

Expérimenter en équipe et à son rythme, en électronique numérique

JULIEN VILLEMEJANE

Institut d'Optique Graduate School, 2, Avenue Augustin Fresnel - 91127 PALAISEAU Cedex,
julien.villemejane@institutoptique.fr

FABIENNE BERNARD

Institut d'Optique Graduate School, 2, Avenue Augustin Fresnel - 91127 PALAISEAU Cedex,
fabienne.bernard@institutoptique.fr

TYPE DE SOUMISSION

Analyse de dispositif

RESUME

ProTIS (Procédés de Traitement de l'Information et du Signal) est un module d'enseignement en auto-apprentissage, par le biais de tutoriels en ligne, à l'attention d'étudiant-e-s de L3 et M1 en école d'ingénieurs. Les objectifs principaux de ce module sont l'appropriation d'une démarche d'ingénierie et l'acquisition de compétences techniques dans les domaines de l'électronique pour le traitement de l'information et de l'informatique embarquée. Les élèves ont pour objectif technique de concevoir et de réaliser un dispositif électronique de leur choix dans son intégralité, par équipe de 4. Chaque équipe sélectionne les fonctionnalités dont elle a besoin dans une liste préétablie et organise la collaboration entre ces membres (collaboration technique mais également liée au bon déroulement du projet). Chaque élève établit ensuite son plan de formation à la mise en œuvre d'une partie de ces fonctionnalités.

Les modalités particulières de cet enseignement permettent à chaque élève de progresser à son rythme à l'aide d'un support pédagogique original. Chaque étape est guidée par l'équipe enseignante et une évaluation détaillée des compétences acquises est mise en place. Cette approche du travail par projet a pour ambition, outre l'amélioration de l'expérience pédagogique pour les apprenant-e-s et pour l'équipe enseignante, la construction de compétences solides en vue de la mise en œuvre de projets plus complets dans des domaines connexes.

SUMMARY

ProTIS (Information and Signal Processing) is a self-learning module, using online tutorials, for 3rd year undergraduate program and 1st year master's students in engineering schools. The main objective is to acquire technical skills in information processing and embedded electronics. The students' technical objective is to completely design and set up an electronic device of their choice, in teams of 4. They select the functionalities they need from a pre-established list. Each student then establishes his or her training plan for the implementation of some of these functionalities. Each team organizes the collaboration between members (technical collaboration but also linked to the proper conduct of the project).

The particular characteristics of this pedagogy allow each student to make progress at his or her own pace with the help of an original teaching material. Each step is guided by the teaching team and a detailed assessment of the acquired skills is carried out. This new approach to project work improves the pedagogical experience for learners, who gradually become more autonomous. Consequently, they are more committed to their training and more comfortable with carrying out a more complete project in related fields

MOTS-CLES (MAXIMUM 5)

Enseignement expérimental, projets collaboratifs, électronique embarquée, supports pédagogiques innovants, rythme d'apprentissage personnalisé

KEY WORDS (MAXIMUM 5)

Experimental skills, collaborative projects, embedded electronics, innovative teaching materials, self-pace learning

1. Problématique et contexte

Le domaine des systèmes électroniques embarqués est en perpétuelle (r)évolution. On les trouve partout : téléphones portables, automobiles, robots... et pour diverses applications : pilotage à distance, capteurs intelligents, IoT...

Enseignant·e·s en école d'ingénieurs en optique et photonique, l'Institut d'Optique Graduate School (IOGS), nous avons la responsabilité du Laboratoire d'ENSeignement Expérimental (LEnSE). Nous proposons, dans ce cadre, depuis des années, une formation à la mise en œuvre de ce type de dispositif dans des applications scientifiques. Afin de dépasser les difficultés (diversité des applications, rapidité d'évolution des composants, formats divers de programmation...) de ce champ technique, nous avons construits des travaux pratiques très guidés, présentant chaque fonctionnalité progressivement. Un cours magistral et des travaux dirigés complétaient ce module en présentant le contexte technologique et industriel ainsi que des outils mathématiques utiles au traitement de l'information. Un projet expérimental par équipe concluait ce module de travaux pratiques.

