



Travaux pratiques d'électronique analogique basés sur l'ingénierie inverse d'un capteur de particules

Michaël Canu^{1*}, Michaël Bressan²

¹ Laboratoire de Didactique André Revuz, UR4434, Université Paris Cité, 75205 Paris /
Service Platinium, université Perpignan Via Domitia 52 av. Paul Alduy 66860 Perpignan

² Laboratoire PROMES-CNRS, Université de Perpignan Via Domitia, 52 av. Paul Alduy
66860 Perpignan

*Auteur de correspondance : michael.canu@univ-perp.fr

Résumé : *Une méthode très utilisée en programmation, consiste à analyser un programme déjà écrit et à le décortiquer pour comprendre son fonctionnement afin de le modifier pour l'adapter à ses besoins. Plus généralement, cette méthodologie très utilisée dans l'industrie, s'appelle la rétro-ingénierie, ou ingénierie inverse (reverse engineering). Elle est aussi utilisée dans certaines universités à travers le monde à des fins de formation mais elle reste encore très peu diffusée alors que son potentiel pédagogique est certain. Cette approche vise à rendre les étudiants actifs et contribue au développement de compétences à la fois disciplinaires et transversales tout en donnant du sens aux apprentissages. Nous présentons ici un travail en cours, relatif à la création d'un TP d'électronique analogique basé sur cette méthodologie et appliquée à l'instrumentation dans une formation de licence EEA. Le TP a été testé avec un premier groupe d'étudiants de L2 et suscite un réel engouement et une forte motivation.*

Mots clés : Électronique analogique, travaux pratiques, rétro-ingénierie, filtrage.

Abstract: **Analog electronics hands-on labs based on reverse engineering for a particulate matter sensor.**

A method widely used in programming consists of analyzing a program that has already been written and dissecting it to understand how it works in order to modify it to adapt it to your needs. More generally, this methodology, which is widely used in industry, is called reverse engineering. It is also used in some universities around the world for

training purposes, but it is still very little disseminated even though its educational potential is certain. This approach aims to make students active and contributes to the development of both disciplinary and transversal skills while giving meaning to learning. We present here a work in progress, relating to the creation of an analog electronics practical work based on this methodology and applied to instrumentation in an EEA bachelor's degree course. The practical work was tested with a first group of L2 students and arouses real enthusiasm and strong motivation.

Keywords: Analog electronics, labs, reverse engineering, filtering Introduction.

1. Introduction

Une caractéristique fondamentale de l'ingénieur expert dans un domaine spécifique est la capacité à utiliser des concepts disciplinaires pour résoudre des problèmes [1]. Plusieurs méthodes d'apprentissage dit actif sont mises en œuvre depuis plus de 20 ans dans les facultés d'ingénierie ou les écoles d'ingénieurs pour développer ce type de compétence. C'est le cas notamment de la démarche d'investigation (DI), de l'apprentissage par problème (APP) ou par l'action (APA). Une méthode très utilisée en programmation, consiste à analyser un programme déjà écrit et à le décortiquer pour comprendre son fonctionnement afin de le modifier pour l'adapter à ses besoins. Cette méthodologie, utilisée dans l'industrie, s'appelle la rétro-ingénierie, ou ingénierie inverse (reverse engineering). Elle est utilisée par exemple à l'université de Monterrey [2] ou à Polytech Marseille [3]. Cependant, il y a très peu de littérature sur l'aspect pédagogique de cette démarche au niveau universitaire.

2. L'ingénierie inverse

L'Apprentissage par Ingénierie Inverse (AII dans la suite) est un outil éducatif à fort potentiel dans l'enseignement des sciences, offrant des approches innovantes pour améliorer l'apprentissage et les compétences de pensée critique des étudiants. Cette méthode, que l'on peut classer dans les méthodologies d'apprentissage dites actives (active learning), consiste à déconstruire des systèmes ou des produits existants pour comprendre leurs principes sous-jacents [4]. Elle a montré un potentiel significatif pour favoriser une compréhension plus profonde et un engagement accru des étudiants dans diverses disciplines scientifiques surtout dans l'éducation secondaire.

