

## **Plastronique 3D, programme transversal d'enseignement supérieur et de formation tout au long de la vie à l'Université de Lyon**

Lombard Ph.<sup>1</sup>, Charmeaux J.-Y.<sup>2</sup>, Allard B.<sup>2</sup>, Cabrera M.<sup>3</sup>,

Abouchi N.<sup>4</sup>, Gerges T.<sup>5</sup>, Merle A.<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Université Claude Bernard Lyon 1

<sup>2</sup> INSA Lyon

<sup>3</sup> CNRS UMR 5005 Ampère

<sup>4</sup> Chimie Physique Electronique (CPE)

<sup>5</sup> Fondation de l'Université de Lyon

### **Résumé**

L'Université de Lyon (IDEX Lyon Saint-Etienne) porte pour la première fois en 2018-2019, une formation spécialisée, non diplômante, opérée par l'INSA Lyon pour le compte de l'INSA Lyon et l'école privée d'ingénieurs CPE. Ce projet s'appuie sur un ensemble de compétences et d'équipements localisés en Région Auvergne-Rhône-Alpes (AURA), à savoir la plateforme dédiée « packaging avancé et plastronique 3D » (située au laboratoire CNRS AMPERE – Campus LyonTech La Doua, à Villeurbanne) ainsi que les moyens de plasturgie localisés à Oyonnax (INSA Lyon, le lycée Arbez Carme, la start-up S2P, le Centre Technique IPC et le laboratoire IMP).

Cette action est financée par le Programme Investissement d'Avenir (PIA) français « The Plast to be » géré par Allize Plasturgie (principal syndicat du secteur de la plasturgie en France), la région AURA, l'agglomération du Haut-Bugey (HB) ainsi qu'ACSIEL Electronic Alliance, l'UIMM de Lyon, Cap'tronic et le GIP CNFM.

Par essence transversale, la formation ambitionne de donner à des étudiants fortement volontaires les clefs pour aborder globalement les défis de la plastronique. La forme et le fond de la formation privilégie la mise en pratique et la confrontation aux exigences industrielles.

*Mots-clés : Plastronique, transversalité, projet innovant, plateformes ouvertes*

# 1. Introduction

## 1.1. Contexte

(La plastronique ou 3D-MID (équivalent anglo-saxon du terme) [2-3] permet de doter de fonctions électroniques des objets en polymère (ou en composite) obtenus par différentes techniques de plasturgie, depuis la fabrication de pièces prototypes, notamment par impression 3D, jusqu'à la production de masse (thermo-injection, thermoformage, etc.). L'électronique permet de doter le système d'une « intelligence » tandis que la plasturgie assure les fonctions mécaniques et le packaging. Les interconnexions électriques peuvent être réalisées directement sur la surface du polymère par différents procédés (structuration laser, jet d'encre, plasma, dépôts divers, etc.). Il faut ensuite reporter et implémenter les composants (brasage, collage, clampage, etc.) avant d'effectuer les tests finaux (tests électriques, mécaniques, vieillissement, etc.).

La conception des systèmes est optimisée, la fonctionnalité est améliorée et de nouvelles fonctions peuvent être intégrés de manière optimale, et ce, tout en améliorant l'ergonomie et le design. L'assemblage est simplifié, la taille et le poids diminué. Cela permet une intégration optimale des fonctions hétérogènes (mécatroniques, optiques, fluidiques, etc.).

Des pièces dites *plastroniques* sont d'ores et déjà produites en grande série à l'instar des antennes électromagnétiques de tablettes et de smart phones. D'autres applications concernent les domaines de l'automobile et du médical. Des secteurs tels que : le transport, l'aéronautique et la défense, l'énergie, l'industrie et les biens d'équipements, l'électroménager et la domotique, le sport et les loisirs, etc., peuvent tirer profit de la plastronique pour déployer leur créativité.

La plastronique représente une véritable opportunité d'innovation pour l'industrie et le développement des plastiques intelligents, des objets connectés (tels que l'internet des objets - *IoT*) et plus largement de l'électronique embarquée. Faut-il encore savoir faire les bons choix. En effet, produire de tels objets demande de faire travailler en synergie de nombreuses expertises techniques et cela dès la conception du produit. Le choix des technologies dépend de l'application visée, des fonctions à intégrer, du ou des matériaux, des dimensions et de la complexité des pièces et de l'électronique, ainsi que du volume et du coût de production à assurer.

