

Etude de cas en plastronique IME – Alliance de la plasturgie et de l'électronique pour le packaging de systèmes 3D

Ph. Lombard⁽¹⁾, H. Cauchy-Clerc⁽²⁾, B. Allard⁽¹⁾, M. Cabrera⁽¹⁾

⁽¹⁾Université de Lyon ; Université Claude Bernard Lyon 1 – CNRS – Ecole Centrale de Lyon – INSA de Lyon ; Laboratoire AMPERE – UMR CNRS 5005

F-69621 Villeurbanne, France – www.ampere-lab.fr

⁽²⁾Université de Lyon ; CNRS – INSA de Lyon, Université Jean Monnet St-Etienne, Université Claude Bernard Lyon 1 ; Laboratoire IMP – UMR CNRS 5223

F-69622 Villeurbanne, France – www.imp-umr5223.fr

Pôle CNFM de Lyon-Saint-Etienne – CIMIRLY, INSA Lyon, Villeurbanne, France

Plateforme technique, scientifique et pédagogique :

« Technologies de packaging fonctionnalisé et plastronique 3D »

Contact email : philippe.lombard@univ-lyon1.fr

Au croisement des métiers de la plasturgie et de l'électronique, la plastronique ouvre de nouvelles opportunités pour miniaturiser et intégrer de manière optimale des systèmes électroniques aux objets polymères en trois dimensions – 3D. De nouveaux procédés émergent et trouvent des applications innovantes dans des secteurs d'activité très diversifiés. Cet article introduit une étude de cas qui a été développée avec le procédé plastronique 3D d'Electronique Structurale Surmoulée (ESS) également appelé IME (In Mold Electronics). Dans un objectif pédagogique, nous illustrons un travail pratiques de mise en œuvre. Nous passons en revue l'ensemble des étapes de fabrication d'un système appelé « La Boucle infinie ». L'étude de cas se prête à un travail de Travaux Pratiques dans une approche d'enseignement par projets qui vise l'attractivité et la pluridisciplinarité.

I. Plastronique 3D – Introduction et contexte du projet

La plastronique 3D (1), illustrée Fig.1., est un domaine technologique qui consiste à hybrider des interconnexions électriques (réseau conducteur) et des composants électroniques aux interfaces d'une structure support (substrat) en polymère.

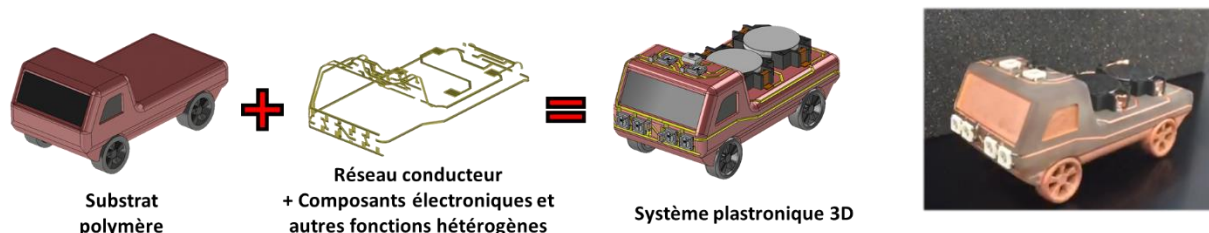


Fig.1. Elaboration d'un dispositif plastronique – Camion réalisé en fabrication rapide (impression 3D) au laboratoire AMPERE : www.youtube.com/watch?v=TBUt4eK3fdE&t=27s.

La géométrie 3D des structures peut être complexe. Elle est élaborée avec des procédés de plasturgie qui mettent en forme des matériaux thermoplastiques : injection ; thermoformage ; fabrication additive ; etc. De nombreuses variantes (méthodes additives

ou soustractives) sont apparues progressivement (2). Celles-ci permettent de définir et de rendre les surfaces conductrices afin de créer des réseaux sur lesquels implémenter des composants électroniques et autres fonctions.

La plastronique permet ainsi d'améliorer la fonctionnalité des dispositifs avec : (i) une intégration voire une imbrication des parties électroniques, électromagnétiques, mécaniques, optiques, thermiques, fluidiques, etc. ; (ii) la création de nouvelles fonctions en prenant avantage des degrés de liberté offerts par la 3D ; (iii) une simplification de l'assemblage, de l'intégration du câblage et des connexions du dispositif, etc. Certaines fonctions peuvent également être créées directement par les surfaces conductrices de façon à réaliser des antennes, des inductances, des capteurs, etc.

Aujourd'hui, les applications sont multiples et concernent de nombreux domaines : télécommunications, transports, médecine, industrie, défense, etc.

Pour envisager d'exploiter avec efficacité un nouveau procédé technologique, il convient d'acquérir de l'expérience de manière ludique et pratique. Aussi, dans un contexte académique (3-6) et une approche par projets, nous abordons dans cet article toutes les étapes de fabrication d'un système plastronique en Electronique Structurale Surmoulée (ESS), également connu sous les termes anglo-saxons d'IME (*In-Mold Electronics*) ou d'IMSE (*In-Mold Structural Electronics*) (3).

Il est à noter que ce projet a été dimensionné et transposé pour que des apprenants puissent, lors de séances encadrées, mobiliser leurs compétences afin de répondre à un cahier des charges précis. Il s'agit d'aborder toutes les étapes d'un système plastronique multidisciplinaire, de la conception à la fabrication, jusqu'aux tests fonctionnels et caractérisation. Dans une démarche d'ingénierie active, il convient de passer par des phases intermédiaires pointant les verrous et limites actuels de la technologie.

II. Plastronique ESS – Procédé et étapes de fabrication

Nous rappelons (Fig.2.) les étapes de fabrication du procédé plastronique ESS type.

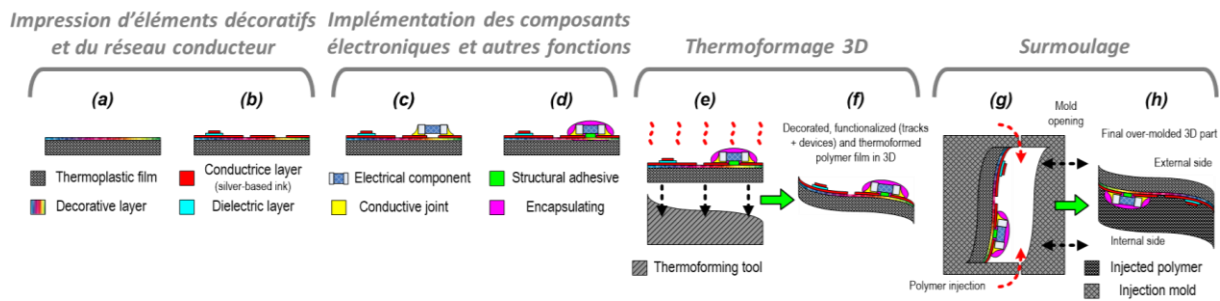


Fig.2. Etapes de fabrication du procédé plastronique ESS type : (a) impression d'une couche décorative sur un film polymère transparent mince ; (b) impressions du réseau conducteur : succession de couches conductrices et diélectriques ; (c) report des composants électroniques et autres fonctions sur un joint conducteur ; (d) collage structurel et/ou encapsulation des composants ; (e) thermoformage 3D ; (f) détournement du système ; (g) surmoulage par injection ; (h) pièce finale fonctionnalisée.

