

Projet pratique de mise en œuvre de la plastronique

V. Gilmus^a, T. Gerges^a, P. Lombard^a, J.-Y. Charmeaux^b, M. Cabrera^a, B. Allard^a

^a Université de Lyon, INSA Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, Ecole Centrale Lyon, CNRS UMR 5005, Ampère, Lyon, France

^b Université de Lyon, INSA Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, Université Jean Monnet, CNRS UMR 5223, IMP, Lyon, France
Pôle CIMIRLY du GIP CNFM, Lyon, France

Contact email : bruno.allard@insa-lyon.fr

Dans le cadre de la formation spécialisée en plastronique, il a été proposé aux étudiants de s'immerger dans la problématique alors qu'ils ne possédaient pas toutes les compétences ni connaissances idoines. Un travail pratique de 32h cumulées leur permet de toucher concrètement à la plastronique autour d'un cahier des charges évasif. Le livrable est double : un rapport de pré-étude, étayé par une bibliographie et des analyses simples, et un démonstrateur tangible. L'article décrit un projet d'étudiants pour mettre en lumière les ingrédients de cette démarche en mettant en avant les facettes de la réussite et les pièges d'une telle approche.

I. Contexte et principe du projet

Une formation spécialisée en Plastronique est ouverte, à Lyon, aux étudiants issus de master 1^{ère} année ou de 2^{ème} année de cycle ingénieur, pour se confronter à un champ pluridisciplinaire (1, 2, 3). Le fonctionnement correct d'une promotion repose sur un équilibre entre les cursus initiaux portés par les étudiants : chimie, matériaux, mécanique et électronique. Ventilés en trinômes ou quadrinômes, les étudiants abordent des notions dont une grande partie est nouvelle pour chacun d'eux et le travail d'équipe est une aide importante à l'appréhension des nombreuses problématiques. Cette approche est satisfaisante sur le plan opérationnel comme du ressenti des étudiants, pour balayer un champ large en finalement peu de temps.

Le programme pédagogique repose sur le passage le plus rapide possible à l'expérimental. En ce sens les cours et travaux dirigés comptent pour moins de 40% dans la distribution des activités. L'approche expérimentale repose sur 3 séquences.

Une séquence relativement dirigée conduit les étudiants à effectuer des travaux pratiques de forme classique. A titre d'exemple un objet en forme de camion embarque des fonctions d'éclairage (4). A noter que ce sujet de TP a été soutenu par le projet IDEFI-FINMINA (5). Les étudiants abordent d'une part le circuit électronique (fig. 1a), puis la CAO mécanique 3D de l'objet (fig. 2a), pour se poser la question de superposer le chevelu métallique qui remplace le circuit imprimé (fig. 1b) à la réalité de l'objet (fig. 2b). Après avoir joué avec une imprimante 3D, les étudiants sont confrontés au procédé de métallisation (fig. 3). Un tel TP nécessite 8h du temps des étudiants et doit les rassurer sur les champs disciplinaires qu'ils découvrent.

Une séquence finale consiste à confronter les étudiants à un client industriel, sur la base d'un cahier des charges précis et des attentes fortes. Cette immersion peut paraître brutale pour certains étudiants. Aussi une séquence intermédiaire permet aux étudiants de se projeter dans l'exercice final. Il s'agit d'appréhender un exemple concret d'application

plastronique sous forme d'un projet. Les livrables sont triples : outre un démonstrateur si possible fonctionnel, les étudiants rassemblent leurs analyses et conclusions dans un rapport et en font une synthèse à l'oral. Il faut compter de 32h à 48h cumulées pour un tel exercice.

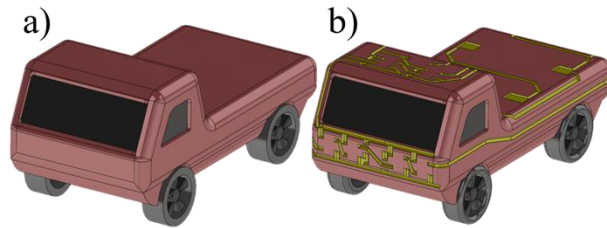
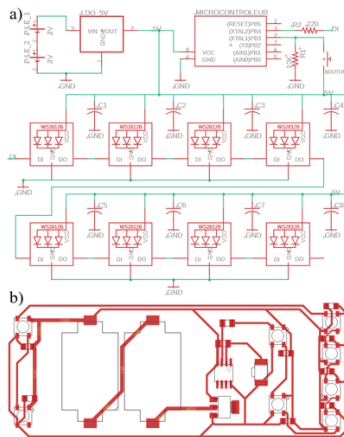


Fig.1. a) Schéma électronique du dispositif, b) Circuit électronique planaire qui va être projeté sur l'objet 3D.