Pour explorer pleinement le potentiel d'innovation de la plastronique, les entreprises doivent dès aujourd'hui pouvoir compter sur des collaborateurs avec des profils de compétences adaptés : connaissances techniques transversales, capacité à animer des projets dans un contexte interdisciplinaire, démarche d'innovation orientée produit, etc.

Les problématiques rencontrées dans la plastronique 3D sont en grande parties connexes à celles rencontrer dans les domaines tels que l'électronique sur films flexibles ou étirables, sur céramique ou encore sur textile. Nos compétences et champs d'actions sont donc élargis.

## 1.2. Motivation pour une formation spécialisée

Une étude d'intérêt auprès d'industriels dans différents secteurs économiques, en 2016, a montré l'absence d'acteurs capables d'agir comme chef d'orchestre dans le développement de produits nouveaux.

Par ailleurs avec les Options Transversales, l'INSA Lyon avait pu mesurer les bénéfices de la confrontation d'étudiants de cursus différents mais complémentaires. En particulier point n'était besoin d'amener un étudiant à la hauteur de compétences de ses camarades du cursus complémentaires, pour pouvoir travailler efficacement au sein d'une équipe. L'auto-formation, l'accompagnement des étudiants les uns vers les autres, la curiosité et la motivation sont des ingrédients suffisants pour que la formation atteigne ses objectifs.

La formation spécialisée en plastronique a été pensée sur le même modèle, avec l'idée de préparer les étudiants au métier de chef de projet (qui n'existe pas en tant que tel). Déroulée sur un an, la pédagogie utilise différentes phases et une accélération croissante dans l'application pratique de connaissances.

Les étudiants partent en *échange* pendant un an pour valider in fine les 60 crédits ECTS qui permettront leur diplomation par l'établissement où ils sont inscrits en dernière année du cycle ingénieur.

## 2. Formation spécialisée : l'offre

L'offre de formation [4] est répartie sur deux semestres d'une année universitaire. Elle compte 372 heures de modules théoriques et pratiques pour un total de 54 crédits ECTS (*European Credit Transfer and Accumulation System*), en sus de 6 ECTS pour les compétences en Humanités. Le déroulement de la formation est illustré à la figure 1.