Voici quelques aspects clés de l'approche par ingénierie inverse :

- Au niveau du développement cognitif : L'AII s'aligne sur les découvertes de la psychologie cognitive concernant les caractéristiques de résolution de problèmes des experts. Elle encourage les étudiants à reconnaître des modèles, à représenter les problèmes en termes de principes sous-jacents et à développer des compétences de planification stratégique. Cette approche aide les étudiants à progresser à travers les niveaux supérieurs de la taxonomie de Bloom [5], passant des connaissances et de la compréhension de base à l'application, l'analyse et la synthèse avancées.

- Au niveau de l'apprentissage interdisciplinaire : En intégrant l'AII dans les programmes scientifiques, les enseignants peuvent promouvoir l'apprentissage interdisciplinaire. Par exemple, le modèle d'enseignement C-STEAM par ingénierie inverse combine le contexte culturel avec l'éducation STEAM (Science, Technologie, Ingénierie, Arts et Mathématiques), favorisant une approche holistique de l'apprentissage qui englobe à la fois les aspects techniques et culturels.
- Au niveau des applications pratiques : L'AII offre aux étudiants une expérience pratique dans l'analyse et la compréhension des systèmes du monde réel. Cette approche pratique comble le fossé entre les connaissances théoriques et leur application, préparant les étudiants aux défis qu'ils pourraient rencontrer dans leur future carrière.
- Sur l'amélioration des compétences en résolution de problèmes : Certaines études ont montré que la mise en œuvre de l'AII peut conduire à des améliorations significatives des performances des étudiants. Par exemple, un cours de mécanique des fluides de niveau initial a vu une augmentation moyenne de 14,7% des notes d'examen final après l'introduction d'un projet d'ingénierie inverse [6].

Cette approche permet à la fois de contribuer au développement de compétences du champ disciplinaire, de type applicatives et intégratives mais aussi de compétences transversales (mais liées à la disciplines) de type « caring » (intérêt et valeurs) et « learning how to learn » (apprendre à apprendre) de la taxonomie de Fink [7]. Cela en fait une méthodologie très adaptée pour créer des activités significatives, au sens de Fink, c'est à dire « qui donnent du sens aux apprentissages ».

2.1. Le capteur de particules

Le capteur choisi comme objet d'étude est un modèle de bas coût en technologie analogique, le Shinyei PPD42NS (fig. 1 et 2). Il existe bien entendu des capteurs plus fiables ou plus précis mais le choix s'est porté sur un matériel bon marché et ne possédant pas de traitement numérique intégré pour pouvoir travailler la partie conditionnement du signal avec les étudiants. Il ne comporte qu'un seul circuit intégré, un quadruple ampli-op en technologie bipolaire, spécifique pour une alimentation asymétrique, ce qui facilite la compréhension du schéma. Globalement, le capteur se compose d'un étage de détection en lumière infrarouge sur le principe de la diffusion lumineuse (scattering) suivi d'un étage d'amplification double de filtrage passe-bande et finalement un étage de mise en forme par détection de seuil. Il fournit un signal rectangulaire 0-5V dont la durée à l'état bas est grossièrement dépendante de la taille des particules qui passe dans le capteur et dont la fréquence dépend de la quantité de particules par unité de volume. Pour plus de détails, une étude complète de ce capteur a été réalisée par Canu et al. [8].

L'intérêt de ce composant réside surtout dans sa simplicité structurelle, l'utilisation de composants discrets et l'absence de circuit imprimé multicouches, le tout permettant de bien suivre les pistes et ainsi de reconstruire aisément son schéma électronique.

Le capteur a été agrémenté de supports pour une utilisation plus pratique en TP et surtout permettre une circulation adéquate de l'air dans la chambre de détection (fig. 3). De nombreux points de tests sont nativement présents sur le capteur et servent à la connexion de câbles (fig.

4) pour recueillir certains signaux d'intérêt : à la sortie de l'étage de détection et à la sortie des deux étages de filtrage.

