

Procédé plastronique Electronique Structurale Surmoulée (ESS, IME – In Mold Electronics) dans un projet de mise en œuvre pratique

Ph. Lombard⁽¹⁾, T. Gerges⁽¹⁾, J.-Y. Charmeau⁽²⁾, B. Allard⁽¹⁾, M. Cabrera⁽¹⁾

⁽¹⁾ Université de Lyon ; CNRS – Ecole Centrale de Lyon – INSA de Lyon – Université Claude Bernard Lyon 1 ; Laboratoire AMPERE – UMR CNRS 5005, www.ampere-lab.fr
F-69621 Villeurbanne, France

⁽²⁾ Université de Lyon ; CNRS – INSA de Lyon, Univ. Jean Monnet St-Etienne, Univ. Claude Bernard Lyon 1 ; Laboratoire IMP – UMR CNRS 5223, www.imp-umr5223.fr
F-69622 Villeurbanne, France

GIP-CNFM ; Pôle CNFM de Lyon – CIMIRLY

Plateforme technique, scientifique et pédagogique :
« Technologies de packaging fonctionnalisé et plastronique 3D »

Contact : philippe.lombard@univ-lyon1.fr

Au croisement des métiers de la plasturgie et de l'électronique, la plastronique constitue un nouveau champ technologique et 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 de nombreux secteurs d'activité.

A cet égard, l'intérêt des industriels et des étudiants est en pleine croissance. Il convient de répondre à ces attentes avec un éventail de formations appropriées et de les accompagner par des enseignements spécifiques que nous souhaitons originaux.

Cet article introduit la plastronique et plus particulièrement le procédé plastronique 3D appelé Electronique Structurale Surmoulée (ESS, IME – In Mold Electronics). Il présente également les étapes du travail expérimental et pratique de mise en œuvre d'un projet étudiant. L'objectif est de s'adapter aux niveaux des apprenants et aux objectifs pédagogiques désirés. Il s'agit de réaliser, dans son ensemble, un dispositif fonctionnel concret suscitant l'éveil et l'intérêt des apprenants.

I. Contexte académique et pédagogique

Depuis 2018, les étudiants issus de Master de 1^{ère} ou de 2^{ème} année et cycle ingénieur ont la possibilité d'intégrer une formation spécialisée en plastronique à Lyon (1)(2)(3). Cette formation (4) couvre un champ de connaissances pluridisciplinaire alliant les matériaux ; la chimie ; l'électronique ; la plasturgie ; la conception mécanique ; la caractérisation physico-chimique de surface ; etc. Le fonctionnement optimal d'une promotion repose sur un équilibre entre les cursus initiaux portés par les étudiants : chimie, matériaux, mécanique et électronique.

Dans une approche projet, le programme pédagogique repose sur l'équilibre des enseignements pratiques et théoriques pour (i) mettre en évidence et (ii) comprendre les phénomènes physiques mis en jeux.

En trinôme ou quadrinôme, les apprenants mobilisent leurs compétences pour répondre au cahier d'un projet transdisciplinaire. Il s'agit d'aborder toutes les étapes d'un système plastronique : de la conception à la fabrication, jusqu'aux tests fonctionnels et caractérisations. Pour ce faire, dans une démarche d'ingénierie, il convient de passer par des phases intermédiaires touchant aux verrous et limites actuels de la technologie.

Les apprenants se retrouvent rapidement valorisés au sein de leur équipe en tant que référent dans leur domaine d'expertise d'origine. Cela leur permet (i) de mettre en branle et partager leurs connaissances déjà acquises dans un rôle « d'expert scientifique » et (ii) d'aborder plus sereinement et rapidement de nouvelles notions dans des domaines qui leur étaient jusqu'à présent fort étrangers. Cette dynamique de groupe est fédérative et permet de balayer un large spectre de compétences en peu de temps. Cela permet également de mettre en perspective le contenu de ces enseignements dans une formation plus large. A noter que ce projet académique a été soutenu par le projet IDEFI-FINMINA (5).

II. Plastronique 3D – Contexte scientifique et cadre du projet

L'industrie électronique a connu des révolutions successives suite à l'invention du transistor, du circuit intégré et de nombreux autres composants. Cet essor n'aurait pas été possible sans le développement continu des procédés de fabrication de Circuits Imprimés (CI) qui permettent leur mise en œuvre. Jusqu'à présent, la plupart des CI avaient une géométrie quasi-plane. Une évolution majeure en cours est le passage aux CI à trois dimensions (3D), connus sous le nom de dispositifs plastroniques 3D. La plastronique est un domaine de nature intrinsèquement multi-physique et transdisciplinaire : électronique ; mécanique ; matériaux ; chimie ; etc.