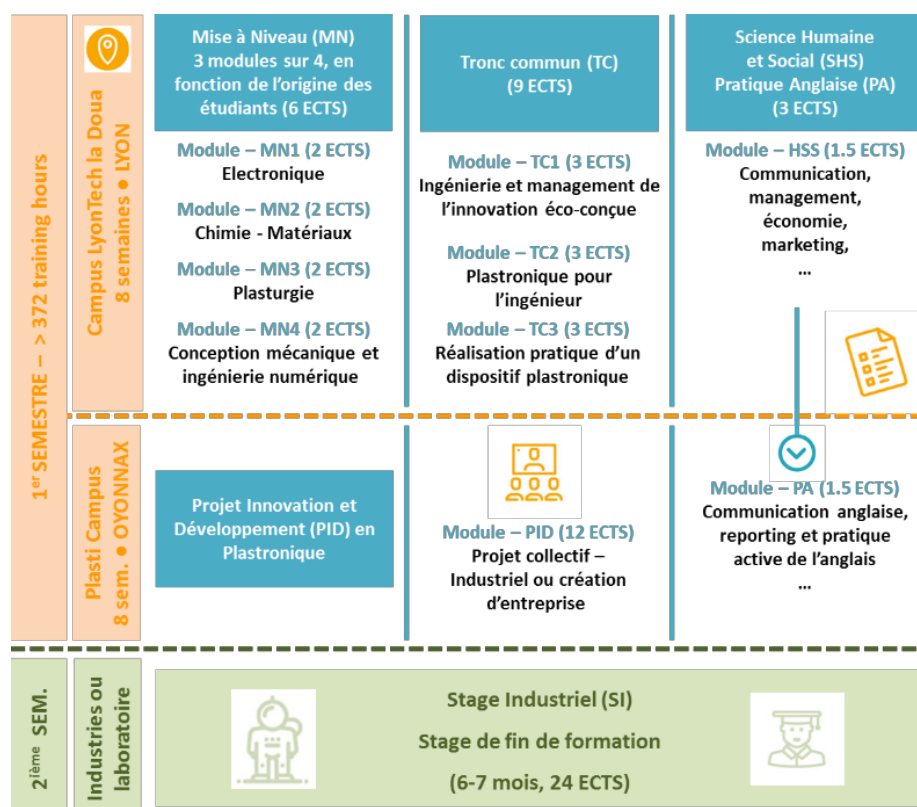


Figure 1. -Déroulement du parcours « Chef de projet plastronique ».

Facile d'accès et ouvert à l'international, deux sites de formation sont concernés : (i) Oyonnax, située dans la vallée du Haut-Bugey, est considérée comme la vallée française du plastique, (ii) Lyon (Campus Lyon-Tech la Doua, Villeurbanne). De plus ces deux sites jouissent d'une grande richesse industrielle dans de nombreux secteurs et activités économiques propices à l'émergence de la plastronique.

La première promotion (figure 2) a officiellement fait sa rentrée le 24 septembre 2018. Une première journée d'intégration, sur les sites de Lyon et d'Oyonnax, leur a permis de faire connaissance avec l'équipe pédagogique et de découvrir les principaux moyens techniques qu'ils seront amenés à utiliser au cours de leur formation. Conformément à nos attentes, cette promotion est composée de 11 élèves (6 étudiantes et 5 étudiants), de l'INSA Lyon et de l'école CPE de Lyon, présentant un large panel de formation initiale: 2 en plasturgie, 1 en science et génie des matériaux, 1 en mécanique, 1 en procédés et ingénierie, 5 en électronique et 1 en chimie.



Figure 2. -Première promotion lors de la journée d'intégration du 21 septembre 2018 (en haut) et lors de la séance de bilan en février 2019, entourés par les acteurs principaux académiques et industriels de la formation (en bas).

Les étudiants commencent à suivre des enseignements de remise à niveau sur des sujets extérieurs à leur cursus d'origine. Par exemple : une formation de base est dispensée en électronique, en mécanique et en traitement des matières plastiques pour les étudiants chimistes et ainsi de suite pour les autres étudiants (3 modules de remise à niveau sur 4). Cette première étape leur donne l'occasion d'étendre leurs compétences, de comprendre les concepts de bases, potentiels et verrous de chaque domaine scientifique. Cela leur permet également d'acquérir le vocabulaire clé, car la compréhension « de l'autre » est d'une importance fondamentale en plastronique. Ensuite, ils suivent ensemble des cours approfondis sur la plastronique 3D. Nous abordons différentes techniques, processus, feuilles de route, etc., et discutons des forces et des faiblesses de chacun d'entre eux. Pour que les étudiants se familiarisent avec l'approche et la mise en œuvre de ces nouvelles technologies, un premier travail pratique concret (figure 3) est réalisé étape par étape (de la conception aux tests électriques), en mélangeant plusieurs technologies (conventionnelles et plastroniques).

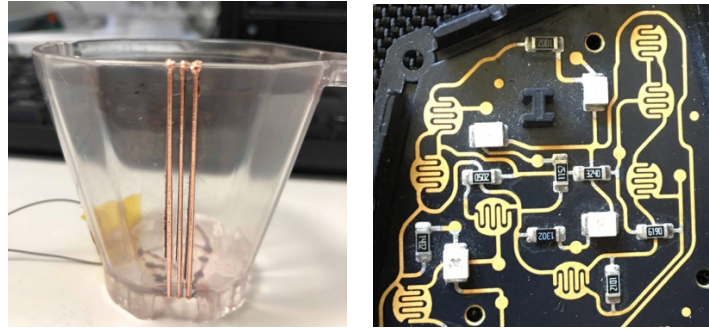


Figure 3. -Projet « Plasto-cup » à gauche : élaboration d'une tasse instrumentée, ici lors d'une étape de métallisation locale pour réaliser un capteur capacitif de niveau de liquide. Détail d'une pièce plastronique plane après soudage de composants (à droite)

Des enseignements originaux comme la gestion de l'innovation et les aspects écologiques d'écoconception sont abordés. Des sciences humaines et sociales (gestion, marketing, etc.) et une connaissance active de l'anglais sont également proposées tout au long du 1er semestre.