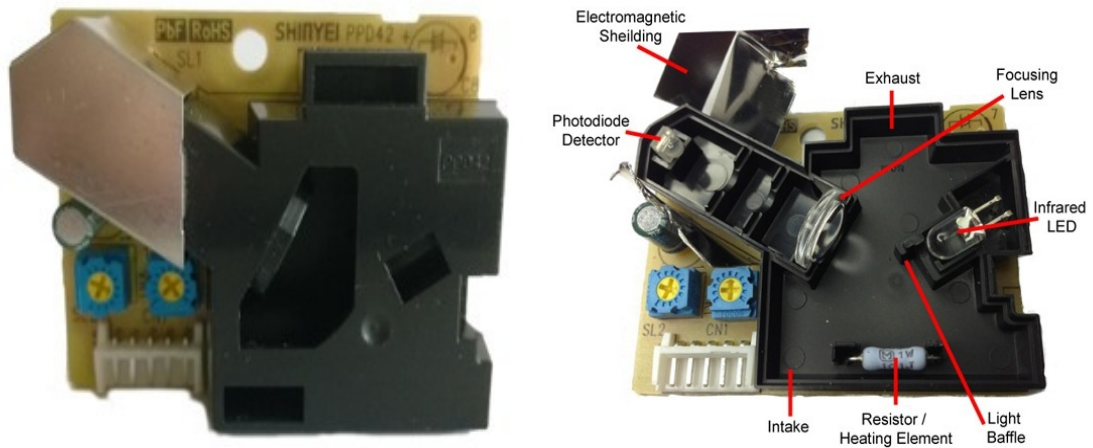


Figure 1 et 2 : Le capteur Shinyei et la partie réalisant la détection des particules par diffusion. On remarque, en bas, la résistance qui produit le flux d'air permettant l'entrée des particules dans le capteur.

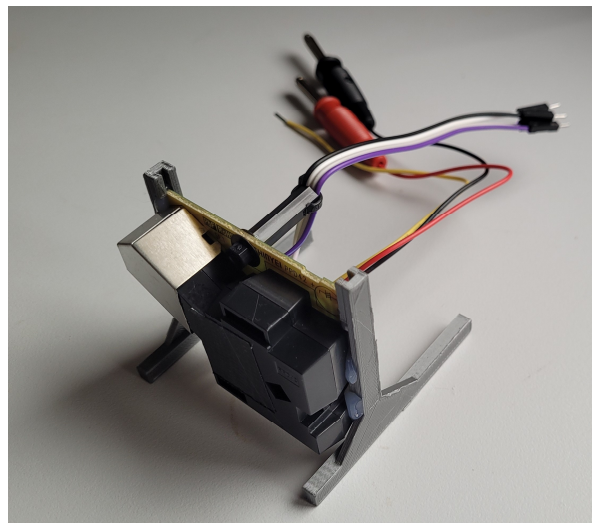


Figure 3 : La maquette de TP capteur avec ses connexions

3. Méthodologie du TP

Le TP proposé ici vise dans un premier temps à présenter la démarche de la rétro-ingénierie et ensuite propose plusieurs étapes pas-à-pas pour la mener à bien. Il s'agit d'un TP pour des étudiants de deuxième année de licence SPI (sciences pour l'ingénieur).

3.1. Les objectifs pédagogiques

Il y a un objectif relatif à la méthodologie de l'ingénierie inverse et 3 objectifs relatifs aux contenus disciplinaires :

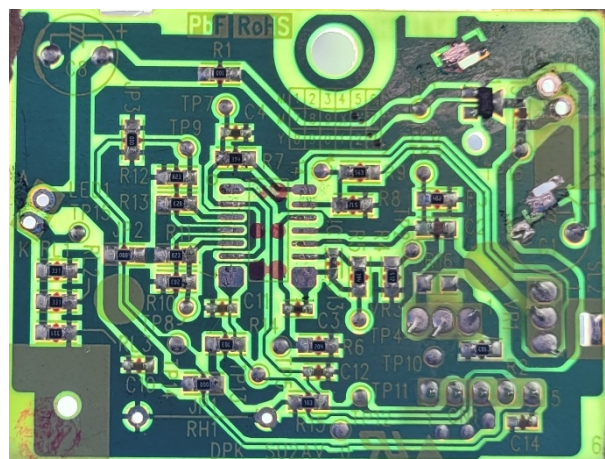
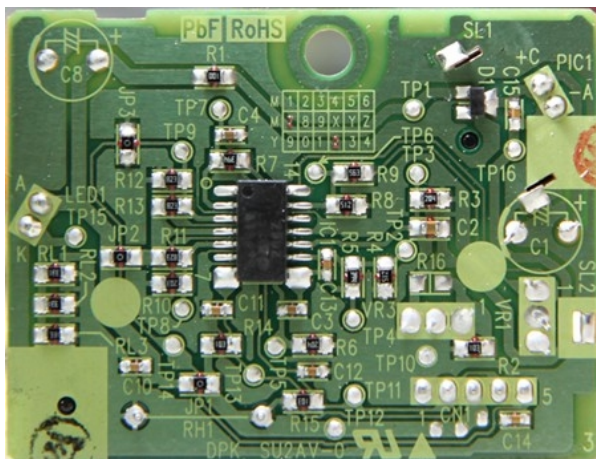
- Former à la démarche et son utilisation professionnelle
- Renforcer les connaissances et de compétences relatives aux filtres analogiques de type passe-bande
- Renforcer les compétences relatives aux mesures en électronique (oscilloscope, multimètre, alimentation)
- Renforcer les compétences numériques du domaine (logiciel de création KiCad)

