

# Attirer l'étudiant vers l'électronique à l'aide de la plastronique 3D et de la fabrication additive

Tony Gerges<sup>1</sup>, Philippe Lombard<sup>1</sup>, Bruno Allard<sup>1</sup>, Michel Cabrera<sup>1</sup>  
[tony.gerges@insa-lyon.fr](mailto:tony.gerges@insa-lyon.fr)

<sup>1</sup>Univ Lyon, INSA Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, Ecole Centrale de Lyon, CNRS, Ampère UMR5005, F-69621 Villeurbanne, France

**RESUME :** L'enseignement de l'électronique se heurte à un manque d'appétence de la part des étudiants. Ouvrir le champ technologique vers la fabrication additive et la plastronique est de nature à solliciter de nouveau l'intérêt des étudiants. Malheureusement il est délicat de donner un premier exemple pertinent qui confirme l'intérêt et mette les différents cours en perspective, car la plastronique balaie des connaissances allant des matériaux, à la chimie, la plasturgie, la conception mécanique 3D, etc. L'article présente un mini-projet sur la réalisation d'un dispositif plastronique à l'aide de la fabrication additive et de la métallisation autocatalytique, comme premier contact des étudiants avec les aspects technologiques. Il s'agit de fabriquer une maquette de camion imprimée en 3D, qui embarque sur sa surface non plane un circuit électronique typique. Tout d'abord le schéma électronique et la conception mécanique sont réalisés et assemblés. L'objet est ensuite imprimé et les pistes sont métallisées. La maquette du camion est obtenue après le brasage des composants. Cette maquette vise à provoquer un questionnement de la part de l'étudiant et lui permettre de mieux positionner le contenu des cours et travaux pratiques d'une formation spécialisée en plastronique.

**Mots clés :** Plastronique, fabrication additive, plastique intelligent, électronique numérique, dispositif pédagogique.

## 1 INTRODUCTION

L'enseignement technique se trouve en difficulté face au profil des générations [1]. Cependant, l'émergence croissante de technologies nouvelles peut constituer un outil précieux du point de vue pédagogique plutôt qu'un repoussoir du fait de la complexité croissante. Il est donc crucial de savoir comment se servir de ces nouvelles technologies pour susciter l'intérêt pour l'apprentissage de la part de l'étudiant (notamment en électronique dans le cas présent).

Cet article présente les bases des verrous technologiques et techniques sous la forme simplifiée d'un mini-projet. Il s'agit d'intéresser l'étudiant à un cours qu'il va découvrir, en lui faisant voir en pratique une technologie nouvelle. Pour cela, on lui offre l'opportunité de réaliser un premier dispositif qu'il n'a jamais fait auparavant et de conclure cette expérience d'ouverture par un questionnement. Si les étudiants se posent souvent la question de savoir à quoi peuvent servir les cours magistraux ou théoriques, l'idée est ici de poser une base pratique qui renverra (de manière illustrative) au contenu de cours, dans le cadre d'un corpus tourné vers la plastronique. Ce corpus a pour l'instant été pensé pour des étudiants de niveau M2 mais le contenu peut être adapté pour des étudiants d'IUT et au-delà.

La plateforme d'enseignement et de recherche dédiée « Packaging avancé et Plastronique 3D » (située sur le Campus LyonTech La Doua, à Villeurbanne) met à la disposition des étudiants issus de formations initiales variés (électronique, mécatronique, plasturgie, science des matériaux et chimie) [2-3] le savoir-faire ainsi que les équipements leur permettant de réaliser ce type de projet. Le projet a pour point de départ la conception et aboutira au report de composant et au test, en passant par les étapes de fabrication/métallisation et caractérisation.

L'article décrit un mini-projet dont l'objectif est de réaliser un dispositif concret qui éveille l'intérêt de l'étudiant en limitant la complexité à un niveau raisonnable. L'objet est un modèle réduit de camion (dimensions : 8 cm x 4 cm x 4 cm) à concevoir par Conception Assistée par Ordinateur (CAO), puis à réaliser par fabrication additive (impression 3D), dans le but d'y apporter une fonctionnalisation en implantant un circuit électronique simple : la gestion de LEDs avec un microcontrôleur 8 bits et un bouton poussoir.