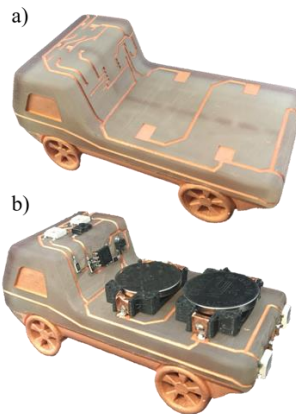


Fig.3. Le camion imprimé : a) après 90 minutes de métallisation par autocatalyse, b) et avec implémentation de composants.

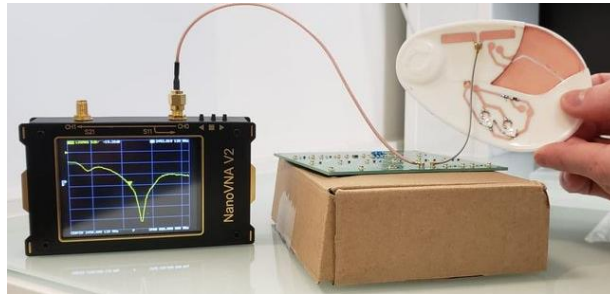
II. Un projet réussi

Trois étudiants se sont investis dans un projet visant à ajouter une fonction de communication sans fil (*bluetooth*) à un objet polymère 3D. Ce trinôme reposait sur un étudiant de cursus électronique, un étudiant de cursus mécanique et un étudiant de cursus plasturgie.

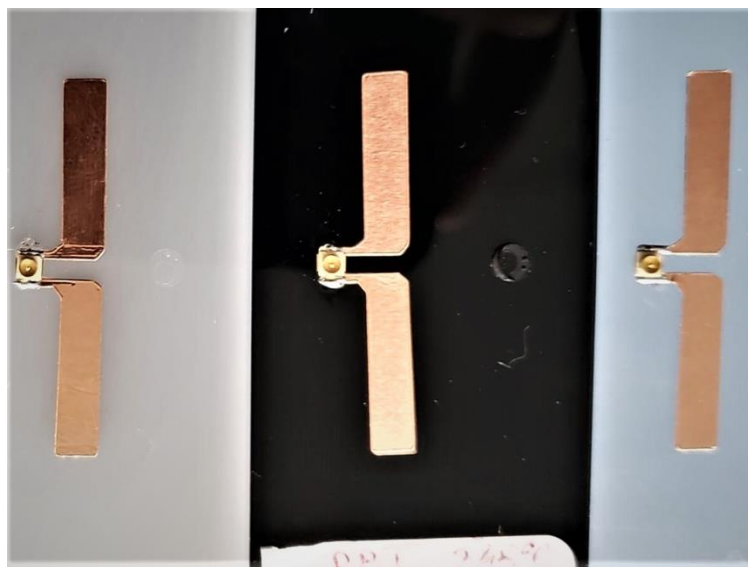
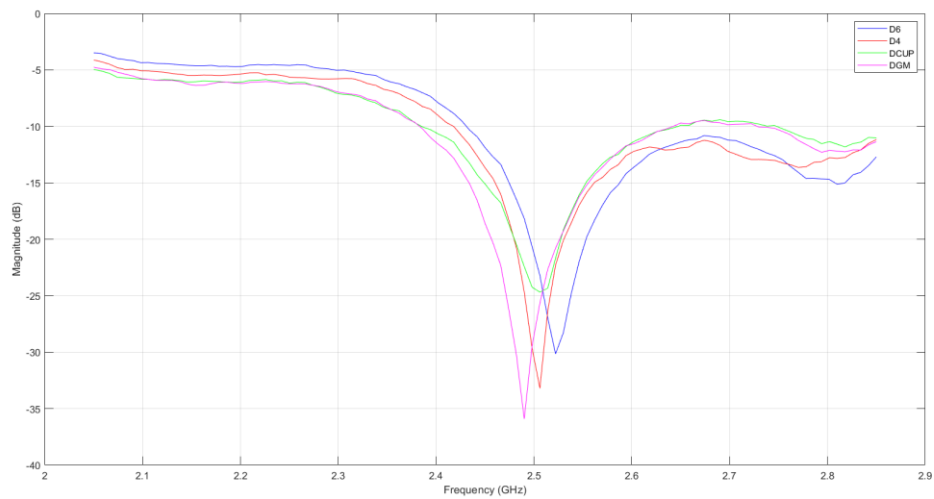
La figure 4 présente une mesure de paramètres S_{11} que les étudiants ont pratiqué sur leur objet, proche du démonstrateur final. En amont de cette phase, les étudiants auront au préalable parcouru l'état de l'art sur la base de questions suggérées par l'encadrement (et en interaction avec l'encadrement), puis fait plusieurs tests pratiques en guise de plan d'expérience, avant que de faire un choix technique final et produire un démonstrateur complet.

