Retro-engineering : un exemple de démarche pédagogique ?

H. BEN AHMED, F. OUCHET, S. GARDETTE, R. LE GOFF LATIMIER
ENS Rennes, Département Mécatronique (benahmed@ens-rennes.fr)

Résumé : Dans cette contribution, il s'agit de partager notre expérience accumulée depuis 8 ans et de décrire un support pédagogique que nous avons mis en place au Département Mécatronique de l'ENS Rennes dans le cadre des enseignements par projet. Ce support est basé sur l'approche par Reverse Engineering d'objets mécatroniques industriels et commercialisés. L'approche proposée consiste en une analyse scientifique et technologique réalisée par des élèves de 1ère année (niveau L3) sur des objets existants et devant mener à la compréhension des phénomènes physiques mis en œuvre et à la justification partielle des choix technologiques effectués. Le but de cet article est de décrire cette approche, le modèle d'encadrement pédagogique adopté et les modalités d'évaluation des élèves. A titre d'illustration, nous donnerons également quelques exemples de supports utilisés et les travaux associés effectués par les élèves.

1. Introduction

L'enseignement par projet semble être une voie incontournable de l'enseignement aujourd'hui. Ce concept d'enseignement par projet existe dans de nombreuses écoles et universités de l'enseignement supérieur mais la mise en pratique diffère largement selon les établissements. L'Ecole Normale Supérieure de Rennes (évolution de l'Antenne de Bretagne de l'ENS Cachan au 1er janvier 2014) propose dans le cursus du département mécatronique une formation par projet déclinée selon plusieurs modules.

Les élèves intègrent l'ENS Rennes principalement à l'issu d'un cycle préparatoire aux grandes écoles (concours ouvert aux filières PSI et PT) ou sur dossier pour tous les élèves justifiant au moins d'un niveau équivalent à un L2. Tous les élèves suivent pendant les deux premières années un double cursus mécanique et ingénierie électrique chacun sanctionné par un diplôme universitaire de L3 et M1. La troisième année consiste principalement à la préparation du concours externe de l'agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur (délivrant un diplôme de M2 mention Formation à l'Enseignement Supérieur). Au cours de leur quatrième année, les élèves sont essaimés dans les universités et grandes écoles françaises et européennes afin de choisir leur spécialité de recherche (M2 avec stage de recherche) et continuer, pour la majorité d'entre eux, leurs études du troisième cycle (doctorat).

L'apprentissage de la mécatronique et plus généralement des sciences technologiques permet facilement de rendre l'élève acteur de leur formation. De nombreux objets technologiques alliant mécanique et électricité sont habituellement utilisés par nos élèves cherchant naturellement à comprendre et reproduire leur fonctionnement.

La formation proposée répond à la problématique suivante : quelles sont les compétences requises pour modéliser fidèlement le comportement, concevoir et dimensionner des objets de la mécatronique. Dès la première année du cursus mécatronique (existant depuis 2006-2007), l'élève est acteur de son savoir et doit mettre en œuvre ses compétences dans plusieurs modules de projet.

Au cours du premier semestre de L3 (S5), l'approche par projet est exclusivement portée sur l'étude de systèmes industriels existants par le module « Analyse de Systèmes Mécatroniques » (ASM). Le second semestre de L3 (S6) est l'occasion d'acquérir les techniques de conception et de faire de premières réalisations dans le module « Conception d'un Composant Mécatronique » (CCM). Les deux semestres de l'année de M1 permettent d'approfondir la conception et réalisation dans le module « Conception d'un Système Mécatronique » (CSM).

Ces trois modules adoptent une démarche progressive à la fois en termes d'autonomie des élèves, de complexité des notions abordées et d'étendue du travail demandé.

Ce papier présente principalement le premier module-projet dénommé « ASM » pendant lequel les élèves étudient, analysent et modélisent le comportement d'un système complet industriel et commercialisé.

2. Objectifs pédagogiques

Les différentes formations dont sont issues nos élèves (CPGE et formations universitaires) apportent toutes les bases de sciences de l'ingénieur nécessaires à la compréhension des concepts fondamentaux. Des disparités existent sur les élèves recrutés sur formations universitaires (pour la plupart exclusivement orientées électricité ou mécanique) ou sur la filière PT (jusqu'à présent majoritairement axée sur la mécanique).

Le fil conducteur de cette UE est de faire découvrir à tous les élèves le concept de mécatronique : étudier un même objet aussi bien sous ses aspects mécaniques et électriques. La compréhension du fonctionnement du système requiert des notions fondamentales telles que l'énergie, le signal, la physique, le contrôle, la fabrication, les matériaux…

Le premier objectif est de permettre aux élèves d'acquérir une certaine autonomie intellectuelle et organisationnelle : ils décident de la démarche à suivre, de la nature et de l'étendue des caractérisations sur le système mécatronique. Dans la pratique, ils avancent des hypothèses puis les valident ou de les infirment par des simulations, des calculs simplifiés ou des expérimentations.

Le second objectif concerne la recherche d'informations techniques sur les constituants internes du système et la validation de leurs caractéristiques en regard des performances du système complet. Cette phase de recherche technique permet également la comparaison du système étudié par rapport à ses concurrents.

Le troisième et dernier objectif est le partage et le transfert des connaissances acquises. Le travail réalisé, les résultats obtenus et la démarche expérimentale sont synthétisés dans un rapport technique dont le nombre de pages est volontairement limité puis par une soutenance orale devant un public d'élèves et un jury.