Des groupes de travail de 4 à 6 étudiants de différents horizons travaillent sur des projets innovants et problématiques proposés par des industriels en étroite collaboration avec les laboratoires de recherche AMPERE (électronique, semiconducteur) et l'IMP (science des polymères). Les Projets d'Innovation et Développement (PID) sont principalement (i) des études du processus au système ; (ii) de l'étude exploratoire au prototype fonctionnel. En cohérence avec l'équipe encadrante, une approche pragmatique est appliquée ; (i) de la technologie utilisée, à (ii) la fonction électronique considérée.

### 3. Moyens

Un ensemble de ressources est mobilisé dans le cadre de la formation, du laboratoire à l'échelle industrielle. Pour la partie plasturgie, les partenariats (plateformes dédiées polymères et composites, centres techniques, laboratoires, etc.) et les installations de fabrication et de caractérisation présentes à Oyonnax (figure 4) sont impliqués.



(a)



(b)





(c)



(d)

Figure 4. -Site d'Oyonnax : (a) CT-IPC et moyens INSA ; (b) Plateforme « Coating Expert » ; (c) ressources au laboratoire IMP et (d) presse à injecter, extrudeur, RTM, etc.

Des investissements très importants ont été réalisés sur la plateforme lyonnaise, comme illustrée sur la figure 5. La Fondation pour l'Université de Lyon [1] est l'opérateur gestionnaire de ces investissements via un programme PIA3 « The Plast to Be ». Cela permet de regrouper dans un même lieu tous les outils pour développer des dispositifs et des systèmes, de la conception aux tests et à la caractérisation.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 5. -Plateforme « Packaging avancé et plastronique 3D » (lab AMPERE) : (a) pôle de « fabrication et de structuration 3D », (b & c) pôle de chimie (traitement de surface, métallisation chimique, électrodéposition, etc.), (d) pôle « implémentation et intégration » (mise en oeuvre, test et caractérisation)..

D'une surface supérieure à 100 m<sup>2</sup>, la plateforme « Plastronique 3D » est divisée en quatre pôles de travail :

- (i) Un pôle « fabrication et structuration 3D » ; fabrication de pièces et structuration du réseau conducteur, etc. ;
- (ii) Un pôle chimie ; traitement de surface, métallisation chimique, électrodéposition, etc. ;

(iii) Un pôle « implémentation et intégration » comprenant, entre autres, le dépôt et la mise en œuvre de composants, la brasure et la mise en œuvre de fonctions complexes ;  
 (iv) Un laboratoire dédié à la caractérisation électrique et mécanique ainsi qu'à l'inspection des systèmes. A termes, les aspects d'étude en vieillissement seront également intégrés.

Non-exhaustive, la figure 6 présente les cartes remises aux étudiants pour appréhender la liste des moyens mis à leur disposition, classés par grands axes : Fabrication et structuration 3D ; Chimie ; Electronique ; Caractérisation et inspection.

Des instruments de mesure sont également accessibles aux étudiants, dans la même unité de lieu : Microscope Electronique à Balayage, chambres d'essais Radiofréquence (RF), cage de Faraday d'essais Haute Tension (HT), banc de mesure sous pointes, etc.

**< Fabrication & Structuration 3D />**

**# Conception, modélisation et simulation**

- Stations de travail
- CAO mécanique (Solidworks, Catia, ANSYS, etc.), électronique (Cadence, Orcade, ADS, HFSS, etc.) et multiphysique (Comsol, Abacus)
  - Interface CAO mécanique et électronique

**# Matériaux**

- Thermoplastiques, thermodurcissables, composites, céramiques, verres, élastomères, textiles

**# Fabrication**

- Impression 3D par dépôt de fil (ABS, PEEK, etc.)
  - Impression 3D par stéréolithographie (résines : haute température, céramique, etc.)
- Injection de thermoplastiques (partenariats) et thermoformage
  - Moulage silicone
- Usinage (microfraisage, microélectroérosion)
- Circuits imprimés (PCB) traditionnels, flex

**# Structuration et traitement de surface**

- Dépôt 3D par dispensing (encres conductrices, catalyseurs)
  - Texturation laser 3D
- Tampographie et microtamponnage
  - Photolithographie

**# Prototypage**

- CNC, fraisage, perceuse, outillage, découpe, etc.