Par définition, un tel dispositif est un système hybride (Fig. 1) dont : (i) la structure support (substrat polymère) est élaborée par mise en forme de matières thermoplastiques (fabrication additive, thermoformage, injection) ; (ii) la surface, tridimensionnelle, est pourvue d'un réseau d'interconnexions de pistes conductrices d'électricité qui épousent la forme de la pièce.

Des Composants Montés en Surface (CMS) sont reportés et assemblés, sur le réseau conducteur, de sorte que l'ensemble constitue un véritable CI 3D. L'objectif est de prendre avantage de la géométrie 3D des objets afin d'améliorer leur fonction, intégration, usage, ergonomie et design. L'électronique ajoute « l'intelligence » aux pièces plastiques qui assurent les fonctions mécaniques et le packaging final du système. La fabrication d'un tel système nécessite une vision holistique (fonction, conception, fabrication et tests, conditions de travail et environnement).

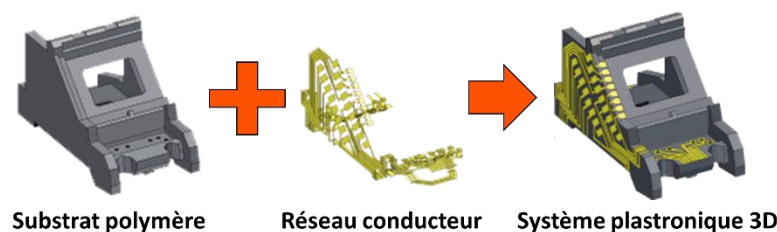


Fig.1. Hybridation, sur la surface 3D, d'un substrat polymère et d'un réseau conducteur, pour constituer un dispositif plastronique 3D – Source Panasonic.

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

Les enjeux environnementaux imposent également des problématiques fortes d'eco-efficiences dans la fabrication des systèmes, notamment dans le choix des matériaux primaires (recyclés et/ou bio-sourcés) et à leur revalorisation en fin de vie. Ces questions suscitent aujourd'hui un fort engouement et de nombreux travaux et sont déjà intégrés dans nos formations.

Différentes technologies de fabrication plastronique sont connues ou en cours de développement (6). Parmi les plus avancées et répandues : la structuration laser directe LDS (Laser Direct Structuring), utilisée dans la fabrication de plus de la moitié des antennes de smartphones et tablettes ; la bi-injection (2K), utilisée pour des micro-connecteurs électriques, etc.

Un nouveau procédé de fabrication dénommé Electronique Structurale Surmoulée (ESS) (IME In-Mold Electronics ou IMSE In-Mold Structural Electronics) commence à prendre un essor considérable. D'après une étude du cabinet IDTechEx, le marché de l'ESS devrait croître de quelques millions de dollars actuellement à 700 M\$ en 2028 (7).

III. Plastronique ESS – Procédé et étapes de fabrication

Le procédé plastronique ESS est en émergence dans l'industrie (automobile, aéronautique, médicale, électroménager, loisirs, etc.), notamment pour développer (Fig. 2) de nouvelles Interfaces Homme-Machine (IHM). Cette technologie propose une alternative esthétique, économique et fonctionnelle assez différente par rapport aux IHM traditionnelles.



Fig.2. Exemple : (a) routage électrique ; (b) d'un système 3D ; (c) en fonctionnement ; (d) avec couche décorative, (e) d'une IHM ; réalisée en technologie plastronique ESS – Source : TactoTek (*imse ohcp*).

Les composants traditionnels (interrupteurs mécaniques, boutons poussoir et rotatifs, écrans, etc.) insérés dans les panneaux de commande des machines ou les tableaux de bord de véhicules automobiles, peuvent être remplacés par des capteurs sensitifs, des commandes à retour haptique, des écrans et guides d'ondes lumineux incurvés, etc.

Nous l'illustrons (Fig. 3 et 4) comment l'industrie automobile prévoit d'utiliser massivement l'ESS dans l'habitacle et autres pièces extérieures telles que le bouclier (pare-chocs) avant et arrière. Ces derniers intègrent déjà de nombreuses fonctions mécaniques (radars, lidar, détecteurs et caméras divers, dégivreur, spoilers actifs, etc.) traditionnellement câblées. Bien d'autres éléments extérieurs connexes et applications (transmission des informations et de l'énergie, interconnexions diverses, signalétique) peuvent être considérés et tirer profit de cette technologie.