Le mini-projet est calibré sur 8 heures (2 fois 4 heures), en partant du principe que l'étudiant s'est déjà formé ou auto-formé sur un logiciel de CAO mécanique (*SolidWorks* [4] par exemple) dans le cas d'un électronicien en formation initiale ou sur la conception électronique pour un plasturgiste (logiciel SPICE), etc. Le camion avec ses fonctionnalités est un dispositif à complexité maîtrisée, où l'étudiant arrive à réaliser un dispositif fonctionnel à la fin de la séquence. En pratique ce type de mini-projet convient mieux à un groupe restreint d'étudiants (4). Le rôle de l'encadrant est essentiellement de veiller à la cohérence de développement technologique. Le petit groupe est par ailleurs synonyme pour l'étudiant d'un encadrement rapproché qui limitera les erreurs, maladresse ou inexactitude.

Le procédé de métallisation ne présente aucun danger, et ne nécessite aucune habilitation chimique au préalable pour l'étudiant non familiarisé avec l'utilisation des produits chimiques, mais il demande de se conformer à la procédure et respecter les règles de sécurité (port de blouse, gants, lunettes, etc.)

Outre de constater par lui-même qu'il est capable de mener au bout un tel projet simple, le but de la séquence pour l'étudiant est de positionner les verrous techniques et technologiques d'un grand nombre d'aspects liés à la plastronique. Le but avoué est de mettre en perspective le contenu des cours et travaux pratiques d'une formation spécialisée.

## 2 DÉMARCHE ET RÉALISATION

### 2.1 Montage électronique et schéma

La réalisation d'un dispositif plastronique débute par la définition des fonctions principales attendues du circuit électronique. C'est à cette étape que sont choisis les composants électroniques. Dans cet exemple, nous avons choisi d'utiliser des LEDs, fonctionnant en éclairage multi-couleur, comme fonction principale à intégrer à la maquette de camion. Pour cela nous avons besoin de :

- 1 microcontrôleur 8 bits (ATtiny85 ou Microchip ATtiny84) pour commander les LEDs
- 8 LEDs de type WS2812B
- 8 condensateurs de découplage de 100nF
- 2 piles CR2032 (3V) Lithium Manganèse Dioxyde
- 2 supports de piles
- 1 régulateur de tension 5V-100mA (LDO)
- 1 bouton poussoir

Le logiciel *Eagle* [5] est utilisé pour réaliser le schéma électronique des composants (fig 1.a). Tout autre offre logiciel conduira à la production du même livrable : le chevelu métallique d'interconnexion des composants. Le circuit se base essentiellement sur le microcontrôleur, qui requiert d'être programmé pour exécuter le code de fonctionnement du circuit. La plateforme Arduino pourrait être utilisée pour écrire ce code et le charger dans le microcontrôleur, avant ou après le report sur la maquette. Le circuit électronique est ensuite conçu en 2D dans un premier temps (fig 1.b), pour déterminer l'emplacement des composants sur une surface qui sera projetée sur l'enveloppe 3D de l'objet.

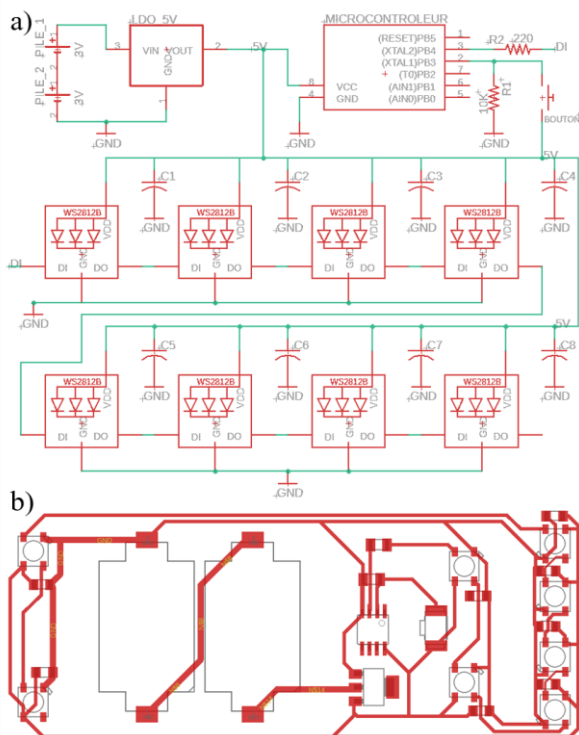


fig 1 : a) Schéma électronique du dispositif, b) Circuit électronique planaire qui va être projeté sur l'objet 3D.

### 2.2 Conception mécanique et réalisation des pièces 3D

La deuxième étape de notre réalisation est la conception mécanique du support, c'est-à-dire du modèle réduit de camion. *Solidworks* est l'un des logiciels utilisés pour la conception des pièces en 3D et permet de générer un fichier « .stl », qui correspond au format de fichier utilisé par les imprimantes 3D pour fabriquer physiquement la pièce. L'initiation des étudiants à *SolidWorks* est de plus en plus répandue.