(a)

**< Chimie />**

**# Environnement de travail adapté - Sécurité assurée !**

- Paillasse et environnement spécifiques
  - Armoires de sécurité
  - Hottes chimiques d'attaque
- Gaz scientifiques (H2, N2, NH3, O2, Ar, etc.)
  - EPI, détecteurs et éléments de sécurités
  - Réseau d'extraction

**# Traitement de surface**

- Plasma microondes et BF
- Dépôt de matériaux isolant 3D
- Traitement et gravures chimiques diverses

**# Métallisation**

- Bains de métallisation autocatalytique (NiP, Cu, Au, Ag, Sn, etc.)
  - Bains d'électrodéposition (Cu, Ni, etc.)
- Dépôt physique sous vide en 3D (Cu, Au, etc.)

**# Matériel et instruments de laboratoire**

- Enceintes, étuves et fours (sous vide et atmosphère contrôlée)
  - Potentiostat, conductimètre, spectrophotomètre, etc.
  - Caractérisation électrochimique
  - Lithographie douce (PDMS)
- Plaques chauffantes, balances de précisions, etc.
  - Eau déionisée, bulleur, vide, etc.

(b)

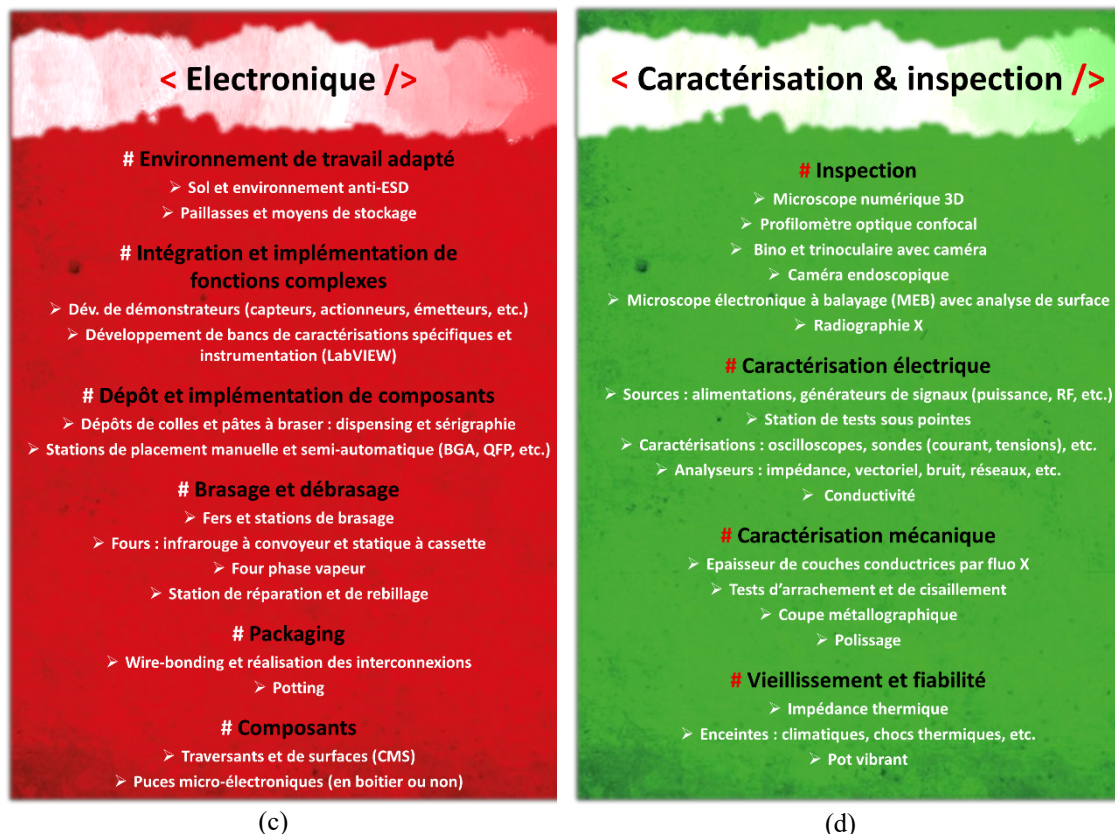


Figure 6. -Liste, non-exhaustive, des moyens disponibles sur la plateforme « Packaging avancé et plastronique 3D ; (a) Fabrication et structuration 3D ; (b) Chimie ; (c) Electronique ; (d) Caractérisation et inspection

A ces moyens matériels, il convient d'ajouter le coût en heures de service (figure 7) porté pour 1/3 par l'école CPE et 2/3 par l'INSA Lyon. Les moyens de fonctionnement utilisés par les 11 étudiants de la session #1 s'est élevé à 66k€. Les partenaires industriels ayant bénéficié de l'apport des étudiants pour le PIDP qu'ils ont proposés, ont contribué à hauteur de 40k€. Le complément budgétaire a été couvert par la Fondation pour l'Université de Lyon, la Région Auvergne-Rhône-Alpes, le GI pCNFM et le laboratoire Ampère.



|                            |                                                               |                                                               |                              |               |                     |                      |                   |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------|---------------|---------------------|----------------------|-------------------|
| Cout Formation :           |                                                               | MN                                                            | TC                           | SHS/Langues   | PIDP                | Eval                 |                   |
| Bilan des heures à payer : |                                                               | 64 h<br>cours/TD et<br>32 de TP                               | 60 h<br>cours/TD et<br>48 TP | 48 h cours/TD | 132 h TD<br>(12*11) | 26 h TD              |                   |
|                            |                                                               |                                                               |                              |               |                     |                      | <b>TOTAL H TD</b> |
|                            | Coût Heures S1                                                | 96 h TD                                                       | 108 h TD                     | 48 h TD       | 132 h TD            | 26 h TD              | 410               |