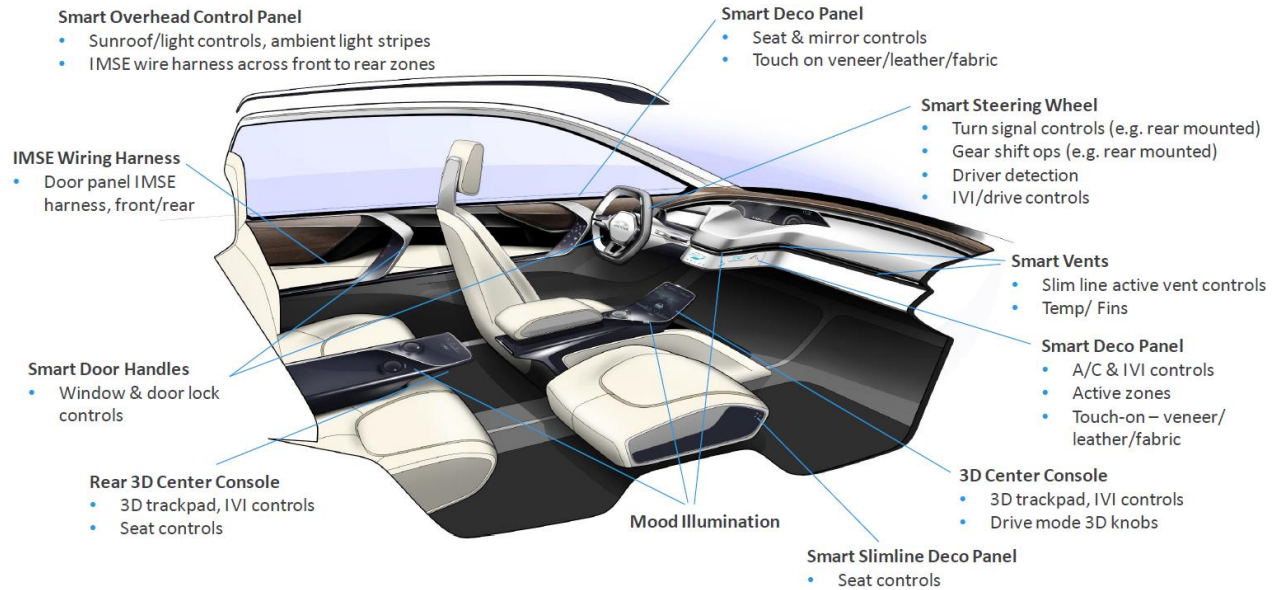


Fig.3. Exemples d'applications où pourrait s'intégrer la technologie plastronique ESS dans le domaine de l'automobile et plus particulièrement sont habitacle – Source : TactoTek.

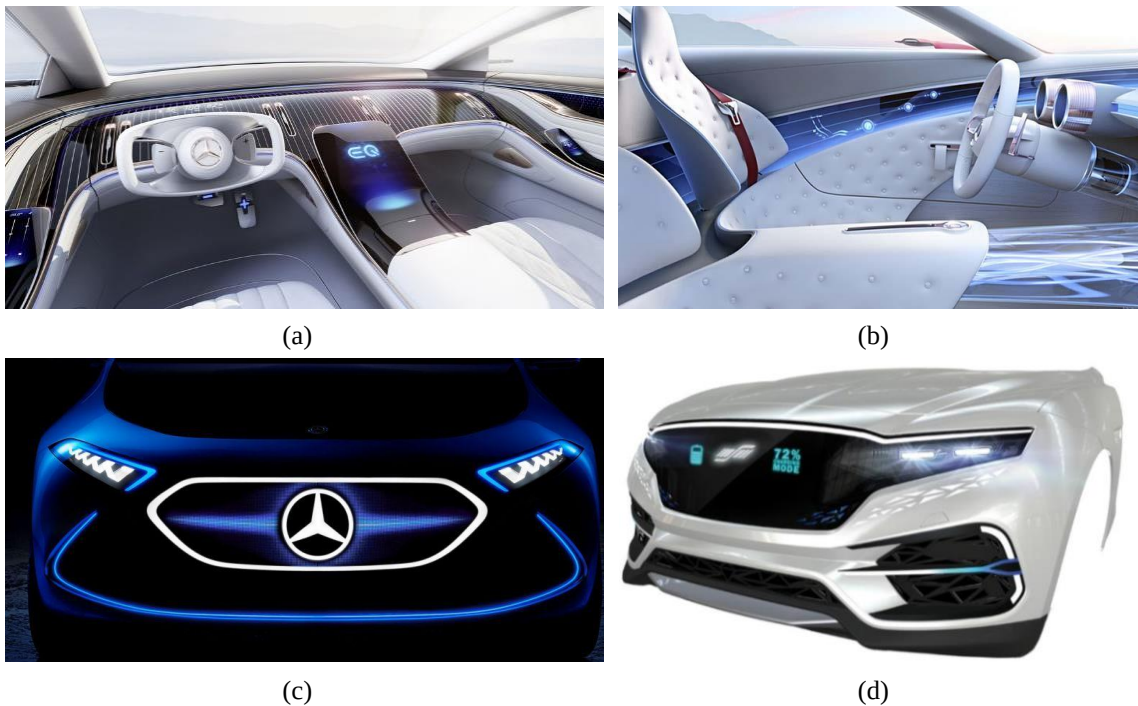


Fig.4. Illustrations pratiques : (a)(b) habitacle et (c) (d) bouclier avant automobile – Source Mercedes, concept car et (d) preuve de concept, bouclier avant automobile, – Source : Plastic-Omnium (PO).