Nous avons, depuis la rentrée 2017, modifié entièrement les modalités de ces enseignements afin :

- d'ajouter l'acquisition d'une démarche d'ingénierie dans les objectifs explicites d'apprentissage. C'est à la fois une source de motivation des élèves et un objectif qui, en n'étant qu'implicite dans la partie projet, était insuffisamment mis en œuvre ;

- de favoriser l'engagement des élèves dans les apprentissages car leur engagement n'était pas à la hauteur de leur motivation initiale, sauf dans le projet final ;
- d'améliorer l'appropriation des compétences, les élèves n'étaient que peu capables de reconnaître les compétences qu'ils et elles avaient acquises, en particulier lors du projet ;
- d'utiliser l'hétérogénéité des profils des élèves en organisant la coopération. En effet, malgré des profils scientifiques très proches, l'appétence et les compétences initiales dans ce domaine très technique sont variables. Et en particulier, le rythme figé des séances de travaux pratiques était une source de frustration pour les élèves.

En s'inspirant de méthodes d'apprentissage actif dans des domaines connexes (Géneveaux, 2017, Parmentier *et al.* 2018), de nouvelles formes de diffusion des savoir-faire (Bouquet *et al.*, 2017) et de diverses formations en ligne proposées pour des publics non-experts (Arduino, Raspberry Pi, OpenClassRoom...), nous avons ainsi cherché à rendre les apprentissages expérimentaux plus efficaces, plus agréables, plus enthousiastes, à la fois pour les apprenant·e·s et les encadrant·e·s. Nous avons focalisé l'apprentissage sur la démarche de conception puis de mise en œuvre de ces systèmes, en délaissant les cours magistraux et les travaux dirigés. Nous proposons une solution totalement en ligne afin de permettre une meilleure gestion de l'hétérogénéité au niveau de l'apprentissage de ces notions (voir aussi : Camel *et al.*, 2017).

2. ProTIS : expérimenter en équipe et à son rythme, en partageant les compétences

2.1. Objectifs pédagogiques, prérequis et évaluation

Ce module d'adresse à des élèves de L3 et M1 en école d'ingénieurs. Les élèves, à l'issue de ce module de formation sont capables de concevoir, de mettre en œuvre et de documenter un dispositif électronique de traitement de l'information associant électronique analogique et électronique numérique embarquée.

Pour acquérir ces compétences, les élèves se fixent un objectif technique : concevoir et réaliser un dispositif électronique de leur choix dans son intégralité, par équipe de 4 et ce en 40h. Des exemples de dispositifs, réalisés ces deux dernières années, sont présentés sur la figure 1.

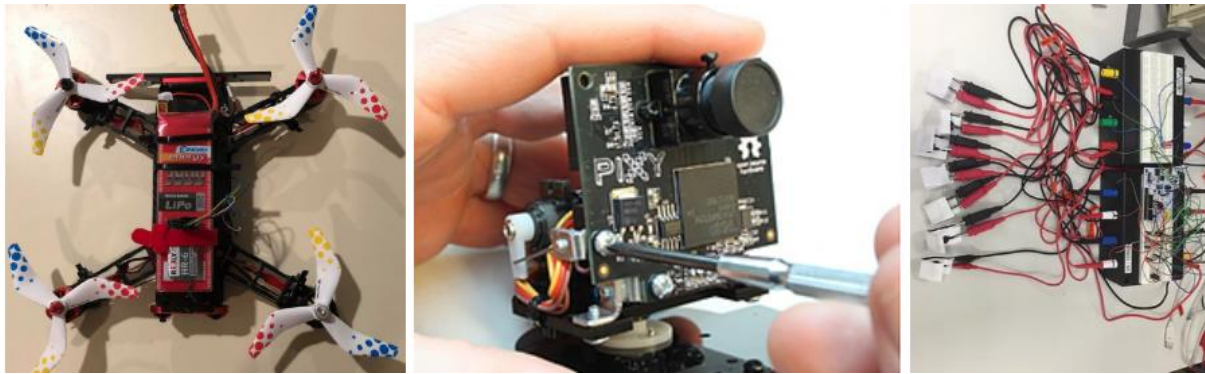


Figure 1 - Exemples de projets réalisés durant les deux dernières années : (a) Commande d'un drone volant pour se déplacer entre deux points dans l'espace ; (b) Stabilisateur d'images prises par une caméra (livrables de fin de projet : tullioarnaud.wixsite.com/protis-stabibi) ; (c) Clavier MIDI dessinable et transportable partout (livrables de fin de projet : pierrelottigier.wixsite.com/drawtone)

Les compétences acquises sont évaluées par :

- la qualité de livrables fournis par chaque équipe (documentation technique et support de présentation),
- les performances obtenues dans la mise en œuvre d'un dispositif lors d'un test individuel,
- la progression en efficacité du travail d'équipe, suivie par l'équipe enseignante,
- la progression personnelle de chaque membre de l'équipe.

