour réaliser un moule 3D d'une forme plus complexe et qui permettrait de placer un circuit électronique souhaité. Sa fonction sera de récupérer et de stocker l'énergie ambiante afin d'acquérir, de gérer et de transmettre sans fil des données physiques, par le biais d'antennes, capteurs, etc.

Notamment, la fabrication d'une antenne dipôle avec ce procédé ESS sur PLA est étudiée pour la récupération d'énergie électromagnétique. Les premières antennes ont été testées après sérigraphie sans thermoformage ni surmoulage. Les résultats sont prometteurs. La Figure 9 montre le dispositif sans et avec thermoformage. Nous pouvons remarquer un délavage de l'encre sur le pion de thermoformage qui pourrait poser problème pour le bon fonctionnement de l'antenne.

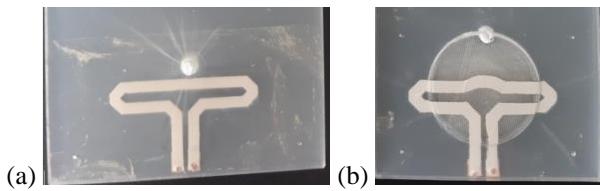


Fig. 9. Antennes réalisées par IME sur PLA après surmoulage, (a) sans thermoformage, (b) avec thermoformage.

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans ce travail, nous avons démontré la faisabilité de la fabrication de dispositifs plastroniques 3D ESS avec le PLA. L'utilisation de ce biomatériau permet ainsi la fabrication de dispositifs plastroniques plus respectueux de l'environnement. Pour la suite, il est intéressant de considérer une méthode pour recycler d'un côté l'électronique selon les filières traditionnelles pour DEEE (Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques) et de l'autre le polymère par une méthode de recyclage à mettre en place.

6. REMERCIEMENTS

Nous remercions particulièrement Murat ARLI et Hayet LAKHDAR, département Génie Mécanique de l'INSA Lyon, pour leur aide et support technique dans la fabrication des dispositifs plastroniques présentés dans cet article.

Ce travail a été financé par la région Auvergne-Rhône-Alpes dans le cadre du Pack Ambition Recherche 2020 avec le projet BioAntenna (Antenne pour IoT sur polymère biodégradable pour le stockage et la récupération d'énergie, convention n°20 009551 01–22464) que nous remercions également.

7. REFERENCES

- [1] C. Goument, T. Gerges, P. Lombard, H. Lakhdar, M. Arli, V. M. Gilimus, S.A. Lambert, B. Allard, J.Y. Charneau, M. Cabrera, « In-Mold Electronics on Poly(Lactic Acid): towards a more sustainable mass production of plastronic devices », *Int J Adv Manuf Technol*, (2023). <https://doi.org/10.1007/s00170-023-10878-4>
- [2] « Les DEEE dans le monde en chiffres », *ECOSYSTEM*, 12.10.2021. <https://www.ecosystem.eco/fr/article/deee-chiffres-monde> (consulté le 9.01.2023)
- [3] Y. Gong, K. J. Cha, J. M. Park, « Deformation characteristics and resistance distribution in thermoforming of printed electrical circuits for in-mold electronics application », *Int J Adv Manuf Technol*, (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05377-9>
- [4] Q. Mu, C. K. Dunn, L. Wang, M. L. Dunn, H. J. Qi, T. Wang, « Thermal cure effects on electromechanical properties of conductive wires by direct ink write for 4D printing and soft machines », *Smart Mater. Struct.*, (2017). <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aa5cca>