Nous illustrons (Fig. 5) les étapes de fabrication d'un procédé plastronique ESS type.

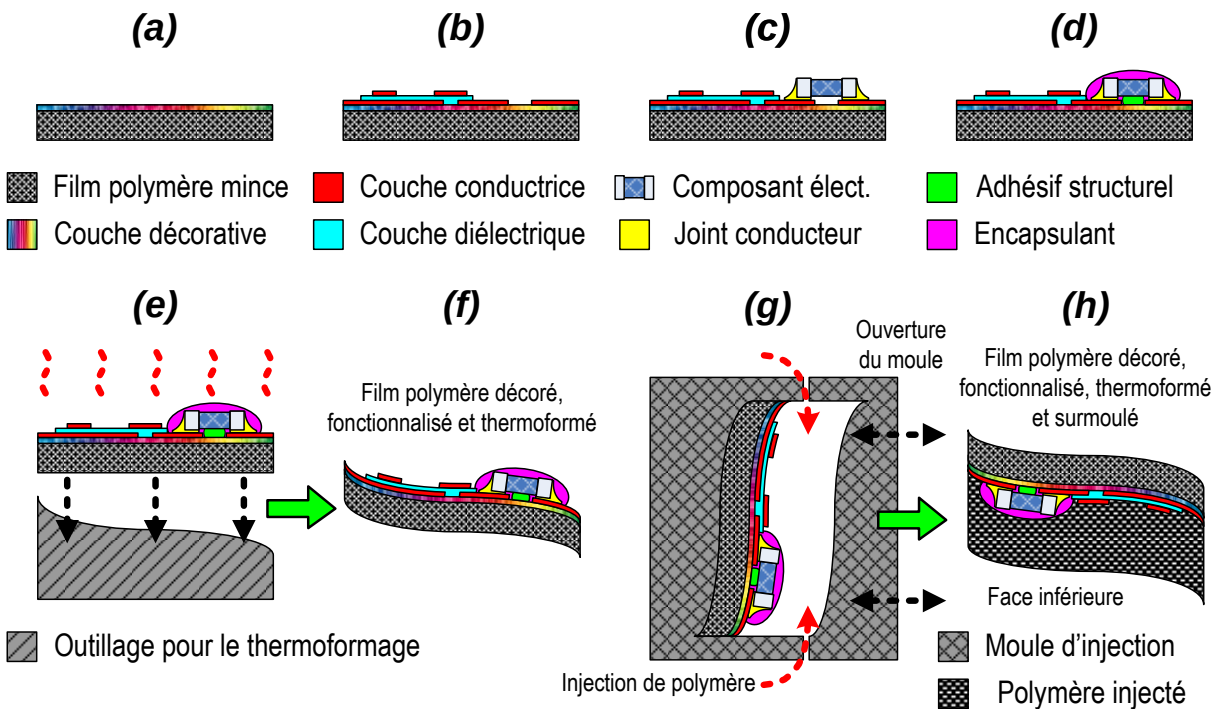


Fig.5. Etapes de fabrication d'un procédé plastronique ESS type : (a) impression d'une couche décorative sur un film polymère transparent mince ; (b) impression successive de couches conductrices et diélectriques ; (c) report des composants électroniques sur un joint conducteur ; (d) collage structural et/ou encapsulation des composants ; (e) thermoformage ; (f) détournage du système ; (g) surmoulage par injection ; (h) pièce finale fonctionnalisée.

Un film polymère transparent mince d'une épaisseur de l'ordre de 200 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 : déposer une couche décorative permettant d'apporter de l'esthétisme et d'assurer l'attrait du système (Fig. 5a) et déposer des couches conductrices et diélectriques afin de réaliser le réseau conducteur du circuit électronique (Fig. 5b). 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 à 200 μm . D'autres procédés ou combinaison de procédés sont envisageables : impression numérique ; offset ; tampographie ; etc.

Des composants CMS sont ensuite reportés par des machines de placement conventionnelles sur le réseau d'interconnexions 2D (Fig. 5c). Ils sont déposés sur des plages d'accueil préalablement enduites, par sérigraphie ou par dépôt point à point, de colles conductrices (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 phases suivantes, les composants peuvent être collés structurellement au substrat et/ou encapsulés (glob-top) (Fig. 5d). Cela renforce l'adhésion mécanique et minimise les risques d'arrachement durant l'injection lors de l'étape du surmoulage.