Un film polymère transparent mince d'une épaisseur de l'ordre de 200 μm à 400 μm , typiquement du PolyCarbonate (PC), est utilisé comme substrat de base.

Sur l'une des faces du film, une succession d'impressions, essentiellement des encres, est effectuée pour : (i) déposer une couche décorative permettant d'apporter de l'esthétisme et d'assurer l'attrait du système (Fig.2a.) et (ii) déposer des couches conductrices et diélectriques afin de réaliser le réseau conducteur du circuit électronique (Fig.2b.). Usuellement, le nombre de couches conductrices est limité à deux. Les impressions sont généralement réalisées par sérigraphie. Ce procédé permet un dépôt de matière plus important, quelques μm /passe, avec une résolution géométrique de l'ordre de 50 μm à

200 μm . D'autres procédés ou combinaison de procédés sont envisageables : impression numérique ; offset ; tampographie ; etc.

Des Composants Montés en Surface (CMS) sont ensuite reportés par des machines de placement conventionnelles sur le réseau d'interconnexions 2D (Fig.2c.). Ils sont déposés sur des plages d'accueil préalablement enduites, par sérigraphie ou par dépôt point-à-point, de colles conductrices (Température de transition vitreuse, T_g du PC $\approx 140^\circ\text{C}$). Pour renforcer leur tenue et minimiser les problèmes de décollement ou de « lessivage » (*wash-out*) durant les étapes suivantes, les composants peuvent être collés structurellement au substrat et/ou encapsulés (*glob-top*) (Fig.2d.). Ces opérations renforcent l'adhésion mécanique et minimisent les risques d'arrachement durant l'injection lors de l'étape du surmoulage.

L'ensemble du film est ensuite thermoformé (Fig.2e.), en 3D, sur un maître modèle (moule de thermoformage) dont la géométrie reprend la forme finale de l'objet souhaité.

Une fois détourné (Fig.2f.), nous obtenons une « coque » polymère 3D fonctionnelle. Celle-ci est alors placée dans un moule pour être surmoulée par injection de polymère thermoplastique (Fig.2g.). Pour une question d'affinité, le matériau injecté est généralement de nature similaire à celui du film mince de base.

Le résultat final est un circuit imprimé 3D pris en sandwich entre deux couches de protection polymère (Fig.2h.).

Le polymère de référence (film substrat et surmoulage) est du Polycarbonate – PC. Il présente de bons compromis techniques. D'autres matériaux peuvent être envisagés et/ou sont à l'étude (Polypropylène – PP ; Acide Polylactique – PLA ; etc.).

III. Etapes du projet – « La Boucle infinie »

III.1 – Circuit électronique

Le circuit est une sorte de chenillard, un séquenceur à Diodes Electro-Luminescentes (DEL ou LED – Light-Emitting Diode en anglais), former le symbole « ∞ ». Nous avons appelé ce circuit « La Boucle infinie ». Le schéma électronique est présenté Fig.3. Ce circuit est décliné depuis des décennies dans l'enseignement des systèmes logiques, de l'électronique numérique ou de la programmation bas-niveau de microcontrôleur.

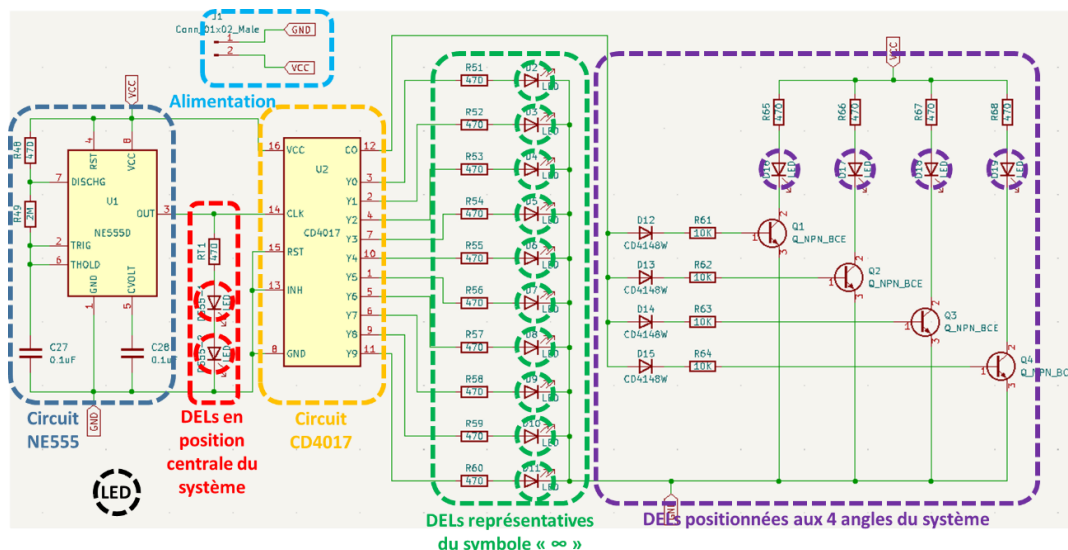


Fig.3. Schéma électronique du système réalisé : « La Boucle infinie ».

Le système est basé sur l'utilisation combinée de deux Circuits Intégrés (CI) :

- Un NE555 qui est un CI permettant de générer un signal d'horloge (Clk),
- Un CD4017 qui est un compteur CMOS décimal de type Johnson à 5 étages. Les sorties sont activées séquentiellement à chaque coup d'horloge et pilotent les DELs, en mode cathode commune, pour construire le symbole « ∞ ».

Six DELs supplémentaires complètent le système : (i) deux au centre s'allumeront au rythme de l'horloge, (ii) les autres, disposées dans chacun des quatre angles, s'illumineront à la fin de chaque cycle. D'autres composants électroniques (résistances, diodes de signal (CD4148W) et transistors NPN) complètent le circuit qui comporte ainsi 50 composants. Le système fonctionne sous une tension comprise entre 6 et 12V. En pratique, ce cas d'étude est représentatif de fonctions généralement dévolues à des objets plastroniques.

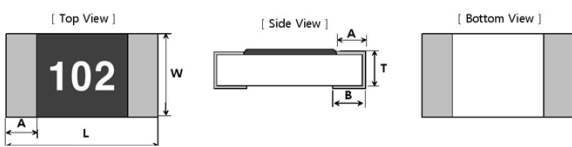
III.2 – Contraintes de routage, packaging des composants et de placement

Pour simplifier les contraintes de sérigraphie, notamment : (i) de coût, avec le nombre d'écran à réaliser, (ii) de difficultés techniques : finesse des motifs, précision de superposition et d'alignement des couches d'encres conductrices et diélectriques, (iii) de temps de post-traitement, comme l'étuvage (20 min à 120°C) entre chaque impression, etc., nous avons contraint le routage du réseau conducteur à une seule couche d'encre conductrice. Cela impose de mettre en place une stratégie de routage réfléchie et rigoureuse.