|                            |                                                               |                                                               |                              |               |                     |                      |                   |
| <b>Cours/TD :</b>          | <b>50% cours et 50% TD (comme les filières apprentissage)</b> |                                                               |                              |               |                     |                      |                   |
|                            |                                                               |                                                               |                              |               |                     |                      | <b>TOTAL H TD</b> |
|                            | Coût Heures S1                                                | 112 h TD                                                      | 123 h TD                     | 60 h TD       | 132 h TD*           | 26 h TD              | 453               |
|                            |                                                               |                                                               |                              |               |                     |                      |                   |
|                            |                                                               | <b>Encadrement Stage Industriel</b>                           |                              |               |                     | Eval                 | <b>TOTAL H TD</b> |
|                            | Coût Heures S2                                                | 4 h TD / étudiant                                             |                              |               |                     | 2 h TD /<br>Etudiant | 66                |
|                            |                                                               |                                                               |                              |               |                     |                      |                   |
|                            |                                                               | <b>Coût total pour 2018/2019 S1 + S2 : année de lancement</b> |                              |               |                     |                      | <b>TOTAL H TD</b> |
|                            |                                                               |                                                               |                              |               |                     |                      | <b>519</b>        |

Figure 7. -Coût de la formation spécialisée en heures de service, session #1, 2018-2019

## 4. Avis des étudiants

Les 11 étudiants qui ont survécu au premier semestre et trouvé sans l'ombre d'une difficulté le stage en industrie qui leur correspondait, avaient au préalable fait acte de candidature et expliquant leur projet professionnel. Il a été important de vérifier que l'idée qu'ils se faisaient de la formation spécialisée en plastronique avant le début de l'aventure, avait permis de faire mûrir leur projet.