L'ensemble du film est ensuite thermoformé (Fig. 5e), en 3D, sur un maître modèle (moule de thermoformage) dont la géométrie reprend la forme finale de l'objet souhaité.

Une fois détourné (Fig. 5f), nous obtenons une « coque » polymère fonctionnelle. Celle-ci est alors placée dans un moule pour être surmoulée par injection de polymère thermoplastique (Fig. 5g). 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. 5h).

Dans cette illustration, il est notable de remarquer que la couche décorative est réalisée sur la même face que le réseau conducteur. Bien qu'elle pourrait être faite sur la face opposée, cela permet ici d'assurer une meilleure protection du décor contre les aléas extérieurs puisqu'il est protégé par l'épaisseur du film mince (généralement transparent). Plusieurs variantes ou combinaisons de procédés peuvent être envisagés à chacune des étapes, comme par exemple : implémenter les composants après thermoformage ; surmoulés (ou non) par injection ou coulée (ex. résines), etc.

Toute l'originalité et l'intérêt du procédé plastronique ESS, dans l'état de l'art actuel, réside dans une combinaison harmonieuse dérivée : (i) de l'Electronique Imprimée (EI), ce qui permet de travailler en 2D et d'utiliser des procédés conventionnels et outils de l'électronique standards (sérigraphie, placement automatique de composants, tests...) ; (ii) de procédés de mise en forme et de transformation conventionnelles des thermoplastiques (thermoformage, injection) pour la mise en forme 3D. Cela explique un développement industriel très rapide de cette technologie.

En effet, les autres procédés plastronique comme le LDS et le 2K (6) sont, comparativement à l'ESS, des technologies coûteuses et complexes à mettre en œuvre (métallisation chimique très polluante et demande des compétences particulières) et souffrent de limitations technologiques : absence de multicouches (niveaux de métallisation limité à une ou deux faces) ; résolution des pistes limitée (ex. LDS = 150 μm). En conséquence, les fonctions électroniques sont « rudimentaires » car il est impossible d'utiliser des composants complexes. De plus, le report et l'assemblage des composants sont fastidieux et demandent des outils spécifiques (à développer) du fait de géométrie 3D des pièces (refusion par fours spécifiques ou point par point avec des temps de processus considérablement plus longs et onéreux).

IV. Projet académique – Réalisation pratique

Dans un contexte académique, nous proposons une méthodologie agile de conception, de fabrication, de tests et de caractérisation d'un dispositif ESS. En connaissance des contraintes de compétences, de temps et de coût, celle-ci doit permettre aux apprenants la réalisation d'un projet global dans un format d'une trentaine d'heures. Parce que la formation est ouverte à des apprenants ayant des profils divers (électronique, matériaux, chimie, etc.), les objectifs attendus peuvent être orientés et accentués.

Les moyens pratiques :

Les moyens pratiques, mis à disposition (Fig. 6) des apprenants, pour réaliser un dispositif ESS (Fig. 5) se composent principalement : d'une machine de sérigraphie (étapes a, b et c de la Fig. 5) ; d'une machine semi-automatique de placement de composants (étapes c et d) ; d'une machine de thermoformage (étape e) et d'une presse à injecter (étape g).