3. Modalités de mise en œuvre

Le module se déroule sur neuf séances de quatre heures chacune, les élèves ont aussi la possibilité de manipuler en dehors des créneaux initiaux.

La première séance est consacrée à la présentation du fonctionnement de cette UE, de ses objectifs et des modalités d'évaluation des élèves. Lors de cette première séance, les objets ou supports sont succinctement présentés aux élèves. Chaque binôme se positionne sur un support souhaité (ils sont tous différents) en concertation avec ses collègues en cas de « conflits ».

Les supports sont alors remis aux élèves ainsi que la documentation technique éventuelle. Notons à ce stade que les objets sont nécessairement commerciaux et en vente au « grand public ». Les documentations sont celles du constructeur. Aucun document de type « texte de TP » n'est remis aux élèves.

L'élève réalise ses expérimentations sur le plateau technique du département en relation avec l'équipe pédagogique (composée d'enseignants et d'enseignants-chercheurs) et le support technique (ingénieurs et techniciens du département). L'élève a à sa disposition du matériel de caractérisation, de conception et de prototypage en électricité/électronique et en mécanique.

Au premier abord, la liberté opérationnelle déroute grandement les élèves, habitués à manipuler dans le cadre d'expérimentations guidées. L'encadrement de ces séances mérite ici d'être précisé. En effet, il ne s'agit pas d'un encadrement de type stage mais plutôt d'une assistance scientifique et technique. Les enseignants sont présents tout le temps des séances. L'initiative est laissée aux élèves. La proposition d'une problématique à identifier/mesurer, l'identification des paramètres d'intérêt, le choix de la méthode de mise en évidence (modélisation formelle, numérique ou expérimentale), le protocole de mesure, le besoin en matériel sont laissés sous la responsabilité des élèves. Les enseignants corrigent, formulent des questionnements, voire suggèrent des orientations.

L'aspect organisationnel est également laissé aux élèves. Ces derniers doivent définir pour chaque séance le programme à réaliser et les objectifs à atteindre. Ils doivent également anticiper les besoins en matériel et en instrumentation. Les enseignants corrigent, si besoin, leurs choix notamment en termes de pertinence mais aussi en termes de faisabilité technique ou économique.

En dehors des séances prévues, les élèves peuvent échanger sur la plateforme pédagogique de l'école[1] construite autour d'un Moodle. Ces échanges sont l'occasion de formaliser une demande de matériel spécifique à l'étude ou de présenter leur démarche expérimentale et les résultats obtenus en vue d'obtenir un retour ou une explication de la part des enseignants.

Les systèmes peuvent être réutilisés plusieurs années de suite et les rapports des années précédentes sont alors mis à disposition sur cette plateforme pédagogique. Les élèves peuvent alors réutiliser les résultats dans leurs études mais aussi faire preuve

1 http://edu.ens-rennes.fr/

d'originalité dans leurs expérimentations afin de se démarquer des résultats déjà établis.

4. Modalité d'évaluation

L'évaluation est basée sur trois grands axes évaluant respectivement les trois objectifs précédemment présentés :

- Une note de contrôle continu est attribuée sur la méthodologie d'analyse du système : la démarche expérimentale, la prise d'initiative et l'autonomie des binômes sont sanctionnés par l'équipe pédagogique.

- Le rapport rédigé par chaque binôme présente chaque système, les protocoles d'études et les résultats obtenus. Ils sont relus par plusieurs enseignants et enseignants-chercheurs dont certains n'ont pas participé à l'encadrement des séances ; ce regard extérieur se base sur les critères classiques de présentation d'analyse et de présentation des résultats scientifiques. Les explications fournies dans le rapport doivent être synthétiques et permettre de comprendre le fonctionnement du système.

- Les élèves soutiennent leur travail et répondent aux questions devant un jury et un public constitué d'autres personnels du département et éventuellement d'autres élèves. Cet exposé dure environ quinze minutes et est suivi d'une période d'échange avec le jury et le public pendant environ quinze minutes. L'évaluation porte principalement sur la forme de la présentation et la pertinence des réponses aux questions du jury. Les évaluations du rapport et de la présentation sont basées sur :

- Démarche scientifique d'analyse (modélisation, expérimentation avec la précision des objectifs et l'analyse de résultats obtenus)
- Justification du contexte fonctionnel de l'objet et positionnement par rapport à d'autres solutions existantes
- Mutli-disciplinarité, voire Inter-disciplinarité
- Analyse suffisante des points d'intérêt

5. Exemples de supports

Dans ce qui suit, afin de donner un aperçu du travail réalisé par les élèves et les objets supports utilisés, nous donnerons de manière non exhaustive quelques exemples de travaux, extraits des rapports de certains élèves.

5.1. Aspirateur ROOMBA

L'aspirateur Roomba est un robot autonome capable de nettoyer le sol sur une certaine zone. Il a été conçu en 2002 et s'est démocratisé assez rapidement en quelques années, avec plusieurs millions d'exemplaires vendus dans le monde.



Figure 1 : *Photo du Roomba*

Sur la figure 2 sont montrés le système d'entrainement, le dispositif de nettoyage, l'accumulateur ainsi que certains capteurs. Cela correspond à une première analyse réalisée par les élèves des diverses fonctions présentes dans le Roomba : références des composants, caractéristiques nominales, principe physique de fonctionnement, réalisation/matériaux,….