Les étudiants ont, au final, appréhender leur projet en le résumant par les items suivants :

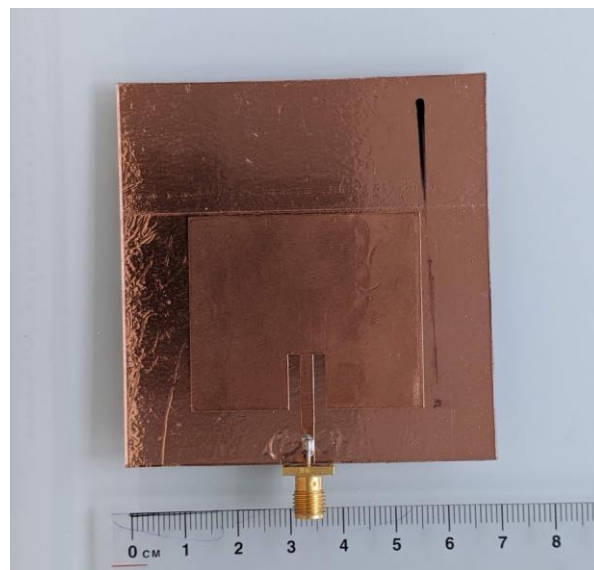
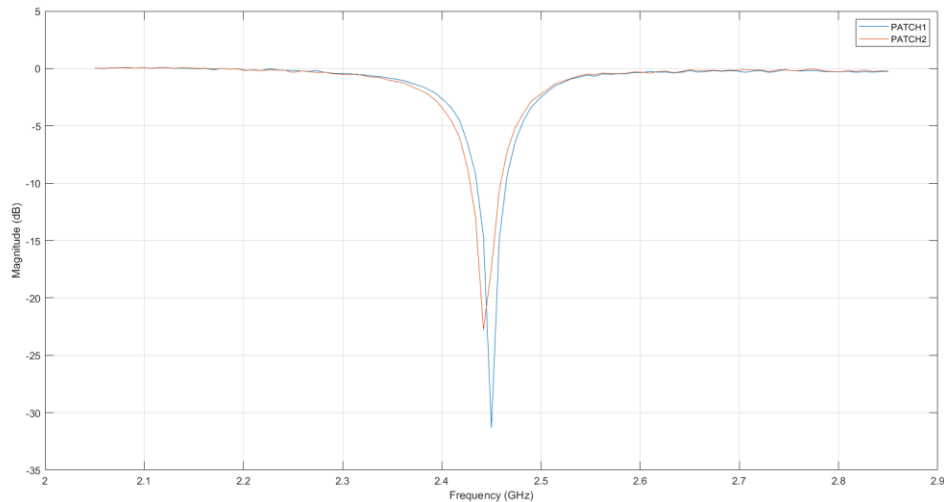
- intérêt de la plastronique pour ce type d'application,
- les différents types d'antenne et les protocoles de communication pour des objets de l'IoT,
- comparaison des différents procédés plastroniques,
- intégration de l'antenne.