Les objectifs d'apprentissages plus détaillés peuvent être décrits autour de deux pôles :

- Compétences scientifiques et techniques :
 - concevoir et mettre en œuvre un dispositif électronique de traitement de l'information associant des fonctions analogiques et numériques embarquées :
 - choisir une solution analogique adaptée à un cahier des charges pour la mise en forme et le filtrage de signaux provenant de capteurs ;
 - utiliser une carte de prototypage numérique (langage de haut niveau), incluant un microcontrôleur
 - piloter un système de puissance (type éclairage à LED ou moteur électrique de faible puissance)
 - caractériser les fonctionnalités d'un dispositif électronique et en valider les performances,
- Compétences en travail collaboratif et présentation scientifique
 - mettre en place des outils partagés de travail collaboratif
 - coordonner les tâches
 - partager les documents de référence

- réaliser des documents techniques permettant de reproduire intégralement le système (schémas électriques, algorithmes et programmes complets...) ainsi que les tests associés à la validation des performances
- présenter des résultats et une démarche scientifique à un public non-expert.

2.2. Enseignement expérimental “A la carte”

L’enseignement des procédés de traitement de l’information et du signal (ProTIS) est intégralement guidé par la pratique. Le travail est réalisé sur un rythme hebdomadaire, en 9 séances de 4h30. Chaque séance est encadrée par 2 enseignant·e·s pour 25 élèves environ. Une salle de travaux pratiques, aménagée avec des composants accessibles en libre-service et du matériel de laboratoire, accueille les équipes sur 16 postes de travail. Une salle annexe permet la réalisation d’éléments mécaniques (découpe laser, impression 3D...).

Nous avons décidé d’utiliser des cartes *Nucleo* de la société *STMicroelectronics*, comme support d’apprentissage. C’est la seule contrainte matérielle que se voient imposer les équipes, elles ont alors toute liberté d’utiliser la gamme de composants disponibles. Elles disposent également d’un budget permettant l’achat de modules supplémentaires (capteurs, actionneurs, supports mécaniques, ...).

2.2.1. Une première séance pour définir les problématiques, les équipes, les plans de formation

La première séance débute par la prise en main de la carte de prototypage, nouvelle pour les élèves, afin de les familiariser avec les fonctionnalités de base. 1h30 environ est consacrée à cette phase de prise en main.

Un temps d’échange (d’une durée de 1h00 environ) est ensuite organisé afin de faire émerger des problématiques d’intérêt pour les élèves. Les problématiques choisies sont très souvent liées à la vie quotidienne (par exemple : être réveillé en douceur, sécuriser les déplacements à bicyclette par un éclairage intelligent...). Des problématiques scientifiques sont parfois abordées (réaliser un spectromètre à réseau à bas coût...). Les équipes se forment lors de ces discussions, chacune autour d’une problématique qui lui est propre. Les différentes idées sont validées par l’équipe enseignante, par une étude rapide à la fois de la faisabilité et de l’intérêt pédagogique du projet.

Puis, à partir de cette problématique, chaque équipe prépare un cahier des charges du dispositif qu’elle se propose de réaliser, incluant les différentes fonctionnalités qu’il devra intégrer. Définir les fonctionnalités du dispositif (par exemple : mesurer une température, comparer la

valeur mesurée à une valeur seuil, déclencher une alarme sonore...) est une étape très importante car la liste de fonctionnalités visées va guider et motiver les apprentissages techniques qui vont suivre.

Chaque équipe fait en effet la liste des compétences techniques dont elle a besoin parmi un inventaire fourni sous forme de carte (représentée sur la figure 2).