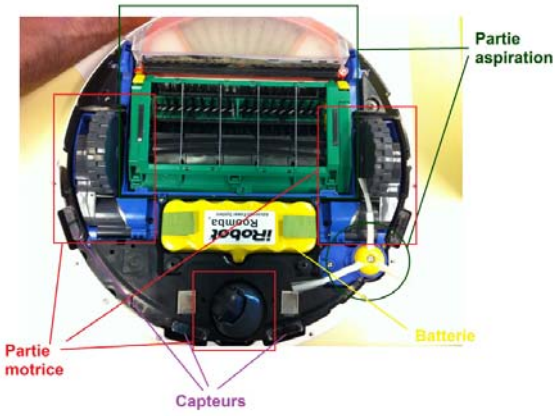


Figure2 : *Photo du dessous du Roomba*

Le Roomba est un véritable système mécatronique intégré. Sur la figure ci-dessous est représentée la chaine d'information et d'énergie.

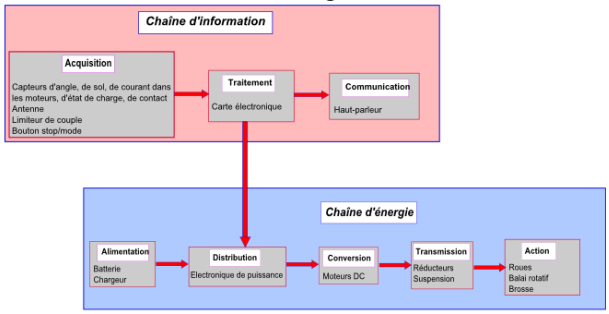


Figure 3 : *Chaînes d'information et d'énergie du système*

Capteurs : Toute une série de capteurs est placée à l'avant du robot Roomba. Premièrement, des capteurs angulaires sont répartis sur le demi-cercle avant de l'appareil. Ces capteurs correspondent à six couples de LED, une noire et une blanche, qui émettent dans l'infrarouge à travers une visière qui se situe le long de ce demi-cercle sur le carter avant. Il y a également des

capteurs de contact (les pattes en plastique sur les côtés et les pattes en métal sur l'avant) afin de détecter les chocs. Enfin, une antenne située à l'avant permet de recevoir le signal du chargeur de batterie, mais nous soupçonnons également qu'elle participe à la détection des obstacles. En effet, nous nous sommes livrés à une petite expérience : nous avons recouvert une surface verticale de tapis noir (non détecté par les capteurs), afin de déterminer la zone d'espace dans laquelle un obstacle est détectable. Successivement, nous réduisions la surface de tapis et lancions le robot dessus afin de voir s'il détectait les bords, sachant que lorsqu'il détecte un obstacle, il ralentit à son approche. Nous sommes arrivés à la conclusion que l'espace en question avait comme largeur 16,5 cm et comme hauteur 4,5 cm, soit exactement la position de l'antenne par rapport au sol.

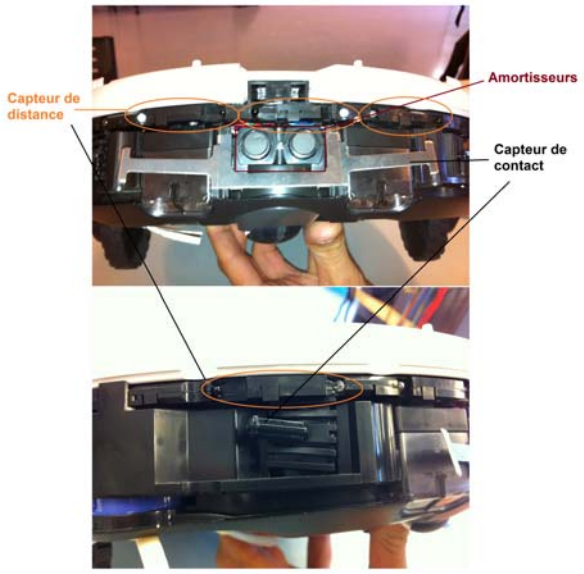


Figure 4 : Capteurs

Analyse fonctionnelle : Concernant les analyses fonctionnelles ou opérationnelles, les élèves peuvent s'intéresser en particulier aux stratégies implémentées pour la réalisation de la tâche principale.

Parmi toutes les expériences qu'il nous semblait intéressantes à mener, les élèves se sont intéressé à la notion d'efficacité temporelle de nettoyage. Autrement dit, quelle est l'évolution temporelle de la surface nettoyée ?
Afin de faire des études comparatives, on s'est donc donné une surface sur laquelle tous les essais ont été effectués. Cette surface est rectangulaire, formée par quatre tables disposées sur leur tranche (cf. figure 5).
Le relevé automatique de la surface balayée est réalisé à l'aide d'une caméra.
Nous avons fixé une webcam ainsi qu'un éclairage sur une barre de métal surélevée par rapport à la surface de travail considérée. Il a fallu poser le dispositif d'observation sur des tables adjacentes à celles formant l'enclos afin que l'angle de la caméra ne soit pas limitant dans l'étude du parcours du robot. La surface de l'enclos est alors complètement visualisable. Un script Simulink fourni nous permet dès lors, via quelques réglages des paramètres de détection, de détecter les couleurs primaires sur une vidéo, et donc la position d'un point de couleur sur une vidéo.
On a de ce fait choisi d'utiliser des bouts de scotch de couleur, quitte à en disposer plusieurs côte-à-côte pour améliorer la détection par la caméra, et qu'on a placés sur la surface du robot pour repérer son positionnement sur le sol et sa direction. Le paramétrage est particulièrement sensible et nécessite de nombreuses itérations.