(a)



(b)



(c)

Fig.4. Mesure du paramètre s_{11} d'une antenne positionnée sur la peau de l'objet. (a) banc de mesure a minima, (b) comparaison d'antennes dipôle réalisées sur divers substrat polymère, (c) antennes patch de référence.

Etat de l'art

En une dizaine d'heures cumulées, et sur la base de questions précises, les étudiants ont bâti un tableau de synthèse pour confronter :

- l'influence des propriétés du substrat polymère (sous-entendu sur l'antenne, les boutons capacitifs et la capacité à supporter le report de composants électroniques),
- l'influence des propriétés du conducteur (à savoir de la métallisation, qui dépend elle-même du procédé primaire d'élaboration de l'objet, du matériau constituant l'objet, du coût, de la complexité, du délai de réalisation...),
- l'influence du procédé global de fabrication (à savoir l'interaction entre les étapes successives du procédé d'élaboration),
- différents types d'antenne et la précision géométrique découlant du procédé de fabrication,

- l'interconnexion avec une carte imprimée classique (car une partie du circuit électronique ne pouvait pas être abordée, notamment le contrôleur *bluetooth*, et une carte de développement minimaliste représentait la solution la plus simple).

	LDS / LSS (Sélection/Ablation Laser)	2K Molding (Bi-injection)	JetSelectiv	IME	Sérigraphie, Tampographie et Jet d'encre	Embossage à chaud
Compatibilité avec la fabrication d'antenne	++	++	(+)	(+)	+	++
Liberté de design (surface 3D complexe)	+	++	(+)	+	(-/+)	(+)
Substrat utilisé (support polymère)	LCP, PBT, ABS, PC , PA/PPA, ... avec additifs LDS (éléments autocatalytiques)	Couples PC/ABS , PPA/PPS, LCP/LCP+Pd	Pratiquement tous (d'après le fabricant)	Films TP thermoformables : PC, ABS , PMMA, TPU	ABS/PC , TPU, PMMA, Polyimide (Kapton), PET...	(Tous)
Élément conducteur (piste électronique)	Dépôt métallique (par voie humide)	Dépôt métallique (par voie humide)	Dépôt métallique (par voie sèche)	Encre conductrice	Encre conductrice	Métal "pur"
Coût d'outillage (investissement)	-	--	(+)	+	+	+
Coût matières premières	+	+	(+)	+	+	++
Compatible pour la réalisation de grandes séries	+	++	++	++	++	++
Compatible avec prototypage rapide	Oui	Non	(Oui)	Oui	Oui	(Oui)
Commentaires	Métallisation à l'aide de bains chimiques Cas de réalisation d'antennes de smartphone	Métallisation à l'aide de bains chimiques Cas de réalisation d'antennes de smartphone	Procédé mis au point par Jet Metal (exclusivité) Peu d'informations au sujet du procédé et sur les réalisations	Nécessité de ne pas déformer l'antenne pendant le thermoformage	Encres commerciales pas forcément développées Cas de réalisation d'antennes (mais encore en étude) Incompatibilité de certains substrats (PP) car adhésion difficile à obtenir	Procédé peu/pas développé pour cette application (en étude) Forme 2D voire courbe

Fig.5. Tableau de synthèse issu de l'état de l'art (d'après le rapport des étudiants).

La figure 5 reprend un exemple de tableau qualitatif demandé aux étudiants. A ce stade, un tel tableau permet d'apprécier que les étudiants ont correctement assimilé les éléments du cours et ont su les mettre en perspective puisqu'ils ont tiré parti de la littérature. En vérité, la réelle priorité des étudiants était de déterminer quel type d'antenne choisir et à partir de là comment la réaliser. Il leur tardait de passer à l'expérimentation.

Réalisation (rapide) d'une antenne dipôle

Les étudiants ont pris la décision d'une antenne dipôle, c'est-à-dire un choix similaire à celui de l'antenne Molex disponible en tant que composant pour des applications de même acabit (6). Avant d'expérimenter des procédés de métallisation complexes, les étudiants ont pris le réflexe du prototypage rapide. La figure 6 montre un échantillon d'antenne pris dans un plan d'expérience, l'antenne commerciale de référence et le procédé de prototypage.