L'imprimante 3D Form 2 de la société Formlabs, avec la technique d'impression par stéréolithographie (SLA) est utilisée pour réaliser la pièce dans le cadre de ce projet. La technique SLA est fondée sur le principe de photopolymérisation qui, sous l'effet de la lumière UV générée par un laser, transforme une résine liquide monomère en pièce polymère solide [6]. Cette technique offre l'accès à des supports polymères de la famille des méthacrylates avec une large gamme de propriétés mécaniques : supports rigides, déformable, élastique, etc. La résine Formlabs haute température est choisie dans le cadre de ce projet, pour sa haute tenue en température (>230°C), ce qui évite les déformations à l'étape de soudure des composants. A l'énoncé de la technologie mise en œuvre lors de l'impression 3D, il apparaît avec évidence que l'étudiant doit noter le nombre d'aspects auxquels il touche et qu'une formation peut lui permettre d'approfondir (en connaissance de causes).

La conception de l'objet 3D est réalisée en définissant la forme support de la pièce (fig 2). Puis, le fichier part à l'impression et l'objet solide sera obtenu en 4 heures environ. La séance #1 de la séquence doit le plus possible déboucher sur la production du fichier de fabrication (*SolidWorks*) pour permettre le dérouler de l'impression en temps masqué. La séance #2 de la séquence s'attachera au chevelu métallique et la soudure des composants. La programmation du microcontrôleur avec la plateforme Arduino est laissée à la charge de l'étudiant (aidé par un document idoine). L'étudiant est invité à utiliser la plateforme TINKERCAD (circuits) et il reçoit plusieurs exemples pour démarrer.



fig 2 : CAO 3D du camion

### 2.3 Métallisation des pistes et report de composants

Le nettoyage/dégraissage avec de l'isopropanol ainsi que la préparation des surfaces à métalliser, sont deux étapes importantes pour réussir l'opération de métallisation. La structuration des pistes métalliques sera effectuée par voie humide, par dépôt de palladium colloïdal (catalyseur usuel du cuivrage autocatalytique) sur les surfaces à métalliser, suivi par la phase de cuivrage par autocatalyse. Cette technique de métallisation, qui ne demande aucune source de courant, permet de déposer une surface métallique de plusieurs  $\mu\text{m}$  d'épaisseur tout en garantissant une grande homogénéité de dépôt (fig 3.a).

L'épaisseur de cuivre ( $\sim 5\mu\text{m}$ ) et la conductivité des pistes (45MS/m) sont mesurées respectivement à l'aide de la fluorescence X et d'une station de mesure 4 pointes. Cette conductivité électrique, bien qu'elle soit inférieure à celle du cuivre d'un PCB standard (58MS/m), reste largement suffisante pour le bon fonctionnement d'un circuit électronique à faible puissance. L'état de surface et l'inspection des pistes sont faits à l'aide d'un microscope numérique 3D. Là encore il est important d'illustrer par l'exemple les observations au(x) microscope(s) pour continuer à alimenter le questionnement de l'étudiant (Comment fonctionne le microscope ? Quelles sont les différences entre les différents microscopes présents sur la plateforme ? Qu'est-ce qu'un état de surface ? etc.).

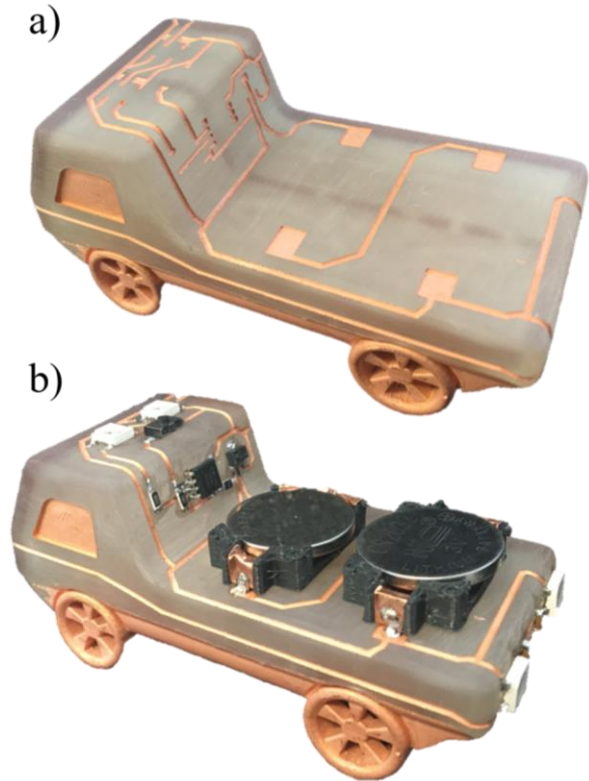


fig 3 : Le camion imprimé: a) après 90 minutes de métallisation par autocatalyse, b) et avec implémentation de composants.