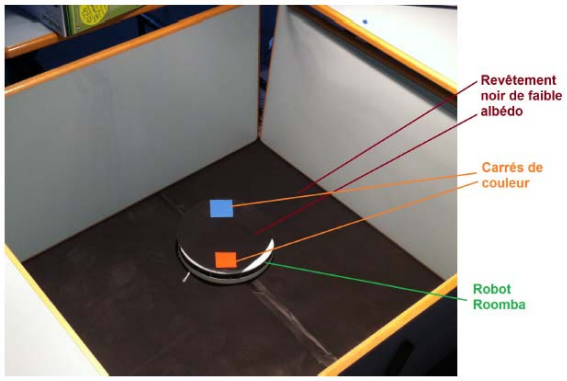


Figure 5 : *Photo de la manip réalisée*

Différents outils d'analyse et de traitement d'images fournis par les professeurs ont permis d'effectuer diverses études de caractérisation. Ainsi, il a été identifié l'évolution de la surface balayée en fonction du temps pour divers niveau de saleté disposée au sol et divers obstacles. Cette évolution est de forme exponentielle. Par ailleurs, il a été également possible d'analyser les surfaces les plus balayées. Cette analyse est effectuée au travers un programme Simulink permettant de colorier en blanc les zones où la fréquence de passage du robot est élevée et en noir où la fréquence est faible. Un exemple d'image obtenue est donné ci-dessous où le rectangle rouge correspond à un obstacle fixe.

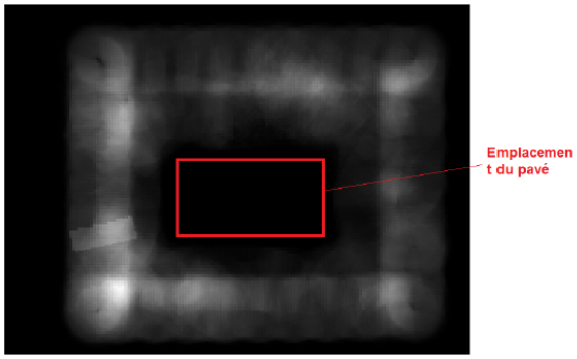


Figure 6 : *Fréquence de passage du robot (le rectangle rouge correspond à un obstacle fixe)*

D'autres analyses ont été effectuées telles que le comportement du robot vis-à-vis des obstacles (formes, dimension), ou encore sa consommation énergétique et son autonomie. Des analyses auraient pu également être menées relatives au chargeur de batterie.

5.2. Brosse à dents à recharge par induction

La brosse à dent (cf. figure 7) est un objet intéressant à plusieurs titres. Tout d'abord, c'est un objet de la vie courante. C'est un objet dont le coût d'acquisition est rudimentaire. Enfin, il comporte plusieurs informations scientifiques et techniques d'un grand intérêt pédagogique.

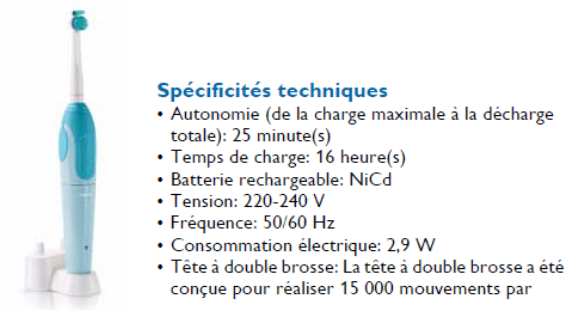


Figure 7 : *Photo de la brosse à dents à recharge par induction (HX160/022 de chez Philips)*

Tout d'abord, une analyse fonctionnelle est réalisée. Celle-ci est synthétisée par le schéma de la figure ci-dessous.

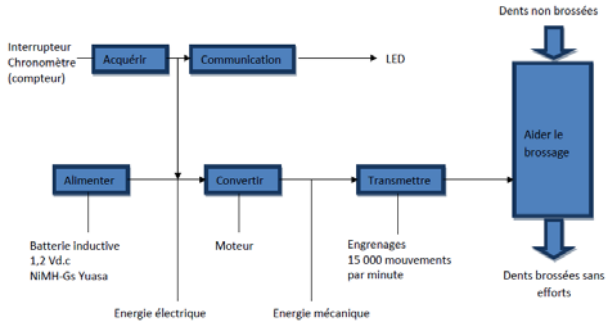


Figure 8 : *Schéma fonctionnel*

Matériaux/procédés de fabrication : Historiquement, les brosses à dents étaient des bâtons, qui servaient comme un cure-dent. Les brosses à dents d'aujourd'hui sont faites de plastique injecté ainsi que de poils nylon. Les brosses à dents sont un élément commun de tous les jours, qu'il faut pour des raisons hygiénique changer tous les trois mois. Il faut donc des matériaux peu chers pour la rendre abordable au grand public. Il faut de plus des matériaux résistant à l'eau permettant de rendre le système hermétique. Les axes de guidage protégés par des joints en caoutchouc sont réalisés en acier.