Le TP repose donc sur l'utilisation du capteur présenté ci-dessus sur lequel les points de test ont été connectés à des câbles pour faciliter l'utilisation (fig. 3 et 4). Cet article s'intéresse plus particulièrement à la première partie du TP en présentiel avec le matériel et non à la partie « à la maison » concernant la conception/simulation avec le logiciel KiCad.

Les objectifs pédagogiques dans le sens d'*acquis d'apprentissages* sont les suivants :

- Identifier une architecture de filtre analogique actif et passif de type passe-bas, passe-haut ou passe-bande
- Calculer une fréquence de coupure et un gain à une fréquence donnée pour un filtre donné
- Utiliser un outil graphique pour tracer la réponse impulsionnelle et fréquentielle d'un filtre donné
- Concevoir un filtre passe-bande à l'aide de KiCad

Le TP considéré ici, comprend une première partie expérimentale de 3 h basée sur l'AII, et une deuxième partie plus classique de conception de filtres électroniques (à faire à la maison). Concernant la première partie, le sujet rappelle les objectifs de celui et guide les étudiants dans la démarche de d'analyse par l'ingénierie inverse. Il contient plusieurs photos pour faciliter à la fois la compréhension du fonctionnement du capteur (comme la photo 2 de l'intérieur du capteur) ou le travail des étudiants comme avec la photo du PCB (fig. 5 et 6). En effet, pour l'analyse du PCB, il peut être plus facile suivre les pistes sur la photo plutôt que sur le circuit imprimé lui-même, même si, bien sûr, certaines actions peuvent être conduites sur le matériel (test de continuité par exemple, mesure de points de fonctionnement).



Un schéma partiel du circuit est présenté aux étudiants, les zones vides étant à découvrir (fig. 7). Ceci réduire la difficulté de l'analyse en laissant de côté les sous parties qui n'ont pas d'intérêt ici : la détection des particules et l'étage de mise en forme des signaux de sortie, en particulier.

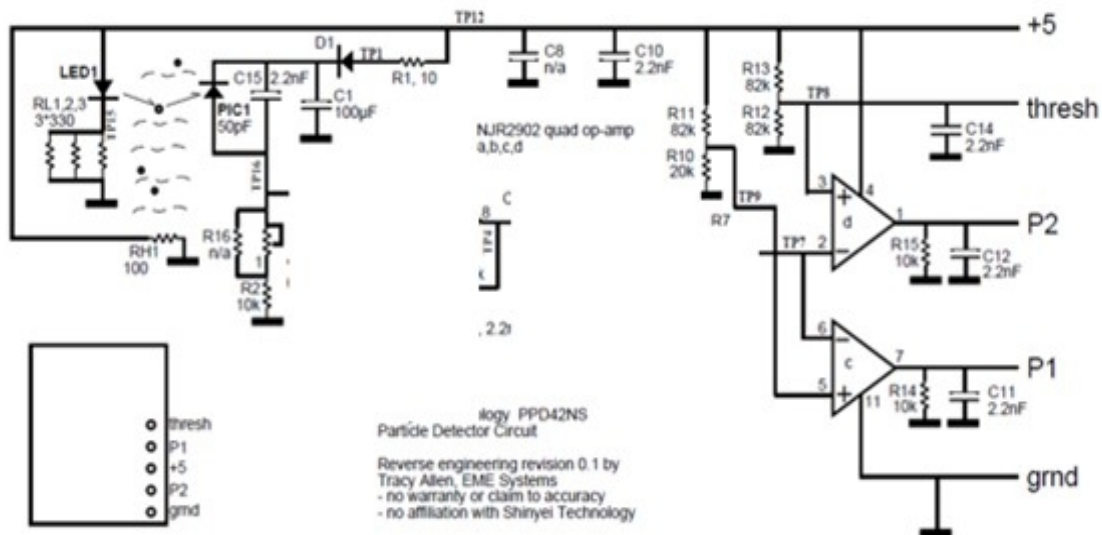


Figure 7 : Schéma partiel du capteur donné dans le sujet de TP.