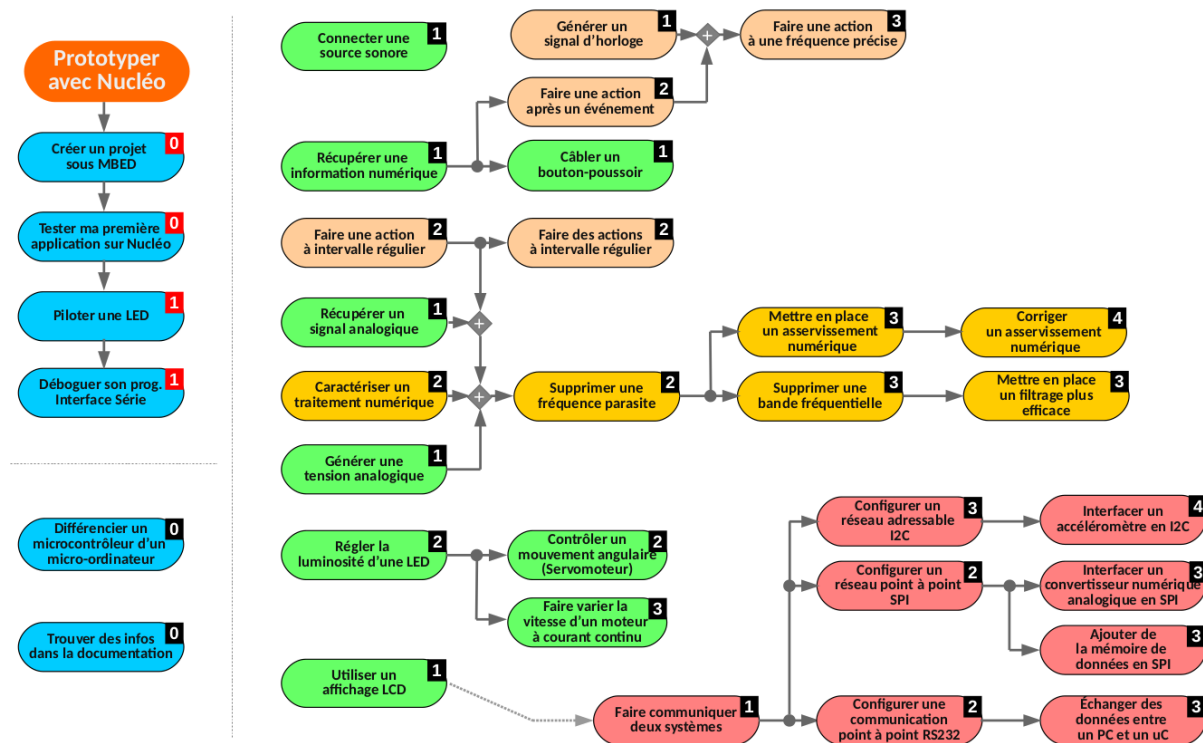


Figure 2 - Cartographie des fonctionnalités/compétences proposées à la formation. Chaque bulle représente une fonctionnalité visée pour le prototype qui est ensuite reprise à travers un tutoriel en ligne (disponible sur la page suivante : lense.institutoptique.fr/nucleo/). Ces fonctionnalités sont liées les unes aux autres comme certaines étant des prérequis indispensables pour les suivantes. Les numéros inscrits à côté de chacune de ces bulles représentent le niveau de difficulté des notions abordées et de leur mise en œuvre.

La dernière étape de cette première séance consiste alors à construire le partage des compétences visées entre les différents membres de l'équipe. Ce partage pourra évoluer au cours du projet en fonction de l'avancement dans la réalisation, des besoins et des envies changeantes des membres de l'équipe.

2.2.2. Des apprentissages "à la carte"

Au cours des huit séances suivantes, chaque élève réalise des expérimentations et recherche des informations afin, en premier lieu, d'acquérir les compétences identifiées dans son plan personnel de formation. Ensuite, chaque équipe met à profit les compétences de ses membres dans la construction coopérative du prototype. L'équipe rédige aussi les documentations

techniques et organise à son gré le partage du travail (individuel, en binômes, en équipe) en suivant son propre planning.

Pour chaque compétence repérée sur la figure 2, l'équipe enseignante a construit un tutoriel accessible en ligne (lense.institutoptique.fr/nucleo/). Les élèves piochent dans ces tutoriels la démarche et les informations dont ils et elles ont besoin. Ces tutoriels regroupent à la fois des briques élémentaires de programmation et des schémas de câblage, mais rappellent également les éléments théoriques indispensables à la bonne compréhension des notions nouvelles à acquérir. Les tutoriels en ligne remplacent donc les traditionnels "énoncés de TP" et accompagnent les élèves dans l'obtention d'une nouvelle compétence, à la fois sur l'aspect théorique et sur l'aspect pratique. Les tutoriels sont accompagnés systématiquement des prérequis nécessaires, des objectifs visés et de QCM d'auto-évaluation, permettant aux élèves de se poser les bonnes questions vis-à-vis des notions abordées et de leur mise en œuvre pratique.