Les procédés de fabrication identifiés sont :

- Pour la partie brosse : Moulage par injection d'un premier composant en plastique dur du boitier. Montage de la source lumineuse ou d'un élément conducteur de lumière sur le premier composant plastique. Moulage par injection d'un second composant en plastique souple du boîtier à proximité de la DEL. Moulage par injection du boitier, d'un groupe intérieur comprenant une unité. Insertion, dans le boitier, d'un groupe intérieur comprenant une unité d'entrainement, une source d'énergie et une source lumineuse à DEL.
- Pour la base, elle est faite en deux parties par du moulage par injection, puis on insère les composants électriques, et enfin du plastique est coulé dessus afin d'empêcher les personnes de pouvoir accéder à cette partie. Le risque de rentrer en contact avec des pièces nues sous tension est important.

Analyse sur cycle de vie : Partie non traitée par les élèves mais ce support peut faire l'objet d'une véritable étude ACV [1]. En particulier, via des outils adaptés, les élèves pourront réaliser une analyse sommaire sur les impacts environnementaux d'un tel objet de grande série et comparer les résultats à une solution passive de brosse classique.

Chaine électrique/électronique : Tout d'abord, pour des raisons de commodité et de sécurité évidente, la recharge s'effectue par induction (recharge sans contact). Cette chaine pose des problématiques scientifiques intéressantes sur le plan pédagogique d'électromagnétisme, d'électronique de puissance / de commande et de stockage énergétique.

La carte électronique comportant en particulier la bobine secondaire du système de recharge par induction est donnée à la figure 9. Un modèle PSIM pour la simulation du transfert énergétique de type transformateur avec entrefer a été réalisé par les élèves tel que montré par la figure 10. L'intérêt de ce modèle, au-delà de la familiarisation avec un outil de simulation électronique, est la confrontation des résultats entre un modèle soumis à des hypothèses et les mesures, eux-mêmes entachés d'erreurs de mesures.

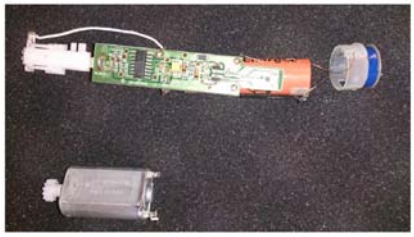


Figure 9 : *Photo de la carte électronique*

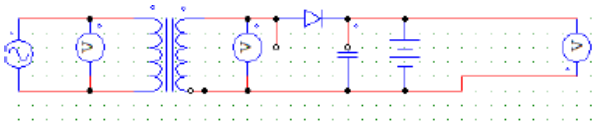


Figure 10 : *Modèle PSIM de la recharge*

Chaine mécanique : Concernant la chaine mécanique de transmission de puissance, elle est également riche pédagogiquement. Le démontage de la brosse par les élèves leur a permis de mener une analyse sur les choix d'entrainement adopté par l'industriel. La figure 11 montre les principaux organes associés à cette chaine.

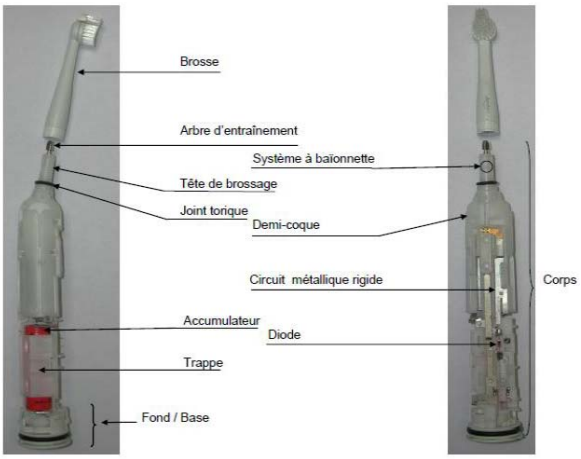


Figure 11 : *Chaine mécanique*

De cette analyse, les élèves ont extrait le schéma cinématique de la brosse présenté à la figure 12.

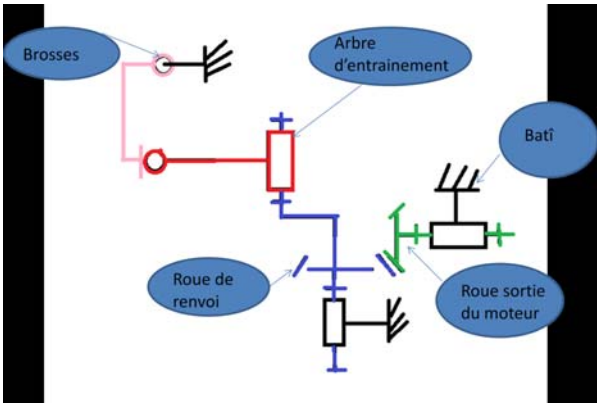


Figure 12 : *Modèle cinématique*

Toujours concernant cette chaine mécanique, on peut noter que Philips a développé une tête escamotable qui se dérobe si la pression sur la gencive est trop forte. Un limiteur de couple constitué d'une pièce déformable (cf. figure 13) empêche une pression trop forte sur la gencive. C'est le système breveté de protection des gencives [2]. A partir d'un outil de modélisation mécanique (SolidWorks), les élèves ont pu déterminer à partir de quelle pression la tête se dérobe.