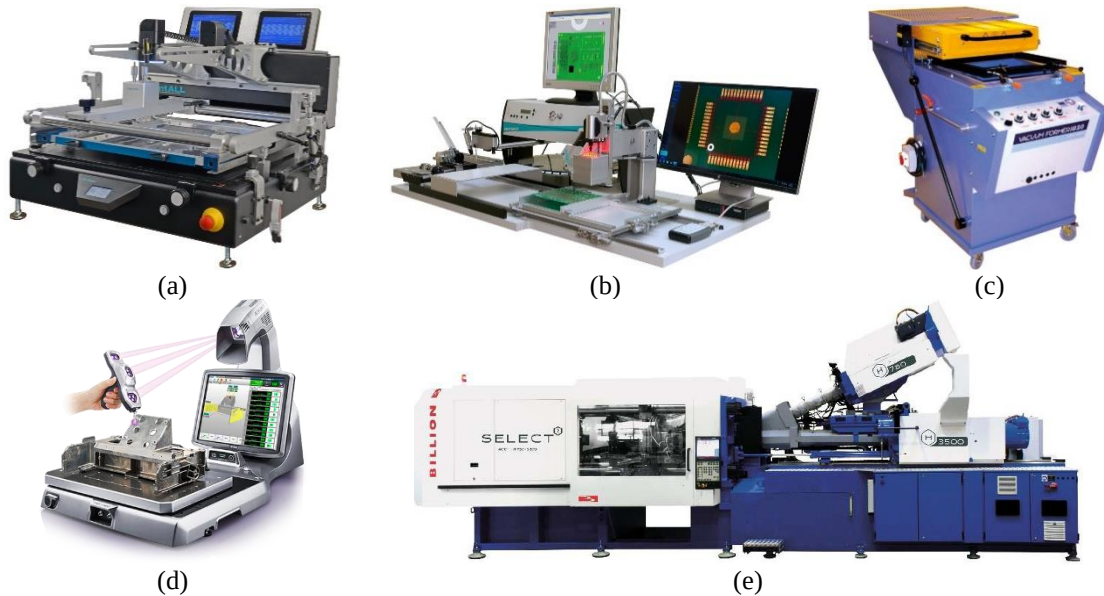


Fig.6. Moyens pratiques disponibles sur la plateforme « Technologies de packaging fonctionnalisé et plastronique 3D »: (a) sérigraphie ; (b) placement semi-automatique de composants ; (c) thermoformage ; (d) mesure tridimensionnelle. Moyens disponibles sur le site d'Oyonnax (INSA Lyon à Oyonnax) : (e) presse à injecter bi-matière électrique.

Divers appareils de caractérisation : (i) mécanique (mesure tridimensionnelle (Fig. 6d), test d'adhérence et tenu mécanique du réseau conducteur et des composants, etc.) ; (ii) électrique (mesure de conductivité, générateurs et analyseurs divers, etc.) ; (iii) optique (microscope numérique 3D, MEB, etc.) et ; (iv) physicochimique (fluo X ; ATG ; angle de contact ; FTIR ; rhéomètre viscosimètre, etc.) sont également disponibles.

A noter qu'un fort investissement est en cours pour orienter l'apprentissage vers des solutions éco-conçues, des matériaux polymères bio-sourcés/recyclés (presse thermique, extrusion), du démantèlement et de la valorisation des produits en fin de vie (étude de vieillissement).

Les étapes du projet pratique :

Des moyens originaux d'Outillage Rapide (OR) permettent, à coût maîtrisé, la flexibilité dans la fabrication d'un grand nombre d'outillages de thermoformage et d'injection. Ainsi, des tests variés et en quantité (Fig. 7) autorisent (i) d'affiner les modèles et simulations théoriques et (ii) de les corrélérer aux résultats expérimentaux afin de comprendre et anticiper les mécanismes de déformation durant les phases de transformation des matériaux thermoplastiques.

En effet, pour pré-déformer les motifs par anticipation des contraintes sur le film, il est indispensable d'avoir des modèles prédictifs, ainsi que de comprendre et de prendre en compte les influences entre réseau conducteur/composants/moyens d'assemblage. Ce trio

introduit des contraintes mutuelles aussi bien locales (autour du composant) que globales (film et réseau conducteur) pouvant déformer jusqu'à la rupture le système électronique suivant la densité, la complexité du circuit et la géométrie des pièces.

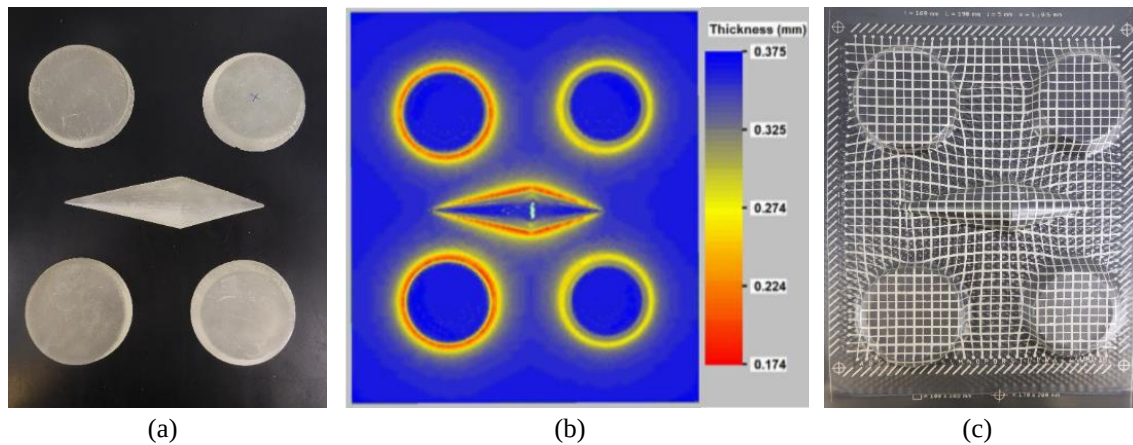


Fig.7. Etude des déformations et des contraintes d'étirement au thermoformage pour la mise en place d'actions correctives : (a) outillage pour le thermoformage ; (b) simulations théoriques (T-Sim) pour la modélisation et la conception prédictives ; (c) étude et réalisation pratique (ex. d'un film PC – Format A4) des déformations du réseau conducteur lors du passage de la 2D à la 3D.