La consigne donnée aux étudiants est de mener des recherches sur le circuit imprimé, de manière visuelle, en s'aidant des photos (en particulier celle éclairée par l'arrière, qui permet de "voir" sous le circuit intégré et la sérigraphie) et instrumentée afin de compléter le schéma partiel fourni. L'analyse est décomposée en 2 parties identique correspondant aux deux étages de filtrage en série pour lesquels ils doivent reconstruire le schéma original (fig. 8). Une dernière analyse correspond au filtre complet formant un filtre passe-bande dont la réponse est présentée figure 9, présentant un gain maximum de 616.6 (55.8dB) à 5.7Hz, et atténuant les fréquences en-dessous de 0.135Hz et au-dessus de 1175Hz [9].

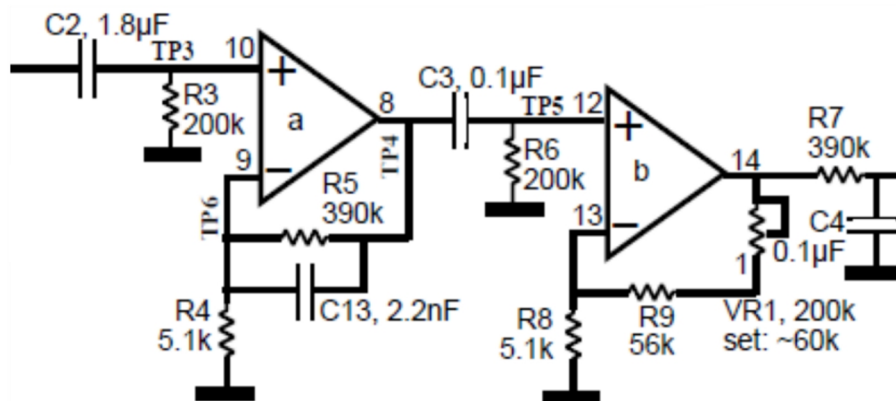


Figure 8 : Schéma du filtre à découvrir (non disponible pour les étudiants).

Le sujet guide aussi les étudiants pour l'interprétation des signaux qu'ils doivent mesurer/visualiser. Comme on peut le voir sur l'image 9, le signal brut à sortie de la photodiode présentent à la fois une amplitude utile faible ($\approx 50\text{-}100\text{ mV}$) et une composante continue importante ($\approx 1,5\text{ V}$ suivant le capteur). Ceci peut être inhabituel pour les étudiants et générer des difficultés de réglage de l'oscilloscope pour pouvoir comparer ce signal

d'entrée aux autres signaux en sortie du premier ou du deuxième filtre (fig. 10) qui ne présentent pas de composante continue.

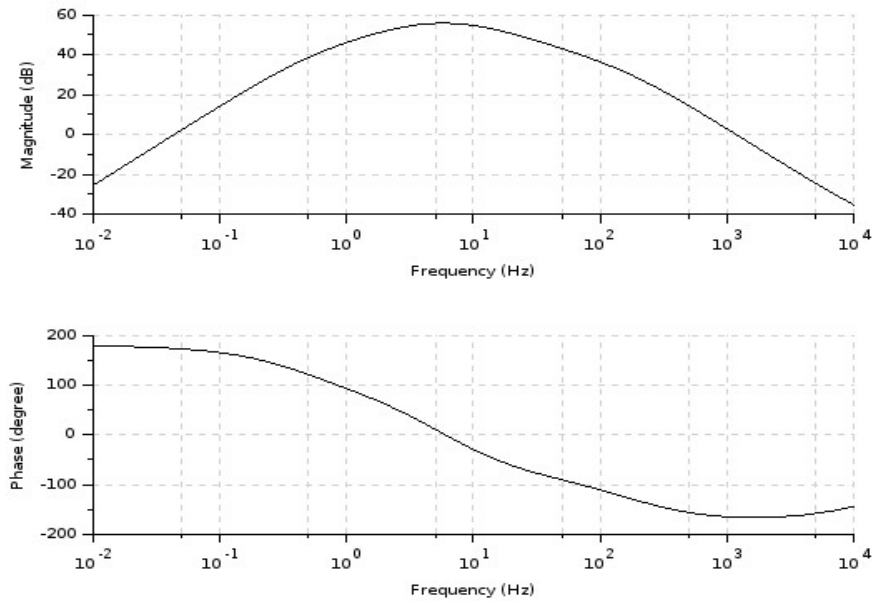


Figure 9 : Réponse du filtre complet.