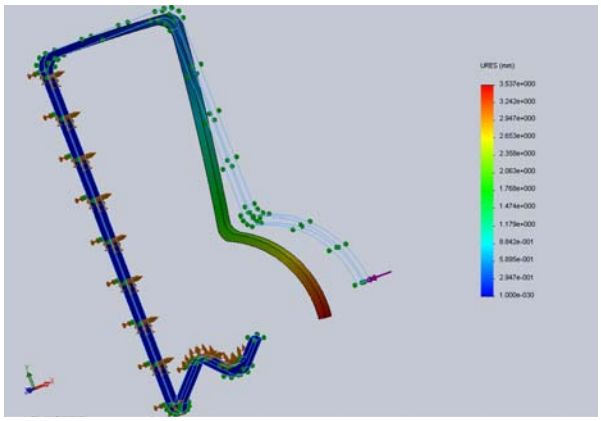


Figure 13 : *Modélisation du ressort sous SolidWorks*

Extrait de la conclusion des élèves : *Dans ce projet, nous avons utilisé beaucoup d'outils numériques. Cela a été très constructeur. Nous nous sommes aperçus que la simulation était parfois loin de la réalité. Les logiciels ayant des subtilités ne concordant pas avec la réalité. Nous nous sommes aussi aperçus que les données du constructeur sont difficiles à obtenir. Nous avons eu du mal à effectuer certaines de nos mesures à causes des faibles puissances mises en jeu, les appareils de mesure mis à notre disposition n'étant pas toujours adaptés à ces niveaux de puissance. D'où une certaine imprécision dans les relevés.*

Par ailleurs, ce projet a été très formateur. Il nous a permis d'apprendre à travailler en groupe, à manipuler avec précaution et à établir un protocole expérimental par nos propres moyens.

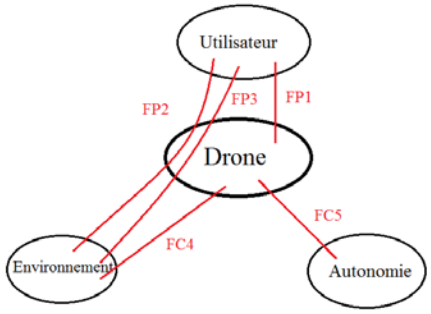
5.3. AR-Drone

Il s'agît là aussi d'un objet commercialisé pour le grand public, c'est un jouet pour être précis qui s'inscrit dans une longue tradition de modélisme aéronautique ; à ceci près que cet engin est plus sophistiqué qu'on ne pourrait le croire au premier abord : en effet, on ne contrôle pas l'appareil en contrôlant chaque moteur, mais en contrôlant directement une fonction (monter, descendre, avancer …), et c'est le système embarqué qui effectue les calculs nécessaires pour exécuter cette fonction (l'asservissement s'effectue grâce aux nombreux capteurs embarqués). Comme indiqué sur la figure 14, l'hélicoptère est équipé de 4 moteurs électriques (d'où le nom de « quadricoptère »), de capteurs : accéléromètres, gyroscopes, altimètre, caméras, carte wifi, et embarque même un OS linux le tout alimenté par une batterie au lithium.



***Figure 14** : Photo de l'AR-Drone 2.0 de chez Parrot.*

Après une prise en main par les élèves très intéressée et joyeuse (…), ils ont réalisé un diagramme des interacteurs résumant les principales fonctions de service de l'Ar.Drone 2. Ce diagramme est donné à la figure 15.



FP1 : Divertir l'utilisateur
FP2 : Permettre à l'utilisateur de déplacer le drone dans son environnement
FP3 : Permettre à l'utilisateur de filmer son environnement
FC4 : Résister aux agressions de son environnement (eau, sable, vent..)
FC5 : Être autonome

***Figure 15** : Diagramme des interacteurs.*

Motorisation : Le drone est doté de quatre moteurs brushless, un pour chaque hélice. Ces moteurs sont très intéressants pour le modélisme car ils peuvent être de très petite taille tout en offrant une puissance convenable, en tout cas suffisante pour, grâce aux hélices, de porter le drone. Les moteurs "brushless", littéralement "sans balai", sont plus intéressants que les moteurs à collecteur mécanique qui possèdent d'une part un défaut majeur de posséder des balais s'usant rapidement en particulier pour des vitesses de rotation élevée.
D'une puissance de 15 Watts, les moteurs effectuent 28000 tr/min en vol stabilisé, ce qui correspond à 3300 tr/min pour les hélices. La vitesse de rotation des moteurs peut varier entre 10350 et 41400 tr/min. Le kit présenté sur la figure 16 comprend un moteur avec sa carte électronique, qui comprend un microcontrôleur basse consommation 8bits ainsi qu'un contrôleur ADC 10 bits pour gérer la vitesse de rotation [3].



***Figure 16** : Photo u moteur brushless et de son électronique*

Mais cela soulève un problème. En effet un moteur brushless doit être alimenté en triphasé, et le drone fonctionne avec du courant continu (batterie), il est donc nécessaire d'avoir un onduleur, ce qui augmente le cout, la taille et les pertes d'énergie. Cela nécessite également de connaitre la position du rotor (capteur direct ou indirect de position) à chaque instant pour l'autopilotage.

Le pilotage ou la commande de vol du dispositif est réalisé à partir de consignes de vol imposées par le pilote (sur une tablette ou un Smartphone par exemple), ces consignes sont récupérées via une liaison wifi par le calculateur embarqué (processeur 1 GHz 32 bits ARM). Ce dernier, via un modèle mécanique inverse et des retours des divers capteurs, en déduit les consignes appliquées à chaque moteur.
Les élèves se sont intéressés à cette chaine d'information.