De plus, pour répondre à un besoin esthétique et lorsque des pistes conductrices se croisent, celles-ci passeront sous (i) les composants existants, (ii) des résistances de pont (valeur 0 Ohm), préalablement rajoutées. Nous avons fixé la largeur des pistes à 600 µm. Cette dimension correspond à la largeur des plages d'accueil des deux CIs. Nous avons également limité le passage à une seule piste sous un composant.

Dans un but pédagogique, le choix de l'empreinte (packaging) des composants a été fait afin que ceux-ci puissent être reportés manuellement. Ainsi, nous avons opté pour l'utilisation de résistances de pont de type 1206 (Fig.4.). Pour les autres résistances, condensateurs et DELs, nous utiliserons un boîtier de type 0805. En ESS, il est plus fréquent de travailler avec des composants utilisant des boîtiers du type 0603 et en deçà, mais cela aurait nécessité l'utilisation d'une machine de placement automatique.

Résistances, condensateurs, DELs



	Size(mil)	L	W	T	A	B	Unit Weight
Usuellement en IME	RC0603(0201)	0.60±0.03	0.30±0.03	0.23±0.03	0.10±0.05	0.15±0.05	0.15mg
	RC1005(0402)	1.00±0.05	0.50±0.05	0.35±0.05	0.20±0.10	0.25±0.10	0.6mg
	RC1608(0603)	1.60±0.10	0.80±0.10	0.45±0.10	0.30±0.20	0.35±0.10	2.1mg
Dans ce projet	RC2012(0805)	2.00±0.20	1.25±0.15	0.55±0.10	0.40±0.20	0.35±0.20	4.9mg
	RC3216(1206)	3.20±0.20	1.60±0.15	0.55±0.10	0.45±0.20	0.40±0.20	9.5mg

Fig.4. Packaging des résistances, condensateurs et DELs utilisés. (Source – @ Crédit web)

Une originalité et difficulté supplémentaire porte sur le choix du packaging cylindrique (LL34) des quatre diodes de signal. Celui-ci offre, par nature, moins de surface de contact avec les plages d'accueil et donc moins d'adhésion mécanique. Avec les colles conductrices, il ne bénéficie pas non plus de la remontée, par capillarité, du joint de brasure lorsque les composants sont brasés. Les transistors auront un boîtier de type SOT-23 et les CIs, respectivement SO-8 pour le NE555 et SO-16 pour le CD4017.

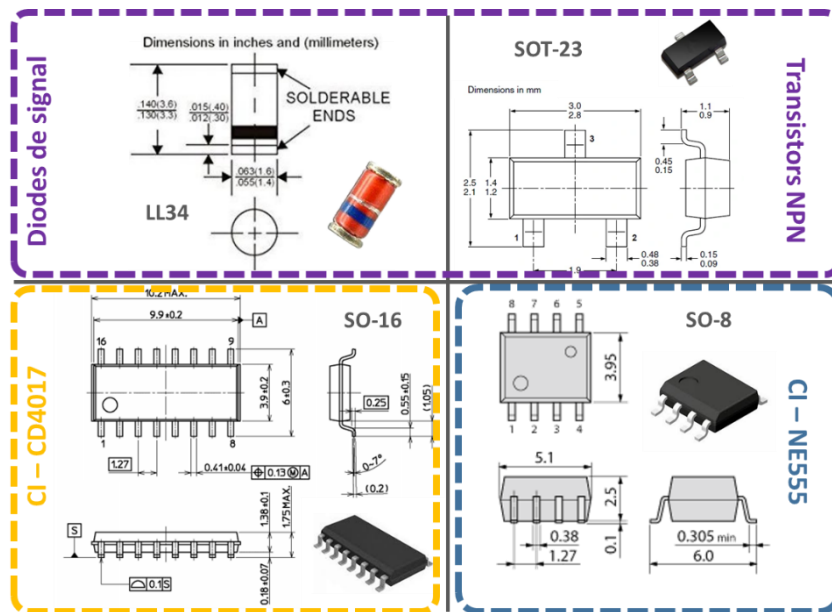


Fig.5. Packaging des diodes, transistors et CI NE555 et CD4017 utilisés. (Source – Crédit @ Web)

Une attention toute particulière a dû être portée au placement des composants et au routage judicieux des pistes pour respecter les contraintes précédemment établies et utiliser le moins de composants possible. Le routage du circuit final et une illustration du rendu 2D sont présentés Fig.6. Le système final comporte un total de 63 composants pour une dimension de 60 mm*128 mm.

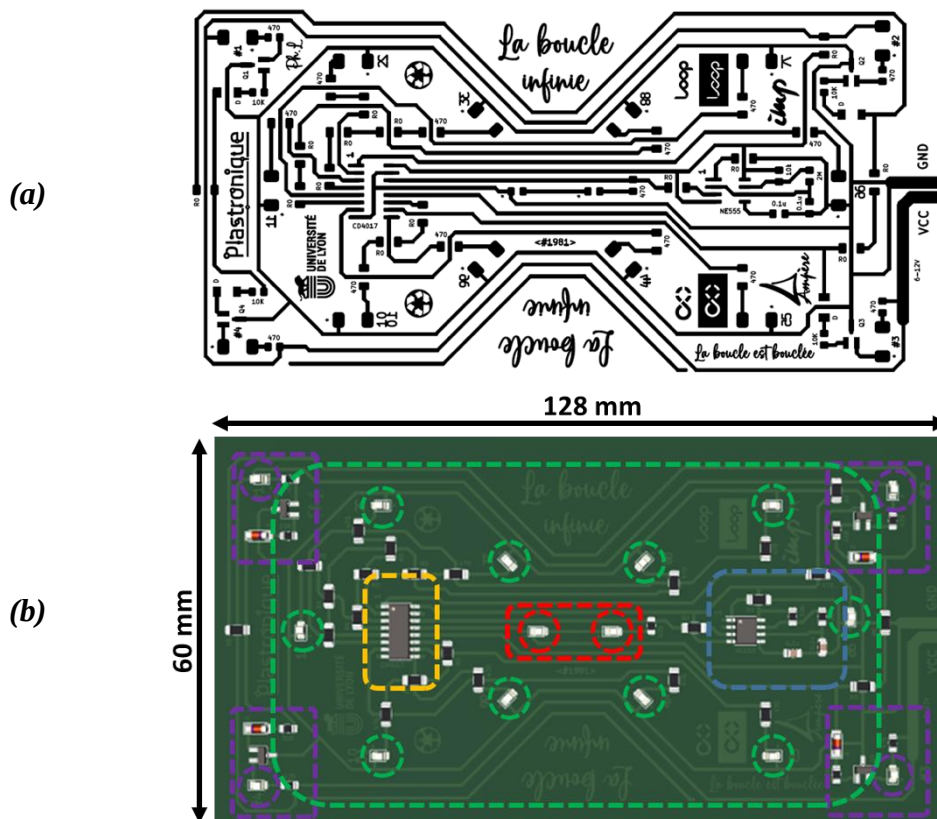


Fig.6. Routage (a) et illustration 2D (b), avec le logiciel Kicad, du circuit final « La Boucle Infinie ». Le jeu des couleurs reprend les blocs fonctionnelles illustrées Fig. 3 et surligne la présence des DELs.