Figure 10 : Ex. d'acquisition réalisée à l'oscilloscope durant le TP montrant la comparaison des signaux en sortie de la photodiode (en jaune) et à la sortie du premier passe-bande (en bleu). On peut noter des phénomènes de saturation sur lesquels l'enseignant s'appuie pour questionner les étudiants.

Ceci est cependant une compétence attendue en fin de formation. Le sujet de TP présente donc quelques courbes obtenues à l'aide d'une carte d'acquisition professionnelle dans des conditions optimales de bruit (fig. 11) pour les guider pendant la phase de réglage de l'oscilloscope. Les conditions de câblage, en particulier, ne sont en général pas d'une grande qualité lors des TP et le rapport signal/bruit s'en trouve fortement diminué, ce qui, même si c'est une réalité du terrain, ne facilite pas les mesures demandées (niveau moyen, décalages temporels, etc.).

Durant l'activité, l'enseignant suscite aussi des questionnements chez les étudiants quant aux « formes » des signaux observés, en particulier en relation avec les saturations des étages de sortie des AOP. Ceci permet de développer un certain sens critique lié aux différences entre pratique et théorie d'une part et pratique et simulation d'autre part.

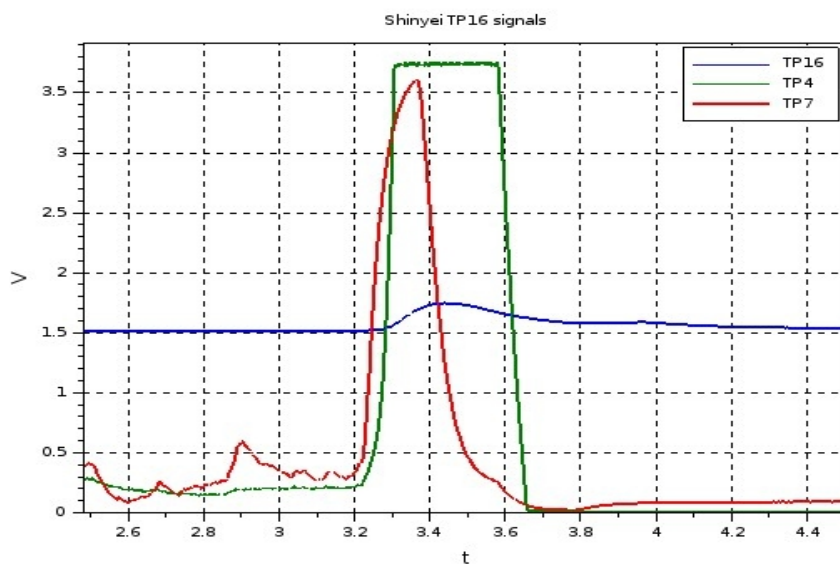


Figure 11 : Graphique de référence obtenu avec une carte d'acquisition type NI DAQ USB-6421.

La phase de reconstruction du schéma demande aux étudiants de faire certaines hypothèses pour déduire, à partir de plusieurs informations différentes, les composants utilisés par le constructeur. C'est une démarche très riche d'enseignement mais qui met les étudiants dans une situation peu habituelle. C'est principalement le cas pour le circuit intégré quadruple AOP, dont la nature et la référence leur est inconnue. Il s'agit donc pour eux de déduire, à partir de la présence de deux AOP sur le schéma, la présence de deux autres AOP dans l'étage de filtrage, et de mener des recherches sur internet pour identifier le brochage le plus probable du circuit intégré. Cette étape du processus demande un guidage de la part de l'enseignant car les étudiants ne sont pas coutumiers de ce type de démarche d'investigation.