Mécanique de vol : Les mouvements possibles sont :

- Translation sur l'axe Z
- Roulis (rotation sur l'axe X)
- Tangage (rotation sur l'axe Y)
- Lacet (rotation sur l'axe Z)

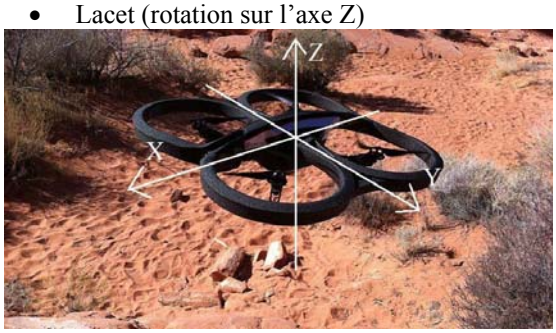


***Figure 17 :** Définition des axes*

La rotation des hélices engendre des efforts sur le vent. Or par la loi de rétroaction, le vent engendre des efforts sur l'hélice.

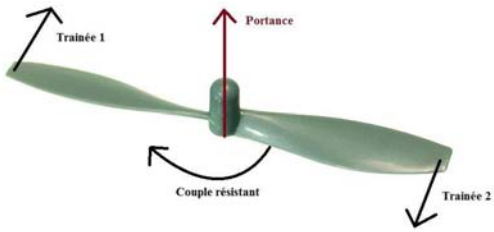


***Figure 18 :** Efforts sur l'hélice*

Soit P la force de portance et T la force de trainée.
On a :
$T=1/2\rho.S.Cx.V^2=Kx.V^2$
$P=1/2\rho.S.Cz.V^2=Kz.V^2$

Avec
ρ : La masse volumique de l'air
S : La surface du disque de l'hélice
V : vitesse linéaire de l'hélice
Cx : Coefficient de trainée
Cz : Coefficient de portance

On a donc quatre efforts (un pour chaque hélice) et le poids. Il y a deux moteurs diamétralement disposés tournant dans le sens horaire et deux autres dans le sens trigonométrique.
Les différents mouvements possibles sont :

- Vol stationnaire : Le drone se stabilise à une certaine hauteur avec une vitesse nulle, puis il faut que la somme des forces et que la somme des moments au centre de gravité soient nulles pour obtenir un vol stationnaire. Si on supposait le centre de gravité au centre du drone, les quatre moteurs tourneraient à la même vitesse pendant le vol stationnaire.
- Translation vertical : Pour obtenir une translation verticale, il faut que la somme des forces soit dans la direction du déplacement voulu, et que la somme des moments au centre de gravité soit nulle. On augmente donc uniformément les quatre moteurs.
- Lacet : Pour obtenir un mouvement de lacet, il faut que la somme des forces et que la somme des moments selon les axes horizontaux au centre de gravité soient nulles. Il nous reste donc un couple selon l'axe horizontal qui va engendrer une rotation du drone. Pour ce faire, on accélère deux moteurs diamétralement disposés et ralentit les deux autres. Cela explique la disposition particulière des moteurs.
- Tangage et roulis : Pour obtenir un mouvement de tangage ou de roulis, il que la somme des forces et des moments selon l'axe vertical au centre de gravité soient nulles. Il reste donc un couple selon un axe horizontal qui va entrainer la rotation du drone. Pour ce faire on accélère deux moteurs "consécutifs" et on ralentit les deux autres.
- Déplacement horizontal : Pour obtenir un déplacement horizontal, on effectue d'abord un roulis ou un tangage, puis on augmente les moteurs ralentis pendant la première phase pour que la somme des forces s'oppose au poids.

Capteurs : Etant donné que l'utilisateur ne donne que des informations globales (monter, descendre, droite, gauche, avance, recule, tourne), il est nécessaire au drone de s'auto-stabiliser et de se repérer dans l'espace. Pour cela, le Drone dispose de plusieurs types de capteurs :

- Une centrale inertielle permettant au drone de connaître son orientation dans l'espace et son accélération, composée de :
  - un « accéléromètre 3 axes » (en réalité 3 accéléromètres MEMS : 1 pour chaque axe) de précision ± 50mg.
  - un « gyroscope 3 axes » (en réalité 2 gyromètres MEMS, + un gyromètre de précision pour l'axe vertical) qui mesure l'angle suivant les 3 directions de l'espace. Précision 2000°/seconde
- Un magnétomètre 3 axes :
- Un capteur de pression : il est utilisé par le drone pour calculer son altitude (pour une hauteur supérieure à 6m)

Mesures : Les élèves ont pu tout d'abord relever la tension et l'intensité appliquées aux bobinages d'un des moteurs. Pour ce faire, la tension a été relevée à partir d'une sonde differentielle. Le courant est relevé via un shunt de précision.