La dernière étape est l'implémentation des composants. Les composants sont brasés à l'étain à la surface de l'objet (fig 3.b) en procédant manuellement. Les étudiants dans leur grande majorité ont peu manié le fer à souder et l'opération vise à les responsabiliser jusqu'au bout vis-à-vis des consignes, la découverte d'un point d'eutectique, la nécessité d'utiliser un polymère haute température, etc.

## 3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

### 3.1 Le camion en fonctionnement

La figure 4.a présente la CAO du dispositif final avec l'ensemble des composants. Cela offre à l'étudiant un visuel réel sur l'encombrement de l'objet, le tracé des pistes métalliques et l'emplacement des composants. La figure 4.b montre le camion dans sa forme physique obtenu après passage par les étapes de fabrication. La structure est identique à celle conçue par CAO. Les pistes de cuivre sont correctement conductrices, permettant le bon fonctionnement du circuit avec les composants soudés à leurs emplacements.

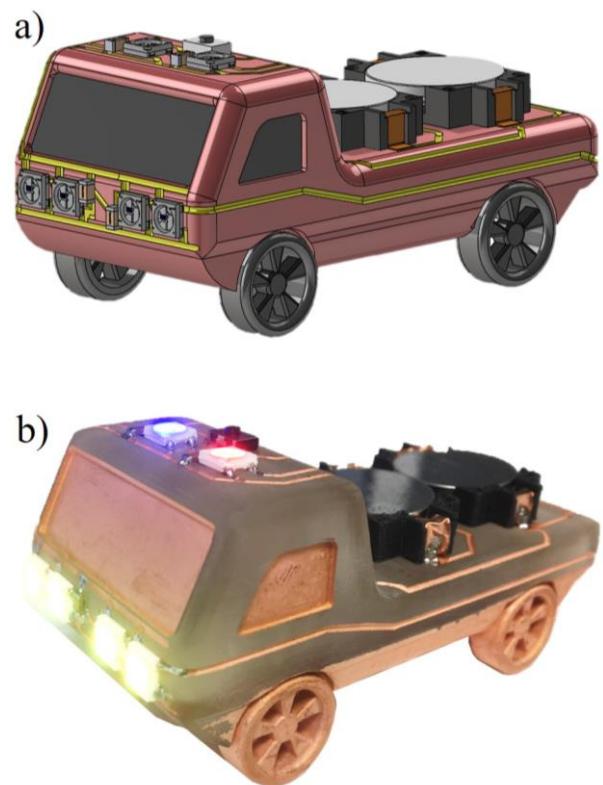


fig 4 : Réalisation final du camion : a) par CAO, b) par fabrication physique.

### 3.2 Discussion

Le mini-projet réalisé présente une fonction simple à exécuter. Cependant, il est évolutif et offre à l'étudiant la possibilité d'augmenter la complexité de l'objet en la maîtrisant dès l'étape de conception. Par exemple, le bouton poussoir peut être remplacé par un bouton ca-

pacitif métallisé directement sur l'objet, faisant gagner de l'espace/volume. L'ajout d'un module sonore ou des petits moteurs pour faire déplacer le camion, deviennent des fonctions facilement envisageables. Réaliser des vias et souder les composants sur deux faces opposées sont aussi possibles. L'étudiant peut choisir d'utiliser d'autres matériaux, se demander s'il y a possibilité de réaliser l'objet par injection thermoplastique et la différence entre les deux techniques. Pour l'étudiant qui maîtrise la technique et qui souhaite aller plus loin en complexité technologique et fonctionnelle, il peut réaliser une montre numérique (fig 5.a-b) avec la possibilité de la rendre connectée en intégrant une antenne, ou une montre connectée avec une antenne.

Bien que le mini-projet soit concevable en suivant une démarche rigoureuse, l'échec durant une des étapes de réalisation n'est pas impossible. Cela reste constructif, et stimule la curiosité des autres étudiants pour aller plus loin en questionnement. En cas de problème pendant l'impression 3D ou une mauvaise accroche du cuivre sur le plastique, l'étudiant est toujours incité à en identifier la solution.