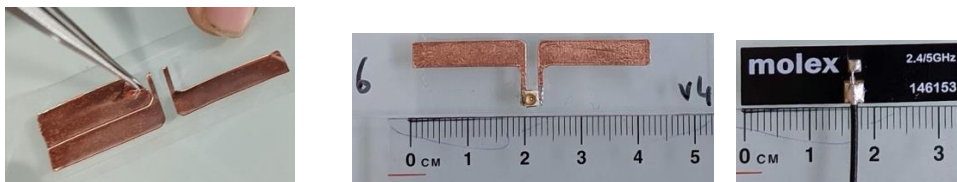


Fig.6. Prototypage d'antenne, échantillon issu d'un plan d'expérience et antenne de référence.

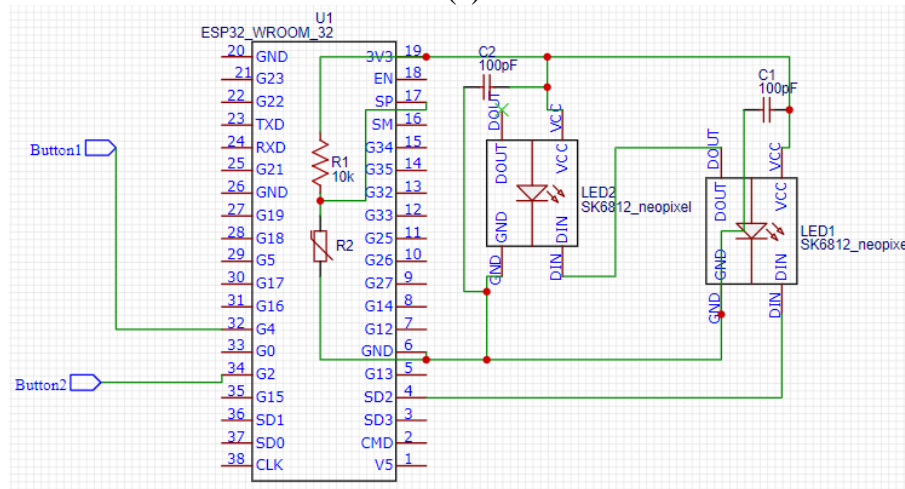
Cette étape a été formatrice pour les étudiants, qui ont conduit rapidement un plan d'expérience sérieux pour finaliser leur géométrie d'antenne.

Un démonstrateur raisonnable

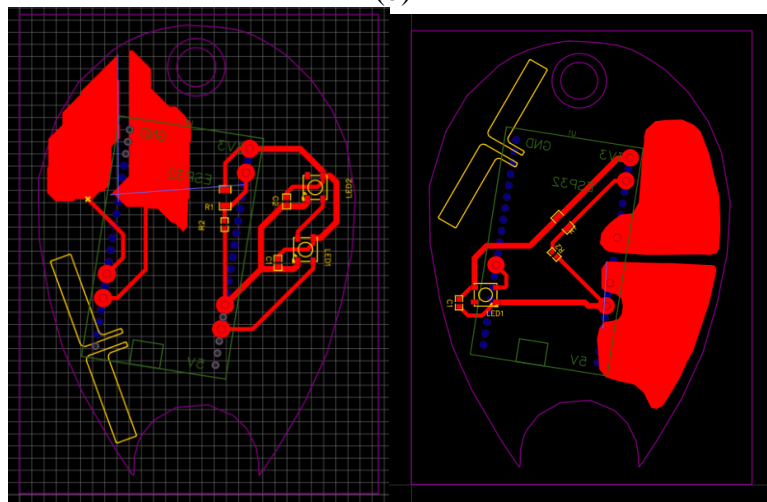
Les étudiants ont conservé l'antenne, des boutons capacitifs ainsi que des témoins lumineux pour la partie plastronique des choses (fig. 7). Une carte ESP32 (7) maintenant assez répandue embarque le microcontrôleur et la radio *bluetooth*. A noter que les étudiants n'ont pas reculé devant la difficulté d'implanter par brasure un connecteur bas profil IPEX (Amphenol A1-JB) au pied de l'antenne, identique à celui présent sur la carte ESP32.