III.3 – Circuit 2D : Sérigraphie et implémentation des composants

Le routage du circuit servira également de typon pour la réalisation de l'écran (Fig.7.) de sérigraphie, technique avec laquelle sera imprimé le circuit sur le film polymère.

Les motifs noirs (Fig.6.) correspondent aux ouvertures dans le film photosensible, préalablement déposé sur la toile de l'écran de sérigraphie, au travers desquelles passera l'encre conductrice après raclage (Fig.8.). Une machine de sérigraphie semi-automatique sera utilisée (Fig. 9.).

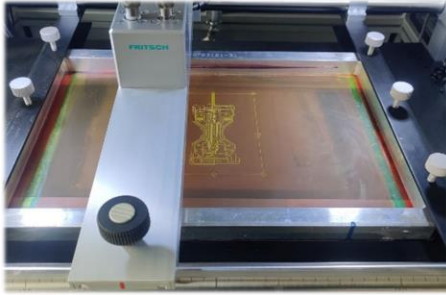


Fig.7. Ecran de sérigraphie.



Fig.9. Machine de sérigraphie semi-automatique utilisée.

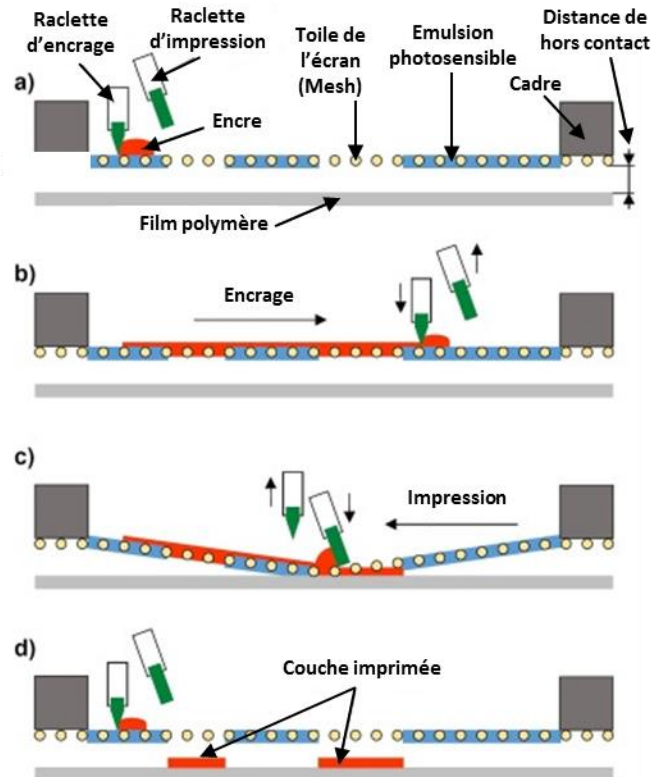
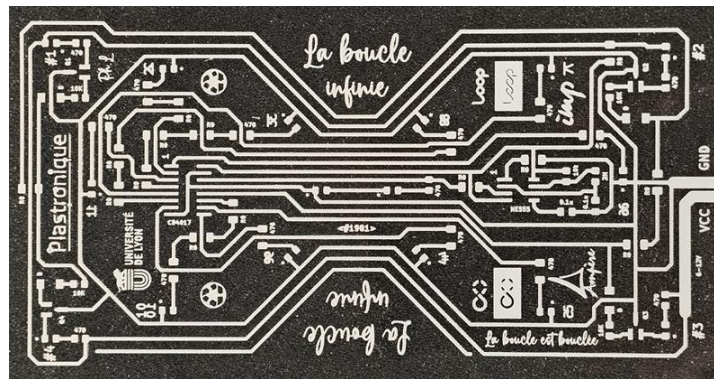


Fig.8. Schéma de principe du procédé de sérigraphie : décomposition des étapes du procédé d'impression avec pré-encre. (Source – Adapté de @ D. Moldenhauer).

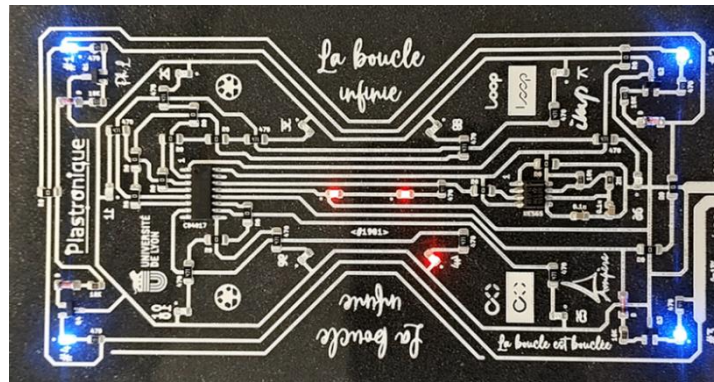
L'encre utilisée est une encre de référence en ESS. Il s'agit de l'encre Dupont ME603. Elle est composée de particules d'argent (assurant la conduction électrique) ainsi que d'un solvant (fluidifiant de l'encre) et d'un liant polymère (élasticité + fixation de l'encre). Le taux de charge (en masse) de l'encre est de l'ordre de 53,5-57% à 150°C avec une viscosité de 25-50 Pa.s et une résistivité $< 35 \text{ m}\Omega/\text{sq}/\text{mil}$ (données fabricant).

Une fois le motif imprimé, le film est recuit par étuvage à 120°C pendant 20 minutes (préconisations de Dupont). Cette opération a pour objectif de « fritter » les particules d'argent par évaporation du solvant contenu dans l'encre. Cela permet ainsi d'augmenter la conductivité des pistes électriques.

(a)



(b)



(c)

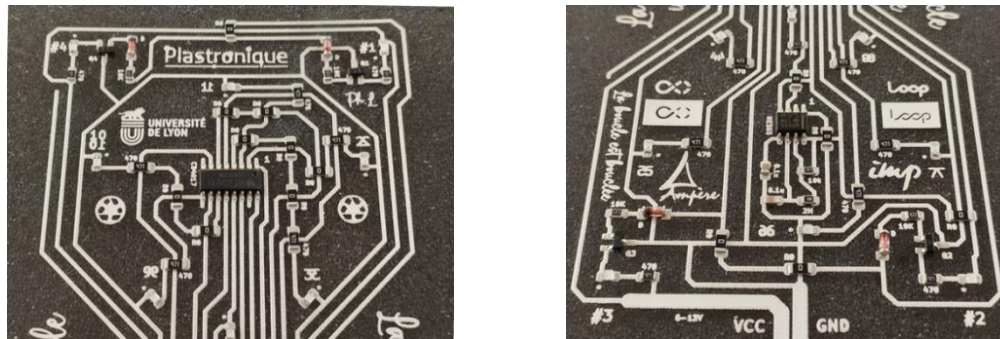


Fig.10. Circuit « La Boucle infinie » : (a) après sérigraphie et étuvage, (b) après implémentation : <https://www.youtube.com/shorts/FRMfilbEyI4?feature=share>, collage des composants et étuvage, (c) vues agrandies du circuit.