Consommer 8h de cursus pour mettre l'étudiant en pratique et de manière pragmatique, en face d'une réalité technologique devient indispensable pour obtenir son adhésion à un corpus de cours, surtout s'ils sont très spécialisés. Pour les étudiants issus d'un cursus initial en électronique, la réalisation d'un objet non-plan doit ouvrir des perspectives et stimuler l'intérêt.

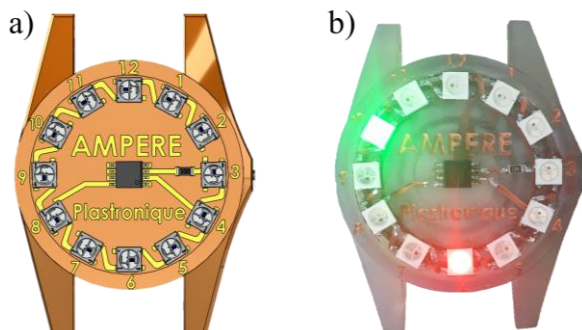


fig 5 : a) circuit électronique de la montre représenté par CAO, b) réalisation final par fabrication plastronique.

#### 4 CONCLUSION

La plastronique est une nouvelle technique qui permet d'apporter de l'intelligence électronique à des pièces en plastique.

Dans cet article, on décrit un mini-projet pour fabriquer une maquette par une approche combinant la plastronique et la fabrication additive (impression 3D). Son intérêt comme dispositif éducatif pour attirer les étudiants à l'électronique est aussi présenté. Le procédé utilisé est peu coûteux, sans danger, facile à mettre en réalisation et ne nécessite pas une installation complexe.

Le bénéfice se situe au niveau de l'entrée en matière, en amont d'un corpus de cours. Le questionnement de

l'étudiant sur les aspects techniques qu'il a mis en œuvre et qu'il ne maîtrise pas, doit ouvrir sur le programme d'un cours spécialisé en toute connaissance de causes.

Les étudiants de niveau M2 qui se prêtent au jeu, osent assez vite les étapes technologiques et prennent rapidement de l'autonomie. On note quelques difficultés pour l'étudiant à exprimer ce qui le surprend ou ce qu'il ne comprend pas. Le manque de recul technique se fait sentir sur le vocabulaire que le TP aide à introduire. Le questionnement de l'étudiant, voire même son rapport d'étonnement est un rendu qui permet de lisser la frustration d'un semi-échec ou d'un échec sur le livrable du TP. Jusque-là, l'encadrement en petit groupe limite les risques de cette frustration.

#### 5 REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient tout particulièrement le ministère français de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation, le PIA et tous les membres du comité de pilotage du projet « The Plast to Be », en particulier A. Merle, de la Fondation pour l'Université de Lyon.

Les auteurs sont également reconnaissant à la région du Haut-Bugey, à l'Université de Lyon : en particulier l'INSA de Lyon et l'école CPE de Lyon, le lycée Arbez Carme, tous les laboratoires, plates-formes et centres techniques partenaires (AMPERE, IMP, CNRS, CIMIRLY GIP-CNFM, CT-IPC, etc.), ainsi que les représentants de branches et organismes de valorisation (Polyméris, Fédération de la plastrurgie et des composites, Allizé Plastrurgie, ACSIEL, UIMM, Cap'tronic, etc.).

Les auteurs remercient pour son soutien financier la Région Auvergne-Rhône-Alpes à la fois à travers le pilier formation continue du programme COMSUP 2019 et le PIA The Plast to Be.



#### Bibliographie

- [1] "10 innovations pédagogiques disruptives dans l'enseignement supérieur depuis 2017", <https://www.innovation-pedagogique.fr/article1701.html>
- [2] Ph. Lombard, T. Gerges, "Plastronique 3D et 3D-MID, programme innovant d'enseignement supérieur et de formation à l'Université de Lyon". *J3eA, vol 18, 2019, JPCNFM 2018 – 15<sup>e</sup> journées pédagogiques CNFM (2018)*, <https://doi.org/10.1051/j3ea/20191014>.
- [3] Website - <https://www.universite-lyon.fr/formation/formations-innovantes/plastronique-3d-10618.kjsp?RH=1486387482944>
- [4] Website - <https://www.solidworks.com/fr>
- [5] Website - <https://www.autodesk.fr/products/eagle/overview>
- [6] M. Cabrera, J.Y. Jezequel, "Three Dimensional Machining by Laser Photopolymerization". *Lasers in Polymer Science and Technology: Applications vol. III, J.P. Fouassier and J.F. Rabek Editors, CRC Press, pp 73-95 (1990)*.