4. Discussion

Le TP a été expérimenté avec une promotion de 29 étudiants et une évaluation exhaustive des enseignements par les étudiants est en cours. De premiers retours d'enquête ont été collectés et les résultats (n=13) montrent une acceptation assez importante avec 94% des 17 répondants qui ont trouvé l'activité plutôt ou tout à fait motivante et 88% qui pensent que cela les a aidés à comprendre certains concepts liés au cours (plutôt ou tout à fait d'accord). La méthodologie adoptée étant assez nouvelle pour eux, 25% la trouve plutôt difficile à appliquer (et 69% un peu difficile). Cela n'est pas un inconvénient, la littérature fait état d'un accroissement de la motivation lorsque la tâche demandée est exigeante mais que les chances de succès sont réelles, comme c'est le cas ici puisqu'ils sont la moitié à trouver la méthodologie plutôt ou tout à fait facile à suivre (fig. 12).

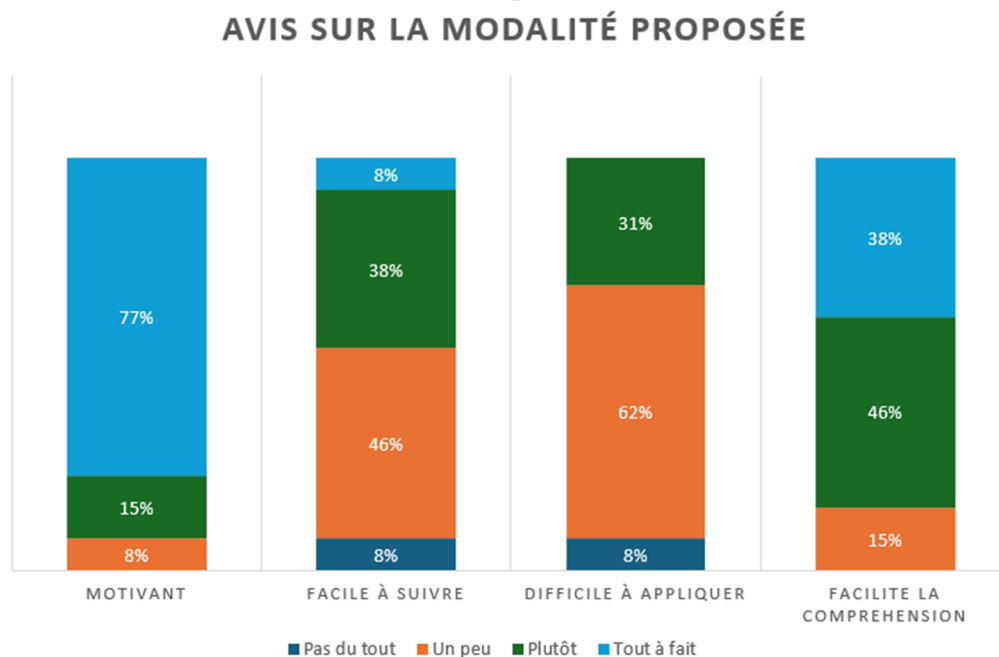


Figure 12 : Le retour des étudiants sur le TP (premier groupe de 13 étudiants).

L'avis global des étudiants sondés sur cette activité de TP AII est très positif, ils sont 94% à vouloir plus de TP de ce type. Ils considèrent en effet à 94% que la modalité proposée permet de voir une « vraie » (i.e. industrielle, sans doute) application de certains concepts vus en CM/TD et à 100% qu'ils ont pu faire des liens entre l'activité pratique proposée et les concepts du cours (essentiellement le filtrage analogique).

Tout ceci mérite cependant d'être croisé avec les résultats des étudiants dans la matière. Une évaluation de l'impact de ce type de TP sur leurs connaissances conceptuelles sera menée dans les prochains semestres pour appuyer ou non les données subjectives recueillies.

5. Conclusion

L'approche par ingénierie inverse, ou rétro-ingénierie, bien qu'étant utilisée dans l'industrie et porteuse de gains potentiels d'apprentissage, n'est pas très répandue dans l'enseignement supérieur. Certains champs disciplinaires, cependant, comme l'informatique (côté programmation), l'utilisent couramment mais pas d'une façon aussi explicite et guidée qu'il serait souhaitable pour en faire un réel outil d'apprentissage. Le TP proposé dans cette communication développé dans le cadre d'un cours d'électronique de L2 propose une application de cette méthodologie à l'électronique analogique. Basé sur du matériel bon marché, grand public, il permet aux étudiants d'analyser un circuit simple mais impliquant plusieurs concepts du cours de manière guidée au travers d'une mise en situation semi-professionnelle. Bien qu'étant encore en phase de test, ce TP a recueilli un avis favorable des étudiants en suscitant une réelle motivation que l'on sait être un levier pour l'apprentissage. D'un point de vue pédagogique, le TP permet de contribuer aux apprentissages disciplinaires mais aussi transversaux en générant de l'intérêt pour la matière chez les étudiants.