Quelques avis sont à retrouver sur la chaîne :

Vidéo de groupe : <https://youtu.be/usIU853xGsM>

INSA GE : <https://youtu.be/GOuI3rbvbvI>

INSA GM : <https://youtu.be/wmzT9lugNZ0>

INSA GM : <https://youtu.be/gEoCZU4YE4>

CPE : [https://youtu.be/4\\_Hv3XRfQUM](https://youtu.be/4_Hv3XRfQUM)

En quelques mots les étudiants pionniers de cette aventure ont compris l'étendue des moyens dont ils ont bénéficié ainsi que l'environnement un peu privilégié dans lequel ils ont mené leurs travaux.

Pour autant ils sont restés critiques sur trois types de problématiques :

L'organisation des cours : ceux-ci sont étalés jusqu'à la fin du semestre ou presque. Une période plus ramassée permettrait de bien séparer les phases d'application et de PIDP. « Il faudra sélectionner les cours (en nombre ou en heure) ou bien remplir davantage les semaines en début de semestre. »

Le contenu des cours : à leur sens l'exhaustivité à laquelle les cours les ont confrontés, a été parfois difficile à digérer. « Moins de contenu avec plus de temps (pratique) pour l'intégrer ne nuirait pas. »

L'accès aux plateformes : les étudiants ont fréquenté la plateforme sur Lyon pendant 8 semaines, et celle d'Oyonnax pendant 8 semaines. Or leur PIDP a pu utiliser des moyens principalement sur Lyon alors que leur centre de vie s'était installé à Oyonnax. Ceci représente semble-t-il une difficulté pour les étudiants. Pour autant des navettes circulent entre les deux campus et aucun

groupe n'a réellement souffert de cet état de fait pendant le développement de son PIDP. La remarque des étudiants n'a pas de solution pour l'instant car la formation exige qu'ils puissent découvrir pleinement les moyens matériels csi à Oyonnax.

Bien évidemment la maquette des cours sera réorganisée pour la rentrée 2019 où nous fixons à 18 le nombre maximum d'étudiants avant la pleine charge à la rentrée 2020.

## **5. Conclusion**

Les technologies plastronique modifient profondément la façon de concevoir les systèmes. Les plastiques deviennent plus « intelligents » et les systèmes électroniques peuvent être mises en œuvre sur des objets en polymères de formes 3D complexes. Dans de sens, l'innovation ne fait que commencer !

Un programme de formation original a été développé au sein de l'Université de Lyon en collaboration avec de nombreux partenaires (industries, laboratoires, fondation, etc.).

Après une phase de mise à niveau, les étudiants suivent une formation spécifique leur permettant d'élargir leurs compétences pour pouvoir gérer un projet complet. D'autre part, des groupes de travail d'étudiants travaillent sur des projets industriels proposés par des entreprises. Une approche pragmatique et des moyens conséquents sont mis à disposition des étudiants. Non exempt de critiques fondés, le ressenti des partenaires industriels comme des étudiants est flatteur.

## **6. Remerciements**

Les auteurs remercient tout particulièrement le Ministère 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 ». Les auteurs sont également reconnaissant au GIP-CNFM et au programme ANR IDEFI FINMINA [6], à la Région Auvergne-Rhône-Alpes et à celle du Haut-Bugey, à l'Université de Lyon : en particulier l'INSA de Lyon et l'école CPE, le lycée Arbez Carme, tous les laboratoires, plates-formes et centres techniques partenaires (AMPERE, IMP, CNRS, CIMIRLY, CT-IPC), ainsi que les représentants de branches et organismes de valorisation (Plastipolis, Fédération de la plasturgie et des composites, Allizé Plasturgie, ACSIEL, UIMM, Cap'tronic).

Enfin, nous remercions vivement tous les sponsors et partenaires industriels engagés à nos côtés dans ce projet, sans qui notre travail et nos efforts n'auraient aucun sens. Nous citerons en particulier : Plastic Omnium, le groupe Seb, la fondation Dassault Systems, Sintex-NP, Cirly, S2P.