Une fois l'opération d'étuvage terminée, les composants sont implémentés sur le circuit (Fig.10.). L'assemblage se fait par l'intermédiaire d'une colle conductrice également à base d'argent. La colle utilisée, Dupont ME902, est une colle de référence en ESS. Le taux de charge (en masse) de l'encre est de l'ordre de 75-77% à 150°C avec une viscosité de 40-90 Pa.s et une résistivité de 100-150 mΩ/sq/mil (données fabricant).

La colle peut être déposée en point par point avec une seringue ou par sérigraphie. Pour une question d'homogénéité du dépôt et de rapidité d'exécution, nous avons retenu la solution de sérigraphie. Une fois le report de l'ensemble des composants terminé, le film est de nouveau étuvé à 120°C pendant 20 minutes.

III.4 – Circuit 3D : Thermoformage

Une fois le circuit 2D fonctionnel l'étape suivante est la mise en forme 3D par thermoformage. Nous pouvons distinguer trois grandes techniques pour procéder au formage : i) l'évacuation d'air : la feuille colle au moule par dépression, ii) l'air pressurisé :

le film est pressé contre le moule par un flux d'air, iii) la force mécanique : le film est contraint par un outillage adapté.

Dans notre cas, nous avons utilisé un procédé de thermoformage par le vide. Les différentes étapes sont (Fig.11.) : i) soumettre à la chaleur le film polymère afin de la rendre malléable (température de transition vitreuse – $^{\circ}\text{Tg}$ du PC $\approx 140^{\circ}\text{C}$), ii) une fois la température optimum de thermoformage ($^{\circ}\text{Tg}$) du matériau atteint, les plateaux chauffants sont retirés et le maître modèle, installé sur un porte-outil est élevé en position de formage. Suivant si le maître modèle est dit *mâle* (convexe) ou *femelle* (concave), de l'air comprimé peut être insufflé afin de former une bulle de façon à ce que celui-ci puisse être parfaitement drapé, iii) Une pompe à vide vient ensuite aspirer tout l'air contenu dans l'enceinte étanche. Le film « ramolli » peut donc facilement se conformer au maître modèle. Pour éviter les poches d'air, une attention toute particulière devra être portée à la porosité du porte-outil et à la présence d'évents judicieusement placés sur le maître modèle, iv) une fois la pièce formée, celle-ci refroidit en restant sur le moule avant d'être démoulée et évacuée. Il est important de laisser à la pièce le temps de se refroidir suffisamment afin de la retirer du maître modèle sans déformation, défaut ou adhésion. La période de durcissement dépend de l'épaisseur de la pièce et de l'efficacité du système de refroidissement.

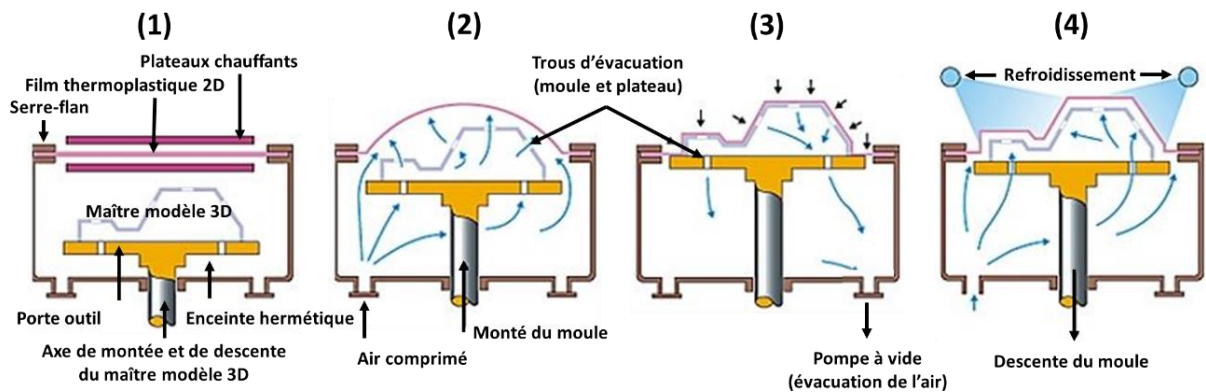
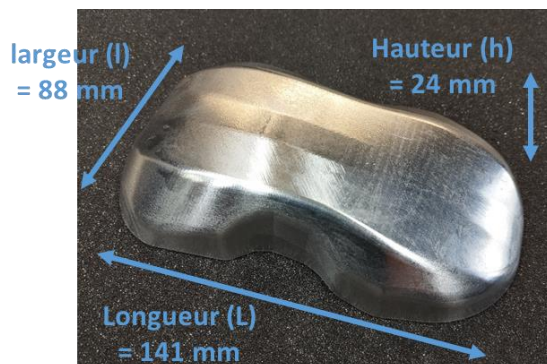


Fig.11. Principe de thermoformage : (1) chauffage du film ; (2) évacuation du chauffage et montée du maître modèle ; (3) aspiration du film par mise sous vide de l'enceinte ; (4) refroidissement et descente du maître modèle. (Source – Adapté de @ Larousse)

Le maître modèle, qui peut inspirer la forme d'une voiture, que nous avons utilisé été réalisé en aluminium. Il a été introduit dans la machine de thermoformage (Fig. 12).



(a)



(b)

Fig.12. Thermoformage : (a) maître modèle « voiture » ; (b) Machine de thermoformage à dépression.