(a)



(b)



(c)

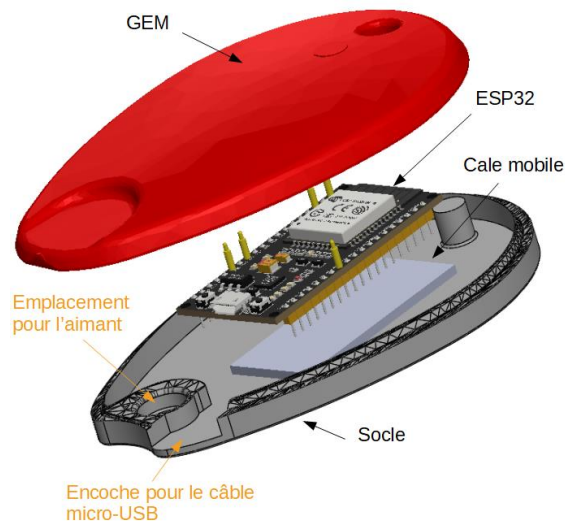


Fig.7. (a) Vues CAO mécaniques du démonstrateur, (b) le circuit électronique global, (c) vues de type circuit imprimé sur la coque 3D, (d) vue de l'assemblage.

La partie plastronique des choses concerne la réalisation de divers outils nécessaires au procédé de fabrication, la réalisation de la partie supérieure de l'objet avec la métallisation de l'antenne ainsi que du chevelu de connexion du circuit électrique (fig. 8). Cette coque est obtenue par un procédé d'injection : en ce sens les étudiants ont réellement travaillé à adapter des fonctions électroniques à l'objet en polymère. Ils ont mené cette partie avec un grand soin (et un certain nombre d'itérations également).

Au final, les étudiants ont eu à cœur de montrer un démonstrateur fonctionnel, avec un écho des actions sur les boutons, recueilli à bonne distance sur un module équivalent (fig. 9).

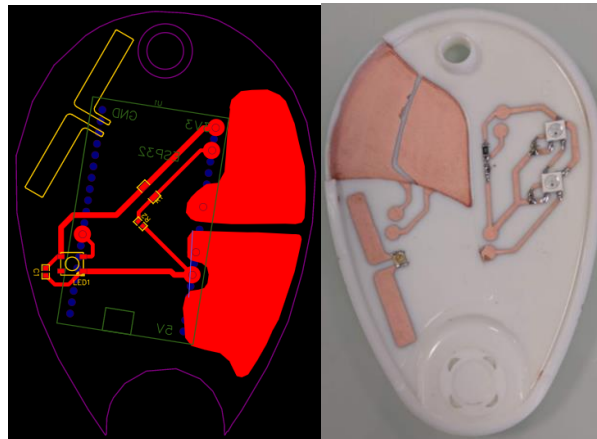


Fig.8. Partie plastronique de la CAO et la version expérimentale

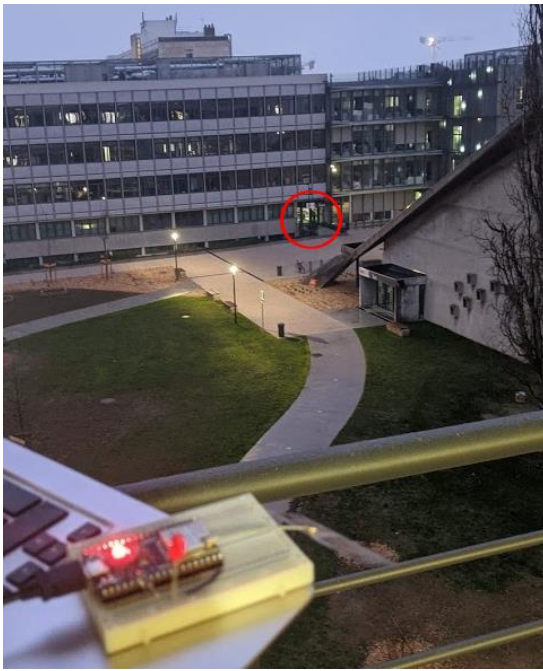


Fig.9. Test fonctionnel de la partie électronique avec une liaison sans fil d'une portée de 90m environ et un démonstrateur final typique.