Certaines compétences, non prévues dans la gamme initiale de tutoriels, font l'objet de nouveaux supports en ligne, rédigés conjointement par l'équipe enseignante et les élèves.

2.2.3. Un apprentissage par projet, très structuré

La liberté des élèves dans le choix du cahier des charges, du rythme d'apprentissage et des compétences visées est une première caractéristique de ces enseignements. De plus, le travail collectif, la réalisation d'un prototype et l'acquisition de compétences d'organisation permettent de définir ces enseignements comme des projets (Perrenoud, 2002 et Reverdy, 2013). L'originalité de ce module réside dans les jalons donnés par l'équipe enseignante et dans la nature des ressources pédagogiques mises à disposition.

En effet, pour que ces heures de projet ne se limitent pas à du « bricolage », les enseignants doivent régulièrement solliciter les équipes afin qu'elles construisent et structurent leur travail et que chaque élève prenne le temps d'analyser ses compétences.

Pour cela, nous avons mis en place un planning précis de rendus de livrables intermédiaires (schématisé sur la figure 3). Un examen pratique individuel (1h) est aussi organisé à mi-parcours. A cette occasion, chaque élève est invité à préciser quelles compétences techniques il ou elle pense avoir acquises et le sujet de l'examen est choisi afin de valider ces apprentissages.

Le livrable final est constitué de deux parties : un rapport technique et un document de présentation scientifique, ce dernier pouvant prendre la forme au choix d'un poster, de pages

d'un site internet ou d'un montage vidéo (voir quelques exemples dans la figure 1, ainsi que des liens vers certains livrables finaux).

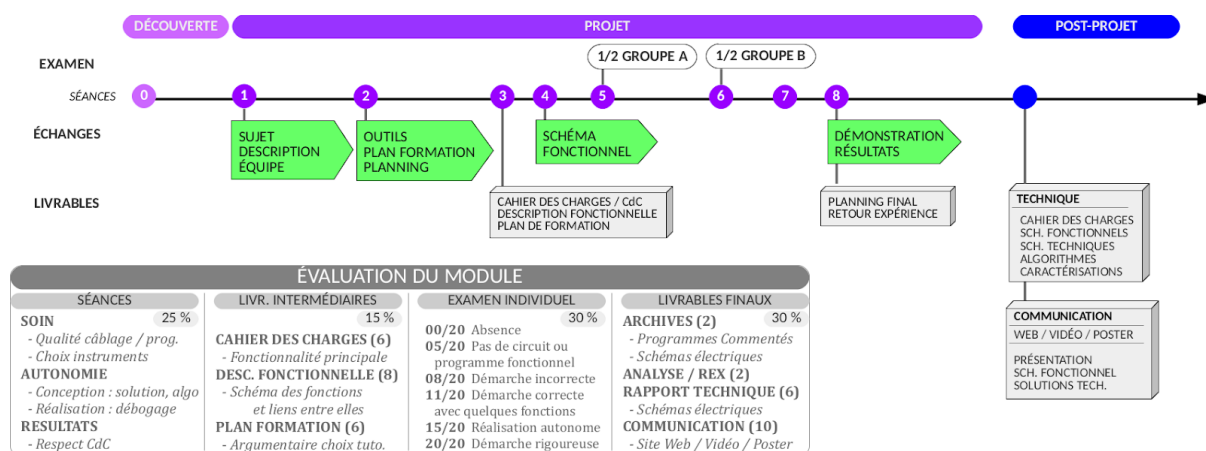


Figure 3 - Déroulement chronologique pour les étudiants et modalités d'évaluation du module. Au cours des différentes séances, des échanges sont prévus entre l'équipe enseignante et les groupes de projet sur des thèmes mentionnés dans les cadres en forme de flèche. La démarche projet est évaluée également par la mise en forme de livrables.