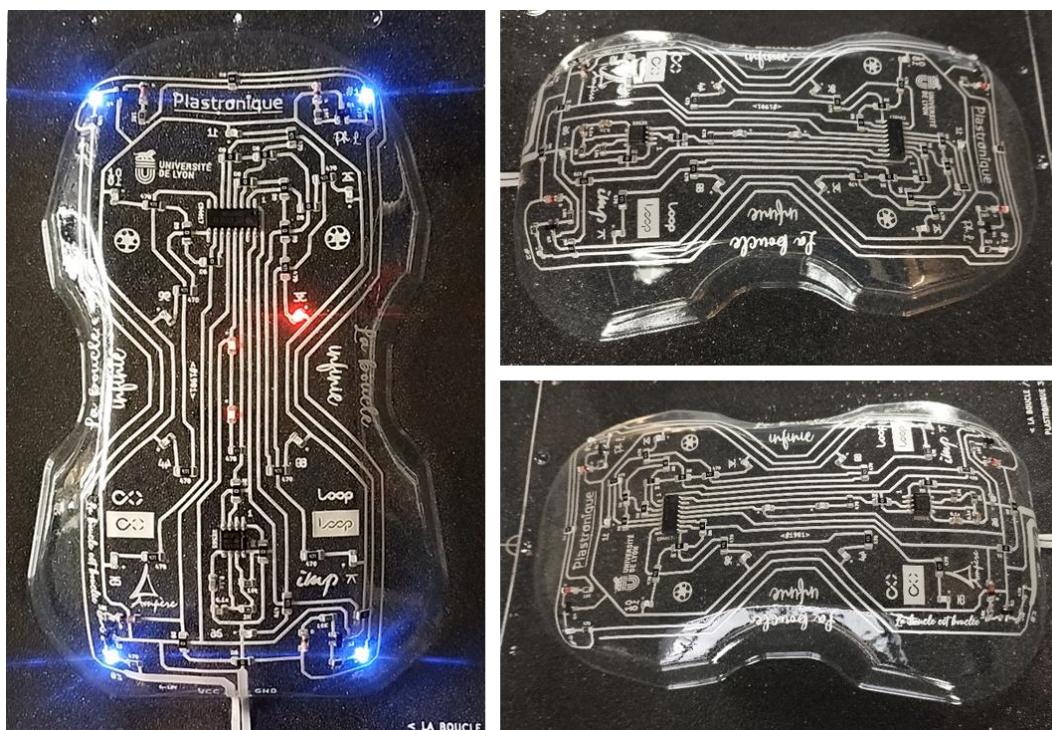


Fig.13. Circuit 3D « La Boucle Infinie » après thermoformage : <https://youtube.be/2v8XK4NGMMk>

Il est très important de noter que le passage de la 2D à la 3D par thermoformage peut, en fonction du rapport de forme du maître modèle, introduire des étirements très importants du film. Les conséquences directes associées (Fig.14.) sont : (Fig.14-1) la distorsion géométrique du réseau conducteur ; (Fig.14-2) un risque de craquelure de l'encre : (i) conductrice ; (ii) diélectrique ; (iii) décoratives.

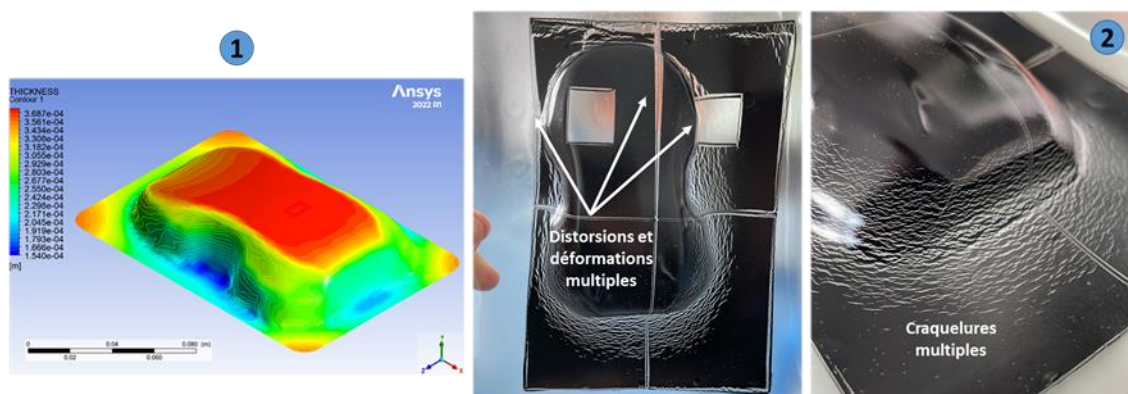


Fig.14. Illustrations : 1) distribution d'épaisseur du film (en m) après thermoformage d'un film PC de 375 μm à l'origine. Modélisation viscoélastique sous le logiciel Ansys Polyflow ; 2) distorsions et craquelures introduites lors de l'étirement du film polymère durant la phase de thermoformage, du 2D au 3D. (Source – @ T. Guérin)

Des modèles de simulations numériques prédictifs ont été développés (laboratoire Ampère). Ceux-ci prennent en considération les propriétés des encres, du polymère, des composants et de la géométrie 3D du maître modèle. Ces modèles permettent d'anticiper et de pré-distordre les motifs imprimés de manière à ce que ceux-ci correspondent à nos attentes une fois thermoformés. Ces travaux scientifiques dédiés feront l'objet d'un article

dans une journal. Dans cet exemple, les déformations ont été considérées comme admissibles.

III.4 – Détourage

Une fois le film thermoformé, la pièce est détournée (Fig.15.). Cette opération permet de retirer les bords excédentaires de la pièce souhaitée. Pour ce faire, nous avons développé un outil de détourage (Fig.15a.) que nous utiliserons avec une presse à plateau (Fig.15b.). Nous pouvons ainsi introduire la « coque » 3D dans le moule d'injection.



Fig.15. L'outil de détourage conçu spécialement pour la découpe des films mis en forme en 3D avec le moule « voiture » et un exemple de film thermoformé après détourage

III.6 – Tests électriques et tests fonctionnels

Il s'entend que les tests électriques et tests fonctionnels doivent être validés à chaque étape du procédé de fabrication ESS. Aussi, pour utiliser autant que faire se peut les techniques et moyens de tests conventionnels (2D), il convient d'anticiper la 3D en ayant préalablement bien identifié les points et conditions de tests. Il s'agira de mettre en place des règles de bonnes pratiques en fonction des moyens à disposition.

Aucun circuit défaillant ne peut prétendre passer à l'étape de fabrication $n+1$.

III.7 – Injection

L'injection plastique, aussi appelée moulage par injection ou injection thermoplastique permet la fabrication de pièces identiques en petite, moyenne ou grande série (fabrication de masse) dans une large palette de matière plastique. Il s'agit d'une alternative à de nombreux matériaux et techniques (usinage métal, impression 3D ou usinage plastique) plus chers tant au niveau de leurs composants, leur poids que de leur temps de fabrication. C'est également un procédé de fabrication idéal pour réaliser des pièces de précision et obtenir des produits de toutes tailles, solides et de bonne qualité. De plus, nous pouvons souligner que les matériaux thermoplastiques utilisés sont souvent recyclables et réutilisables sans perte significative de leurs caractéristiques techniques.

Le moulage par injection consiste à injecter, dans un moule, de la matière thermoplastique initialement sous forme de granulés. Pour ce faire, nous utilisons une presse à injecter dont nous rappelons le schéma de principe et organes principaux (Fig.16.).