Divers motifs de tests d'impression (ex. Fig. 8) sont disponibles. Ils sont utilisés pour réaliser : (i) des tests de déformation ; (ii) des mesures de conductivité ; (iii) des tests de tenu mécanique (arrachement, cisaillement, etc.) ; etc.

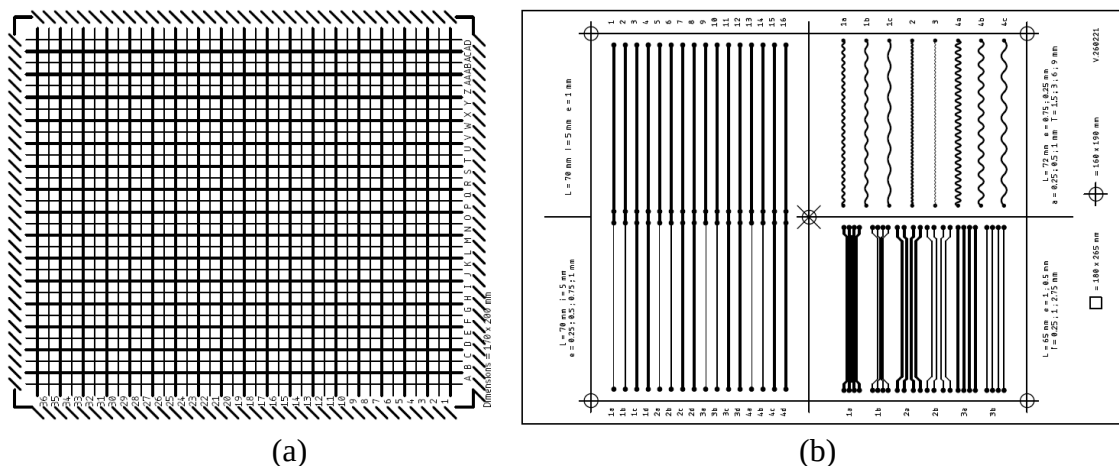


Fig.8. Exemple de motifs de tests, format A4, pour l'étude : (a) des déformations et d'étirements ; (b) de conductivité.

Nous illustrons, ci-dessous (Fig. 9), un exemple de réalisation et les étapes associées. Ce travail, inspiré de l'œuvre « make art not war » de l'artiste Shepard Fairey, s'articule autour d'un cadre décoratif (ex. enseigne publicitaire). Celui-ci nous a permis d'intégrer des composants lumineux (LED mono et multi-couleurs) dans un substrat polymère en 3D.

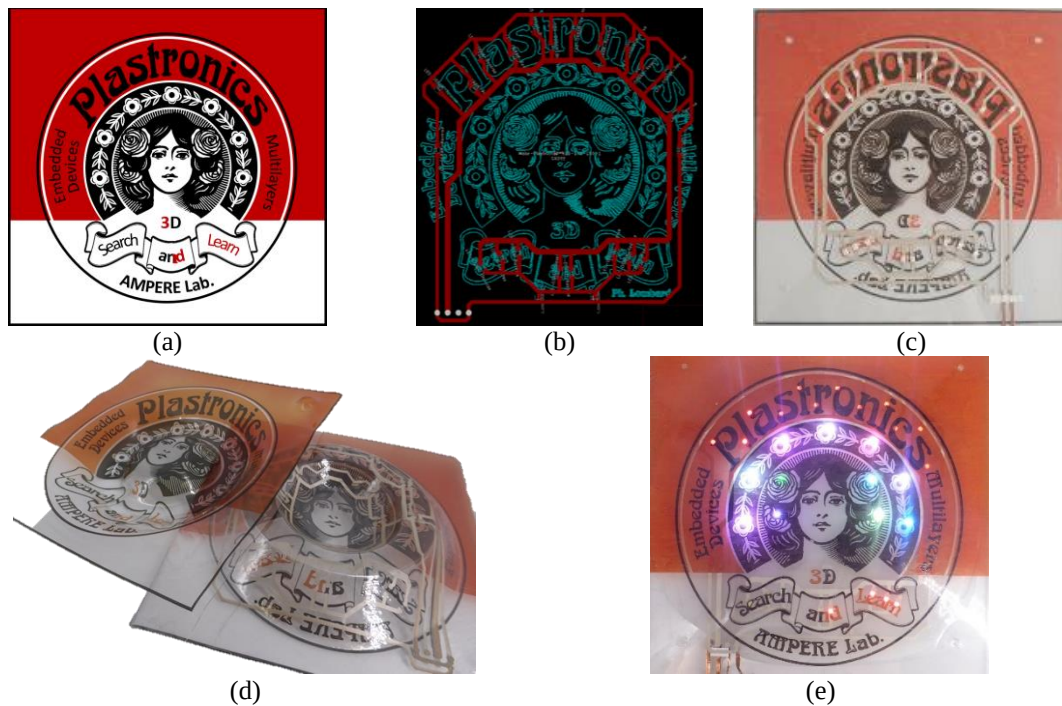


Fig.9. Exemple de réalisation inspiré de l'œuvre « make art not war » de l'artiste Shepard Fairey : (a) réalisation et impression d'un élément de décor (format A4) ; (b) conception et routage d'un circuit électronique, en 2D ; (c) impression du réseau conducteur et implémentation des composants électroniques ; (d) thermoformage, en 3D, et surmoulage ; (e) tests fonctionnels.