3. Analyse, apports et prise de recul

Le test de cette nouvelle approche a été réalisé l'année dernière avec une première promotion de 66 étudiant·e·s, réparti·e·s dans 3 groupes. Nous avons alors pu suivre l'évolution de 18 projets en parallèle et ainsi pu collecter leurs retours d'expérience et comparer leur ressenti à celui des 6 encadrant·e·s. Les enseignements sont systématiquement évalués par les élèves par le biais de questionnaires semestriels, qui incluent des critères (forme et contenu des supports, méthode de formation...) évalués selon 4 niveaux (totalement en accord, plutôt en accord, plutôt en désaccord et totalement en désaccord) et des commentaires libres. Nous avons, en plus, pour ce nouveau format d'apprentissage demandé à chaque équipe un bref retour écrit sur leur propre expérience.

3.1. Validation de l'appropriation des outils, de compétences techniques nouvelles et de cette méthode d'apprentissage

La méthode proposée, alliant une ambition de groupe à un rythme personnalisé d'apprentissage, semble avoir convaincu la majorité des élèves. Il est particulièrement intéressant de noter que sur les 26 commentaires laissés par les élèves dans les questionnaires d'évaluation (54 réponses pour 66 élèves sondé·e·s), aucun ne mentionnait un problème de prise en compte de l'hétérogénéité ou un manque de coopération dans une équipe. 90% des élèves ont également répondu être en accord (totalement ou partiellement) sur le fait que le mode "tout-projet" permet d'améliorer l'efficacité des apprentissages.

On peut également illustrer l'engagement des élèves dans leur formation et dans leur projet par la citation suivante d'une équipe : « *Les tutos "à la carte" couplés à un projet que nous proposons donnent une grande motivation pour prendre part à ce projet. Nous avons chacun pris plaisir à apprendre et avons ainsi pu produire un travail conséquent. Ce format permet également d'apprendre par nous-même, et ce en dehors des heures dédiées au projet. Cette "autonomie aiguillée" est une grande force pour le projet.* »

Les tutoriels en ligne, ainsi que les supports papiers (cartographie des fonctionnalités - figure 2 - déroulement chronologique - figure 3...) distribués au cours des séances, sont également considérés par plus de 90% des interviewé·e·s comme de bonne qualité et permettant de s'approprier des compétences techniques et scientifiques indispensables au bon avancement du projet. Ces chiffres peuvent être également complétés par le retour d'un autre groupe de projet : « *La séance 0 permet de bien comprendre les enjeux et les attentes concernant le projet. L'idée de faire un brainstorming en classe a permis de faire remonter de nombreuses idées intéressantes. Le choix du sujet et du groupe étant libre, cela permet de choisir un sujet qui nous plaît et dans lequel on a envie de s'investir. Les tutoriels accessibles en ligne sont très bien conçus, clairs et assez divers pour convenir à tous les types de projet. La progression des tutoriels est logique.* »

3.2. Moindre appropriation des compétences en travail collaboratif et fortes exigences en encadrement

D'après les résultats des questionnaires d'évaluation, les compétences acquises en travail collaboratif en présentation scientifique ne sont pas appréciées à leur juste valeur par les élèves. Seulement 70% des élèves interviewé·e·s estiment que ces notions sont indispensables à l'élaboration d'un bon projet. Certains commentaires ajoutent même que les livrables ou les QCM d'auto-évaluation sont des freins au projet !

Afin d'éviter que l'intérêt des élèves ne reste ainsi trop centré sur les apprentissages techniques, nous souhaitons modifier notre discours afin de mieux mettre en valeur le côté « professionnel » de ces apprentissages que les élèves jugent encore trop annexes.

L'évolution d'un enseignement classique vers cette forme d'apprentissage soulève également une autre difficulté : le rôle des encadrant·e·s change et cela peut perturber un peu les élèves. En effet, la description et l'analyse des différents points de passage d'un sujet de travaux pratiques sont remplacées par une expertise « à la demande ». Et cette expertise est moins technique, elle doit guider la démarche d'ingénierie, sans l'assurance que le projet aboutira. De

QPES – (Faire) coopérer pour (faire) apprendre

plus, toutes les séances n'étant pas encadrées par les mêmes enseignants, les élèves se voient proposer des pistes de réflexion parfois différentes, loin du discours unique habituel.

Cela nécessite alors une bonne coordination de l'équipe pédagogique, via un suivi régulier des projets et le partage des informations. Nous avons de plus mis en place cette année une journée de formation en amont de l'équipe enseignante à ces nouvelles modalités afin de mieux répondre à cette difficulté.