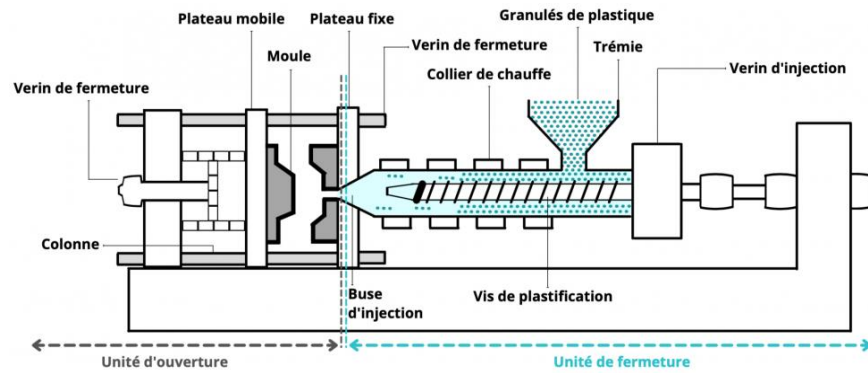


Fig.16. Schéma de principe d'une presse à injecter. (Source – @ Crédit web)

Les principales étapes de l'injection plastique, décomposées (Fig.17.) sont :

- (1) Concevoir le moule : il permet au plastique de se conformer à la forme de la pièce souhaitée. Sa fabrication doit respecter de nombreuses règles et permettre une éjection facile des pièces. L'optimisation et la prédiction des résultats sont obtenus par l'intermédiaire d'outils numériques de simulation (Fig.18.),
- (2) Installer le moule : une fois montée sur la presse chaque partie du moule va être pressée l'une contre l'autre. En parallèle, une dose appropriée de granulés thermoplastiques est introduite dans une vis de plastification pour y être brassés et chauffés. Les granulés de plastique sont ainsi mélangés et fondus,
- (3) Injecter la matière : la matière plastique ramollie est injectée sous haute pression afin de garantir que le moule soit complètement rempli par la matière,
- (4) Refroidir la matière : une fois la matière injectée dans le moule il convient de refroidir la pièce afin de minimiser les risques de défauts (tels que déformations, arrachements, etc.). La pièce prend sa forme finale,
- (5) Ejecter la pièce : une fois la pièce éjectée du moule, un nouveau cycle commence.

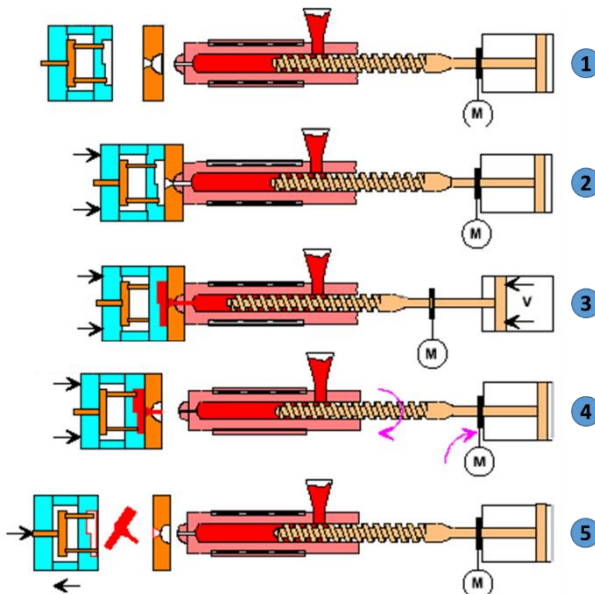


Fig.17. Principales étapes de Thermo-injection plastique : 1) ouverture moule et dosage vis de plastification ; 2) fermeture moule et avance ponton ; 3) injection et maintien ; 4) refroidissement, recul ponton et dosage ; 5) ouverture moule et éjection de la pièce. (5).

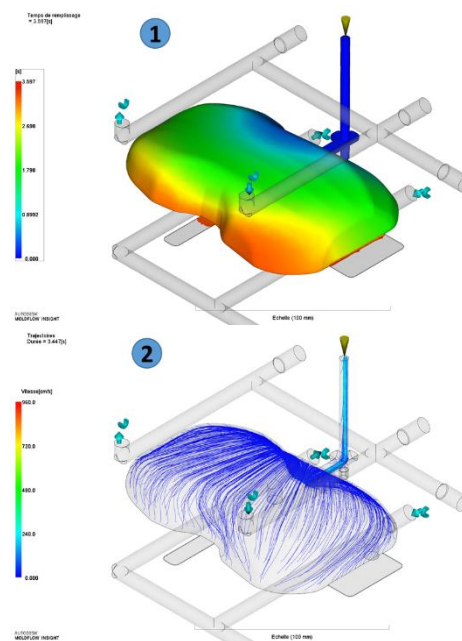


Fig.18. Simulations MoldFlow : 1) temps (s) de remplissage de l'empreinte du moule. 2) trajectoire de la matière lors du remplissage de l'empreinte du moule, vitesse en cm/s. PC Lexan 143R.

Il convient de détacher et d'ébavurer la « carotte » d'injection liée à la pièce. Celle-ci correspond, dans le moule, au cheminement de la matière entre la tête d'injection et la pièce à proprement parler.

Nous illustrons (Fig.19.) la presse à injecter électrique (Billion H260) ainsi que le moule d'injection 2D et 3D que nous avons spécifiquement développé pour pouvoir étudier diverses configurations.

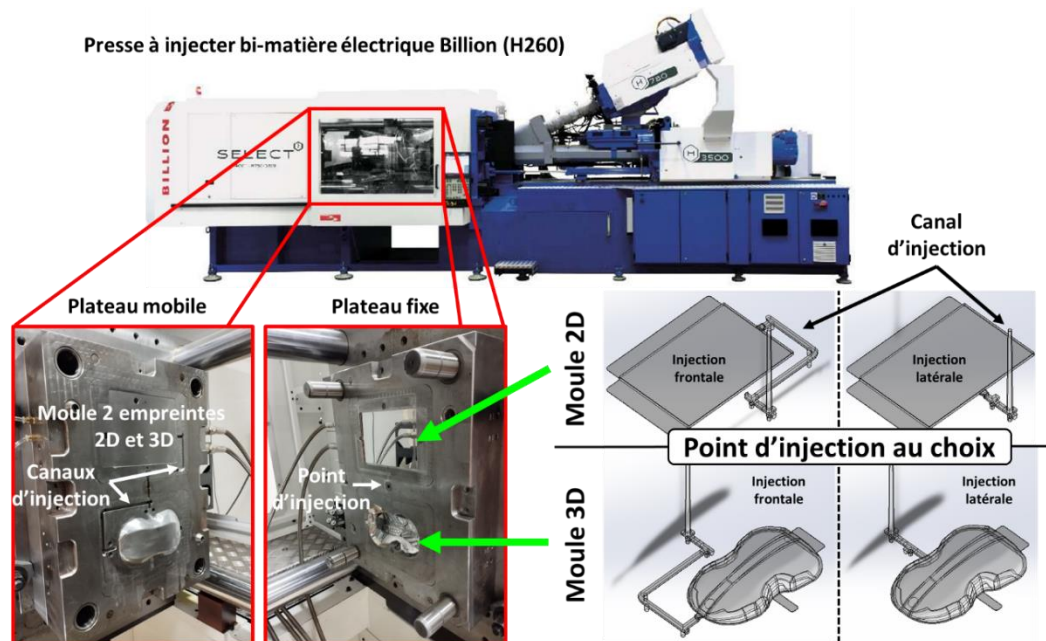
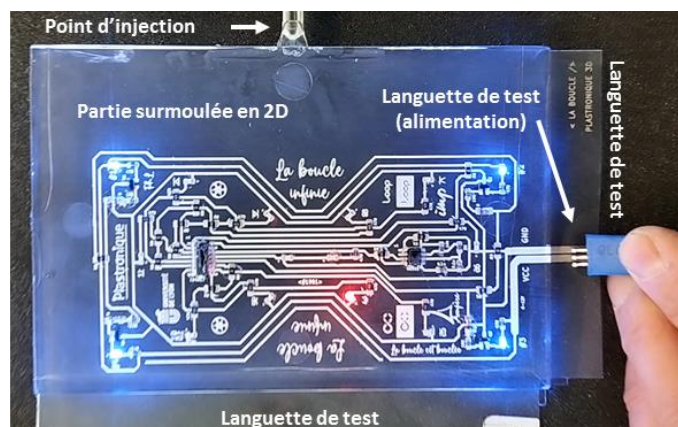