Dans l'avenir, en complément des précédentes réalisations (8) nous prévoyons de réaliser un démonstrateur de type « cuvette instrumentée ». Celui-ci intégrera : (i) un microcontrôleur évolué dans une problématique de basse consommation, (ii) divers capteurs (température, niveau...) pour la génération de données, (iii) une IHM avec retour lumineux. Les données seront transmises (iv) via l'intégration d'une antenne et de son module de transmission. Le choix des matériaux, les méthodes de conception et de fabrication intégreront, l'écoconception dans une problématique de fin de vie et d'enjeux environnementaux.

V. Conclusion

Cet article décrit rapidement un projet académique pratique centré autour d'un procédé plastronique appelé Electronique Structurale Surmoulée – ESS. Idéal pour le développement d'Interfaces Homme-Machine – IHM, ce procédé 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. L'ESS est en plein essor dans l'industrie et suscite un intérêt grandissant dans de nombreux secteurs d'activité (automobile, aéronautique, médicale, électroménager, loisirs, etc.).

Du fait des nombreuses contraintes liées à l'enseignement, nous proposons une méthodologie agile de conception, de fabrication et de tests d'un dispositif ESS fonctionnel. Aussi, dans une démarche active d'ingénierie, ce projet expérimental multi-physique incite les apprenants à sortir de leur zone de confort et de compétences (généralement segmentées et orientées). Il permet de rassembler leurs connaissances en abordant un projet transdisciplinaire dans sa globalité. L'enjeu est également d'identifier les verrous

scientifiques, de quantifier les résultats obtenus en connaissance des contraintes techniques et des enjeux sociaux-environnementaux de demain.

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 « The Plast to Be » réalisé en partenariat avec la Communauté du Haut-Bugey et tous les membres de son comité de pilotage.

Les auteurs sont également reconnaissants au GIP-CNFM ; à la Fondation pour l'Université de Lyon ; au soutien de nombreux acteurs institutionnels et académiques comme l'Université de Lyon, l'INSA Lyon, l'école CPE, Polytech'Lyons ; L'université de Bourgogne avec l'ESIREM ; INSAVALOR, le lycée Arbez Carme ; les laboratoires, et centres techniques partenaires (AMPERE, IMP, CT-IPC), ainsi que les représentants de branches et organismes de valorisation (POLYVIA, POLYMERIS, ACSIEL, UIMM, Cap'tronic).

Nous remercions C. Goument, T. Guérin, C. Seguin, (ex-)doctorants au laboratoire Ampère, pour les illustrations co-développées et présentées aux figures 6, 7 et 8.

Enfin, nous remercions vivement tous les partenaires industriels engagés à nos côtés dans ce projet. Nous citerons en particulier les mécènes de la formation : Plastic Omnium, Faurecia, le groupe Seb, la fondation Dassault Systems, Clayens-NP, Cirly, Ardeje, S2P.

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. Ph. Lombard, T. Gerges, B. Allard, S. A. Lambert et M. Cabrera¹, *Plastronique 3D et 3D-MID, programme innovant d'enseignement supérieur et de formation à l'Université de Lyon*, J3eA 18, 1014 (2019).
3. T. Gerges, P. Lombard, B. Allard, et M. Cabrera, *Attirer l'étudiant vers l'électronique à l'aide de la plastronique 3D et de la fabrication additive*, 14e Colloque CETSIS, <https://cetsis2021.sciencesconf.org/>.
4. <https://www.universite-lyon.fr/plastronique3d>.
5. ANR IDEFI-FINMINA : Initiative d'Excellence - Formation Innovante en Microélectronique et Nanotechnologies, ANR-11-IDFI-0017. Website: <http://www.cnfm.fr/VersionFrancaise/actualites/FINMINA.htm>.
6. 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).
7. K. Ghaffarzadeh, R. Collins, "In-Mold Electronics 2020-2030: Technology, Market Forecasts, Players, Technical assessment of manufacturing process and material requirements; market outlook for applications and players; study of competitive routes to 3D electronics". <https://www.idtechex.com/en/research-report/in-mold-electronics-2020-2030-technology-market-forecasts-players/722>.
8. Chaîne vidéo plastronique : www.youtube.com/channel/UCYEgiR9FiVF3Wqc64ie7W6g/videos.