Il est évident que la démonstration finale d'un objet constitue la satisfaction des étudiants et fait rapidement oublier les moments de découragement ou de fabrication laborieuse d'échantillons. Par ailleurs cela met les étudiants en meilleure posture pour franchir l'étape de la restitution du projet à l'oral. Un court rapport vient compléter le *reporting* général.

L'évaluation tient compte autant de l'engagement des étudiants, de la manière dont ils ont infléchi voire amélioré leur méthodologie, de leur soin en phase expérimentale que du contenu et de la qualité de la restitution.

A ce stade, aucun étudiant ne s'est plaint du retour évaluatif porté sur son travail.

III. Bilan et discussion

Il est clair que l'exemple précédent est un succès pour les étudiants et pour la pédagogie. Pour autant la séquence comporte des risques, qui peuvent se transformer en pièges, au détriment des étudiants comme des enseignants.

- les étudiants qui ont mené ce projet sous la forme ci-dessus ont montré un enthousiasme et une efficacité que ni les capacités de l'atelier mis à leur disposition, ni le soutien technique, ni l'accompagnement des enseignants ne pourraient compenser,
- les étudiants ont travaillé avec un volume horaire bien supérieur à la prévision. Certes ils ont balayé des questions qui n'étaient pas posées au départ comme par exemple regarder les limites de réalisation de l'antenne en fonction de matériaux particuliers. Il n'en reste pas moins que l'aboutissement est donc le résultat de deux facteurs : l'engagement des étudiants et leur volonté d'obtenir un résultat quel que soit le temps nécessaire,
- l'atelier mis à disposition des étudiants est une sorte de *fablab*, organisé pour motiver les étudiants à se saisir des équipements et s'atteler à des échantillons,

- un ingénieur de plateforme est indispensable pour aider techniquement les étudiants, notamment les moins enclins à faire les choses. Cet accompagnement est important au début. L'ingénieur de plateforme comme l'ensemble des enseignants veillent scrupuleusement aux consignes de sécurité. Cet aspect est un autre élément que les étudiants découvrent de manière active,
- la forme du démonstrateur importe en fait assez peu. Les étudiants ont donc une certaine marge de liberté quant à l'objet et à la fonction qu'ils souhaitent implanter.

Si l'une des conditions précédentes vient à manquer, les étudiants vont laborieusement entrer dans le projet, et sans doute se contenter d'un résultat minimal. Au final, le projet aura manqué de leur donner l'envie de faire et d'adopter une posture constructive face à des technologies, des savoirs et des compétences qu'ils découvrent à peine. Dans une telle situation, le corps enseignant doit réagir vite et le projet se transformer en un exercice plus directif. La cible pédagogique est alors perdue en partie.

IV. Conclusion

L'article décrit un projet long, vu comme une incitation faite aux étudiants de devenir proactifs dans un domaine dont ils ignoraient de nombreuses facettes quelques semaines auparavant. Pour autant le projet ne doit pas conduire à aborder la conception du démonstrateur de manière approximative : il s'agit bien de conserver une démarche d'ingénierie. Sans doute un tel projet va révéler le potentiel de certains étudiants et en effrayer d'autres. Le degré d'aboutissement des démonstrateurs en est un révélateur.

Remerciements

Les auteurs remercient la Région Auvergne Rhône-Alpes pour son soutien financier dans le cadre du programme COMSUP. La formation spécialisée en Plastronique reçoit le soutien de nombreux acteurs institutionnels et académiques. Les auteurs remercient également le GIP-CNFM pour sa contribution à la mise en place de la plateforme plastronique (www.cnfm.fr).

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, 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. <https://www.universite-lyon.fr/formation/formations-innovantes/plastronique-3d-10618.kjsp?RH=1486387482944>.
4. 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/>.
5. IDEFI-FINMINA : Initiative d'Excellence - Formation Innovante en Microélectronique et Nanotechnologies, ANR-11-IDFI-0017. Website: <http://www.cnfm.fr/VersionFrancaise/actualites/FINMINA.htm> (Accès 2021).
Molex Product Specification : 2.4/5GHz SMT Chip Antenna, <https://www.molex.com/molex/products/part-detail/antennas/1461750001>.
6. <https://fr.wikipedia.org/wiki/ESP32>.