Fig.19. Presse à injecter électrique (Billion H260) et moule d'injection 2D et 3D développé avec les diverses variantes possibles. (D'après J.-Y. Charneau, Laboratoire IMP– Oyonnax)

III.8 – Surmoulage

Nous illustrons (Fig.20.), les premiers résultats obtenus d'un film fonctionnalisé et surmoulé en 2D.



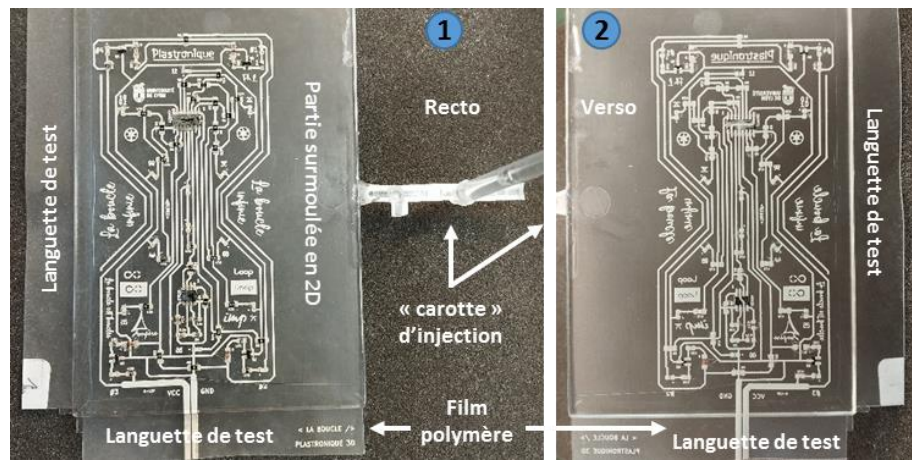


Fig.20. Circuit ESS 2D « La Boucle Infinie » après surmoulage : <https://www.youtube.com/shorts/ILDufAlmhsM?feature=share>.

L'épaisseur finale des pièces est conditionnée par la cavité entre les 2 parties (fixe et mobile) du moule. Celle-ci est principalement définie par : (i) l'épaisseur du film de base, (ii) la hauteur des composants les plus hauts, (iii) l'épaisseur de surmoulage souhaitée. Dans cet exemple, les pièces ont une épaisseur moyenne de 4 mm.

IV. Conclusion

Alliant la plasturgie et l'électronique pour le packaging de systèmes 3D, cet article décrit une étude de cas pratique appelée « La Boucle infinie ». Ce projet académique de formation est centré autour d'un procédé plastronique appelé ESS ou encore IME. Ce procédé est original et en forte expansion dans de nombreux domaines de l'industrie (automobile, aéronautique, médicale, électroménager, loisirs, etc.). Il utilise des moyens conventionnels de l'électronique et de la plasturgie. Il marie ingénieusement l'Electronique Imprimée – EI, en 2D, et des procédés de transformation et de mise en forme, en 3D, de thermoplastiques.

Dans une démarche active d'ingénierie ce projet expérimental aborde des enjeux multi-physiques et transdisciplinaires : électroniques et plasturgiques pour le packaging 3D. Ainsi, les apprenants sortent de leur zone de confort et de compétences (généralement segmentées et orientées). Ils rassemblent leurs connaissances en abordant un projet dans sa globalité tout en identifiant les verrous scientifiques. Il s'agit également de quantifier les résultats obtenus en connaissance des contraintes techniques et des enjeux sociaux-environnementaux de demain.

Dans l'avenir, nous reviendrons sur le surmoulage 3D et les problématiques associées. Nous intégrerons également des contraintes liées à l'écoconception et aux enjeux environnementaux. Il sera question d'utiliser de nouveaux matériaux (recyclés et biosourcés) et d'intégrer la problématique de fin de vie ainsi que les enjeux environnementaux.

Remerciements

Les auteurs remercient tout particulièrement le Ministère français de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation ; la Région Auvergne Rhône-Alpes pour son soutien financier dans le cadre du programme COMSUP et du projet PIA-III « The Plast to Be » réalisé en partenariat avec la Communauté du Haut-Bugey. Les auteurs sont reconnaissants au GIP-CNFM (6) et aux projets IDEFI-FINMINA (7) et INFORISM (8)

pour leurs soutiens et remercient chaleureusement l'équipe technique de l'IMP-INSA d'Oyonnax pour l'environnement en plasturgie : M. Arli et H. Lakhdar sous la direction de J.-Y. Charneau.

Références

1. Ph. Lombard, M. Cabrera, V. Semet, B. Allard, S. Kamotesov, Maël Moguedet et J-Y Charneau Formation en Plastronique et aux dispositifs MID — Plateforme pédagogique et scientifique; Exemple de conception, réalisation et caractérisation d'un capteur inductif multidirectionnel de proximité pour la détection d'approche 3D – *J3eA 16, 1013* (2017)
2. J. Franke (ed.). Three-Dimensional Molded Interconnect Devices (3D-MID): Materials, Manufacturing, Assembly and Applications for Injection Molded Circuit Carriers. *Carl Hanser Verlag GmbH Co KG* (2014).
3. Ph. Lombard, T. Gerges, B. Allard, S. A. Lambert et M. Cabrera, Plastronique 3D et 3D-MID, programme innovant d'enseignement supérieur et de formation à l'Université de Lyon, *J3eA 18, 1014* (2019).
4. Ph Lombard, T. Gerges, J.-Y. Charneau, B. Allard et M. Cabrera, ; Procédé plastronique Electronique Structurale Surmoulée (ESS, IME – In Mold Electronics) dans un projet de mise en œuvre pratique – *J3eA 21, 1012* (2022)
5. <https://www.universite-lyon.fr/plastronique3d>.
6. GIP-CNFM : Groupement d'Intérêt Public - Coordination Nationale pour la formation en Microélectronique et en nanotechnologies. Website: <http://www.cnfm.fr>
7. ANR IDEFI-FINMINA : Initiative d'Excellence - Formation Innovante en Microélectronique et Nanotechnologies, ANR-11-IDFI-0017.
8. INFORISM, Ingénierie de FORMations Innovantes et Stratégiques en Microélectronique, projet ANR-23-CMAS-0024-INFORISM au titre du programme France 2030. Ce projet à 5 ans a démarré au cours de l'année académique 2023-2024.