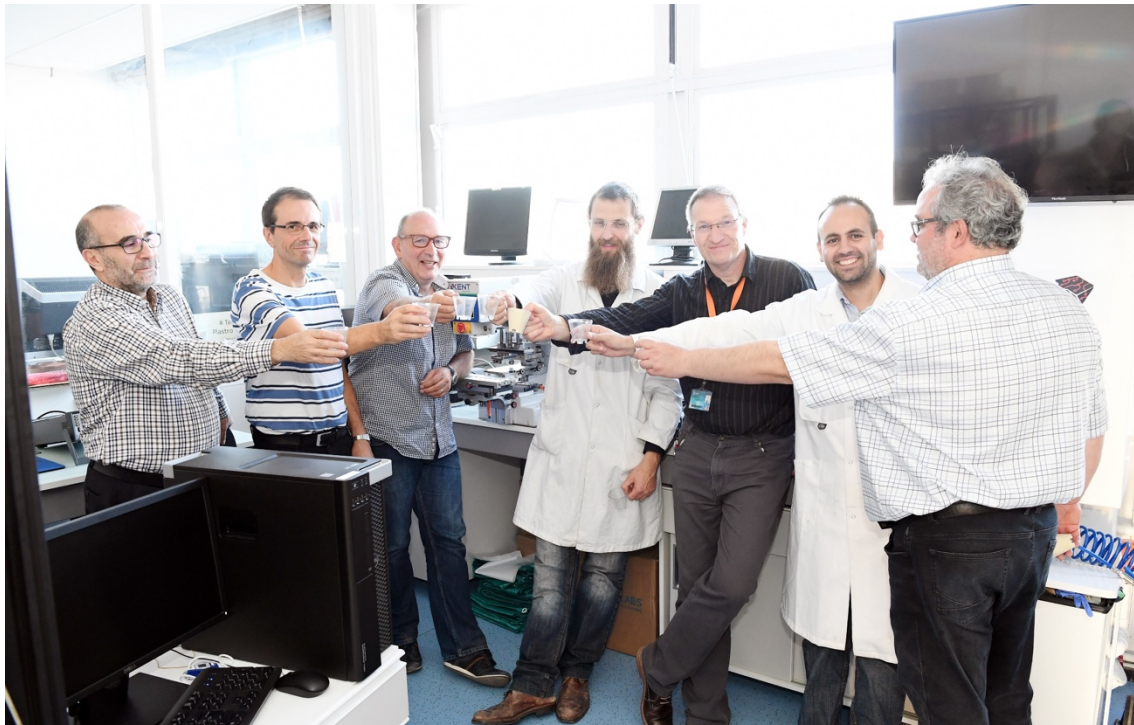


Figure 8. -L'équipe enseignante 2018-2019 avec les premiers échantillons de « plato-cup » sortis du moule.

## Références

- [1] Website - <http://www.fondation-pour-universite-lyon.org>.
- [2] Ph. Lombard, M. Cabrera, V. Semet, B. Allard, S. Kamotesov, M. Moguedet and J-Y Charneau, "Plateforme pédagogique et scientifique; Exemple de conception, réalisation et caractérisation d'un capteur inductif multidirectionnel de proximité pour la détection d'approche 3D," J3eA, vol 16, 2017, JPCNFM 2016 - 14e journées pédagogiques du CNFM - Website - <https://doi.org/10.1051/j3ea/20171013>, (2017).
- [3] Ph. Lombard, V. Semet, M. Cabrera, "Formation au prototypage de systèmes électroniques 2D et 3D. Initiation à la Plastronique 3D et aux dispositifs MID," J3eA, vol 14, 2015, JPCNFM 2014 - 13e journées pédagogiques CNFM - Website - <https://doi.org/10.1051/j3ea/2015025>, (2015).
- [4] Website - <https://www.universite-lyon.fr/formation/formations-innovantes/plastronique-3d-10618.kjsp?RH=1486387482944>.
- [5] Chaîne vidéo, [www.youtube.com/channel/UCYEgiR9FiVF3Wqc64ie7W6g/videos](http://www.youtube.com/channel/UCYEgiR9FiVF3Wqc64ie7W6g/videos).
- [6] ANR IDEFI-FINMINA : Initiative d'Excellence - Formation Innovante en Microélectronique et Nanotech., ANR-11-IDFI-0017.  
<http://www.cnfm.fr/VersionFrancaise/actualites/FINMINA.htm>.