Il est important de noter que l'approche « tout-projet » avec des sujets libres impose un support technique et logistique performant et organisé, prenant part intégrante à l'équipe encadrante. Le « tout en ligne » (supports pédagogiques sous forme d'un site web et compilateur en ligne) nécessite en outre un accès fiable à internet.

3.3. Une méthode à fort potentiel d'évolution et basée sur des outils libres ou facilement exportables/transposables

Initialement construits pour un module d'enseignement particulier, les tutoriels en ligne et les modalités d'apprentissage se révèlent facilement exportables. La carte de prototypage elle-même ainsi que les composants de base à lui associer sont de faible coût et les tutoriels sont en accès libre.

Ainsi une collaboration avec des collègues tunisiens pour l'utilisation des mêmes supports pour l'enseignement de l'électronique embarquée et du traitement du signal est en cours. Cette collaboration a été initiée lors d'un workshop du Collège franco-tunisien pour les sciences expérimentales (convention signée entre 4 universités tunisiennes et l'ENS Paris-Saclay en février 2018).

La gamme de tutoriels en ligne a par ailleurs pour vocation de s'étoffer au fur et à mesure des expériences menées dans les différents établissements.

4. Conclusion

Cette approche du travail par projet a pour ambition, outre l'amélioration de l'expérience pédagogique pour les apprenants et pour l'équipe enseignante, la construction de compétences solides en vue de la mise en œuvre de projets plus complets dans des domaines connexes à la photonique. L'équipe enseignante voit son rôle évoluer passant du simple « conteur » de notions importantes à un véritable expert, à la fois pour les aspects scientifiques et pour la démarche d'ingénierie.

5. Remerciements : coopérations et collaborations

Cette nouvelle forme d'apprentissage mise en place à l'IOGS n'aurait pu être mise en place sans la participation particulièrement efficace de Thierry Avignon et Cédric Lejeune, du service technique de la plateforme de travaux pratiques (Laboratoire d'Enseignement Expérimental - LEnsE). Ce travail a également profité de la collaboration de tous les membres de l'équipe pédagogique. Henri Benisty (Professeur à l'IOGS) et Pierre Godet (doctorant-enseignant ONERA-IOGS) ont tous deux relevé le défi de la mise en place de ces nouveaux enseignements. Fabien Adam, enseignant à l'Ecole Normale Supérieure Paris-Saclay, a contribué à la mise en place des précédentes formes expérimentales d'enseignement dans le domaine des systèmes embarqués et temps réel. Ses interventions ont eu lieu dans le cadre d'une convention de collaboration entre établissements (ENS Paris-Saclay et IOGS) Son retour d'expérience sur d'autres essais mis en place dans le cadre de projets étudiants a été un atout pour proposer des contenus pertinents. Une partie de la rédaction et des tests des tutoriels a profité du travail réalisé en stage par un élève de l'IOGS, Arthur Gautheron.

Références bibliographiques

- Génevaux, J.-M. (2017). Méthodes C.R.A.I.E.S (Coopérons à notre Rythme d'Apprentissage individuel Efficace et Sympathique), Ceintures et Graphe des compétences. Ecole thématique. Canada. (hal.archives-ouvertes.fr/cel-01593187)
- Camel, V., Peyrat, J.-F., Cladière, P. et al. (2017). Gérer l'hétérogénéité en situation expérimentale grâce au numérique ? *Actes du IXe colloque Questions de Pédagogies dans l'Enseignement Supérieur (QPES)*, 161-168.
- Bouquet, F., Bobroff, J., Fuchs-Gallezot, M. et al. (2017). Enseignement par projets en TP de physique avec le microcontrôleur Arduino. *Actes du IXe colloque Questions de Pédagogies dans l'Enseignement Supérieur (QPES)*, 305-312.
- Parmentier, J., Février, T., Virouleau, A., Lecureux, J., Lejeune, G., Lelièvre, S., (2018) « A son rythme : permettre aux élèves d'avancer à leur rythme ». (www.villebon-charpak.fr/project/a-son-rythme)
- Perrenoud, P. (2002). Apprendre à l'école à travers des projets : pourquoi ? comment ? Université de Genève. (www.unige.ch/fapse/SSE/teachers/perrenoud/php_main/php_1999/1999_17.html)
- Reverdy C. (2013). Des projets pour mieux apprendre ? *Dossier de veille de l'IFE*. (hal.archives-ouvertes.fr/hal-01657236)