Références

- [1] J. PELLEGRINO, L. DI BELLO et S. BROPHY. « The Science and Design of Assessment Engineering Education ». In : Cambridge Handbook of Engineering Education Research. 2013, p. 571-598.
- [2] H. ELIZALDE et al. « An Educational Framework based on Collaborative Reverse Engineering and Active Learning : a Case Study* ». In : International journal of engineering education 24.6 (jan. 2008), p. 1062-1070.
- [3] M. GUERIN et al. « Caractérisation automatisée et conception de puce ». In : J3eA 23 (jan. 2024), p. 1008.
- [4] J. F. GARCIA. Un-Building Blocks : a model of reverse engineering and applicable heuristics. Déc. 2015.
- [5] D. R. K. AND. « A Revision of Bloom's Taxonomy : An Overview ». In : Theory Into Practice 41.4 (2002), p. 212-218. eprint : https://doi.org/10.1207/s15430421tip4104_2.
- [6] S. O'BRIEN et J. P. ABULENCIA. « Learning Through Reverse Engineering ». In : ASEE 2010 Annual Conference and Exposition (juin 2010), p. 15.838.1-15.838.7.
- [7] L. D. FINK. Creating Significant Learning Experiences : An Integrated Approach to Designing College Courses. Mars 2003.
- [8] M. CANU, B. GÁLVIS et M. MADELIN. « What does the Shinyei PPD42NS Low-Cost Dust Sensor Really Measure? » In : International Journal of Environmental Science and Development 12.1 (déc. 2020), p. 1-9.
- [9] M. CANU et al. « Understanding the Shinyei PPD24NS low-cost dust sensor ». In : 2018 IEEE International Conference on Environmental Engineering (EE). 2018, p. 1-10.

Biographie des auteurs

Michaël Canu : Docteur en Didactique de la Physique (Paris 7) et en Ingénierie (Los Andes), membre associé du laboratoire de didactique André Revuz (LDAR-UR4434), il exerce comme conseiller pédagogique à l'université Perpignan Via Domitia. Après avoir développé des recherches sur l'enseignement de l'automatique basée sur l'ingénierie didactique, il a été professeur associé en automatique et électronique à la faculté d'ingénierie de l'universités de

El Bosque en Colombie. Ses travaux visaient à développer des capteurs de particule innovants et des réseaux de capteurs sans fils pour cartographier la pollution atmosphérique en environnement urbain. Il a été responsable du groupe de recherche GIIE STEM+B qui travaille sur l'enseignement à l'ingénierie à tous les niveaux académiques. Il développe à l'heure actuelle des recherches en pédagogie de l'enseignement supérieur autour de l'évaluation, des communautés de pratiques et du développement professionnel des enseignants-chercheurs.

Michaël Bressan : Michael Bressan est professeur associé à l'Université de Perpignan, spécialisé en génie électrique avec un focus sur les systèmes d'énergies renouvelables. Il a obtenu son doctorat à l'Université de Perpignan en 2014, où il a développé des outils avancés de surveillance et de diagnostic de défauts pour les systèmes photovoltaïques, incluant des algorithmes pour traiter les effets d'ombrage partiel. Il a également acquis une expérience de recherche en tant que professeur assistant à l'université de Los Andes à Bogotá, Colombie, où il a coordonné le projet KIOSOL portant sur le développement d'un prototype de micro-réseau urbain intelligent à petite échelle. Ses travaux de recherche couvrent les outils pédagogiques en énergie renouvelable, les applications de l'apprentissage automatique aux systèmes photovoltaïques, l'électronique de puissance pour la recharge de véhicules électriques et la simulation ainsi que la mise en œuvre de micro-réseaux DC hors réseau en zones rurales. Auparavant, il a mené des recherches sur la modélisation solaire et la gestion optimale des flux énergétiques au LAAS-CNRS à Toulouse et a développé une expertise en systèmes embarqués chez PulsarInnovation.