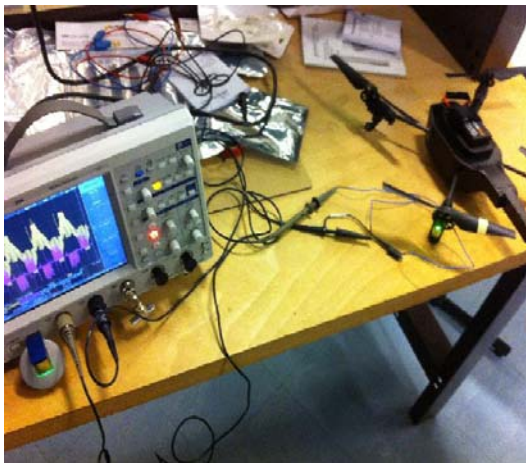


Figure 19 : *Mesure des courants/tension du moteur*

Pour évaluer les capacités du drone à se déplacer, les élèves ont effectués différents relevés, en particulier la mesure de la portance. Pour ce faire, le drone est posé sur une balance et à l'aide du logiciel de contrôle, la vitesse de rotation des hélices est modifiée. Des mesures du poids soulevé sont effectuées, en retranchant les effets de la surpression due aux conditions aux limites présentes dans la manip mais qui n'existent pas dans le fonctionnement normal en le surélevant de quelques millimètres. On a ainsi la force de la portance des quatre hélices. Pour la gamme de portance qui lui permet de décoller, on modifie légèrement le protocole. On l'accroche à des poids (supérieur à la portance maximale du drone) et on mesure la différence de masse soulevée retranchée de l'effort causé par le vent.

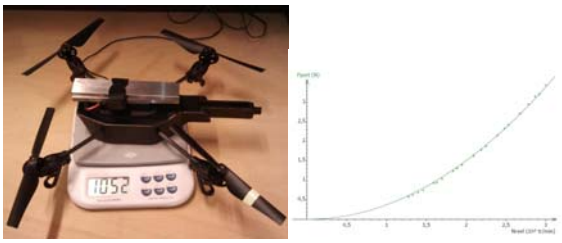


Figure 20 : *Mesure de la force de portance*

Chaque année, le nombre de supports mis à disposition est renouvelé partiellement (20%). D'autres supports ont été utilisés. Notamment :

- Machine à sorbet
- Robot 6 axes de chez Mitsubishi
- Manette Wii
- Lecteur laser de Code Barre
- Chariot de golf électrique
- Vélo à assistance électrique
- Scooter électrique
- …

6. Notre bilan

Notre bilan par rapport à notre expérience encore réduite est globalement positif. Pour les enseignants, l'intérêt d'une telle démarche de « reverse engineering » réside dans l'approche par l'exemple de l'application des phénomènes physiques. Même si les élèves suivant cette UE ne possèdent pas, à ce stade de leur cursus, toutes les connaissances scientifiques et technologiques nécessaires, cette approche permet de mettre concrètement en évidence certains phénomènes et l'intérêt et la nécessité de les aborder lors des enseignements plus classiques.

Cela étant, ce type d'enseignement mobilise beaucoup de moyens humains (encadrement, techniciens) et nécessite un investissement probablement plus important de la part des enseignants. Cela implique aussi une plus grande vigilance dans l'organisation et le déroulement des séances en particulier concernant l'anticipation des demandes des élèves en termes de matériel d'expérimentation.

Il faut également noter que le choix des supports doit correspondre aux moyens expérimentaux disponibles et à la faisabilité des mesures. Des supports, intéressant d'un point de vue concept peut s'avérer inexploitable à cause d'un taux d'intégration trop élevé.

7. Retour des élèves

Pour les élèves, les bilans réalisés à chaque fin de semestre sont dans l'ensemble satisfaisants. Ils apprécient la démarche ludique, au travers d'objets de la vie courante et l'approche expérimentale exigée. Leur première confrontation à la mécatronique leur semble très bénéfique et la comparaison théorie-mesure très utile.

Il est fait ponctuellement le reproche d'un manque d'anticipation de matériel d'expérimental ou encore de retard pris lors des séances lié à un disfonctionnement accidentel de matériel ou d'objets.

8. Conclusion

Nous avons souhaité ici partagé notre expérience dans la mise en place d'une démarche d'enseignement par projet. Notre bilan et celui des élèves est globalement positif. Cependant, il ne faut pas négliger les moyens humains, organisationnels et matériel que cette approche exige. Par ailleurs, cette approche n'est à notre sens pertinente que pour un effectif relativement réduit d'élève. Mais elle offre l'avantage d'offrir aux élèves un lieu d'expérimentation, d'initiative, d'autonomie et enfin de développer chez eux leur curiosité scientifique et technique et d'enrichir leur culture technologique. Compte tenu des supports choisis, c'est également un lieu de croisement de plusieurs disciplines plus ou moins couplées, en adéquation aux nouvelles orientations de l'enseignement en STII2D.

Cet article n'avait pas comme objectif de décrire précisément les divers supports et études effectuées (un seul article ne suffirait pas !) mais d'illustrer simplement la démarche pédagogique choisie.

Remerciements :

Les exemples de supports et les travaux associés intégrés à cet article ainsi que notre expérience acquise durant ces quelques années de pratiques n'auraient pu êtres possibles sans la complicité, l'investissement et le travail de nos élèves du magistère mécatronique de l'ENS Rennes des diverses promotions. Nous les remercions vivement pour tout cela.

Bibliographie :

[1] http://www.infoenergie69.org/particuliers/agir-au-quotidien/la-consommation-courante/faisons-le-point-68-68/l-analyse-de-cycle-de-vie-et-l-eco-conception
[2] ttp://www.google.com/patents/EP2229917B1?cl=fr
[3] http://ardrone2.parrot.com/