

Le Model Based Design pour l'apprentissage par conception guidée

Maxime COLAS, Michel DELOIZY

maxime.colas@univ-reims.fr, michel.delozy@univ-reims.fr

Laboratoire CReSTIC/ École d'ingénieurs en Sciences Industrielles et Numérique

Université de Reims Champagne-Ardenne

BP1039 – 51687 REIMS CEDEX 2

RESUME : Cet article présente une démarche d'apprentissage par conception guidée¹ reposant sur des techniques de prototypage rapide dans le domaine mécatronique. La pédagogie développée se veut intégrative et auto-contenue : elle ne nécessite pas de prérequis et apporte au fur et à mesure des besoins, l'ensemble des connaissances et compétences pluridisciplinaires nécessaires à la progression cohérente du projet de conception, tant d'un point de vue mécanique, programmation, qu'en termes de technique de contrôle-commande, le tout dans un volume horaire contraint. La ligne directrice employée vise à confronter de façon permanente, progressive et itérative, modèle simulé et système réel dans un objectif de dimensionnement de partie opérative, de validation de modèle et d'algorithmes de commande en tirant partie d'outils logiciels de contrôle/commande temps-réel, de synthèse de code et de simulation multiphysique.

Mots clés : dimensionnement, conception, instrumentation de maquette pédagogique par l'étudiant, CAO mécanique, systèmes multiphysiques, contrôle-commande, MBD, MIL, PIL, HIL.

1 INTRODUCTION

Dans le cadre de la formation de ses élèves ingénieurs en Automatique et Informatique Industrielle, le département EEA de l'EiSINe propose un cours de prototypage rapide. Il est dispensé aux étudiants de seconde et troisième année désireux de se spécialiser dans le domaine des systèmes embarqués mais cet enseignement peut également convenir à un public de Master Mécatronique.

La démarche adoptée est celle d'un projet réalisé sur 8 semaines à raison d'environ 5 heures par semaine (16h de cours/travaux dirigés et 24h de travaux pratiques), ponctuées de cours ciblés destinés à apporter les éléments théoriques nécessaires à sa réalisation.

L'enjeu consiste à promouvoir une démarche d'ingénierie système basée sur les modèles au travers d'une application motivante et ludique pour les élèves, mettant en avant la nécessité de s'approprier un certain nombre d'outils théoriques : mise en équation de système physique, modèle d'actionneur électrique, ou encore techniques de contrôle-commande.

Le pendule inverse à roue d'inertie est un problème simple à modéliser et à piloter, incluant un nombre limité de capteurs, d'actionneurs et de pièces structurelles mais qui, une fois fonctionnel, est particulièrement gratifiant pour l'élève qui l'a construit et qui parvient à l'asservir. La littérature regorge d'articles proposant sa modélisation puis sa commande [1, 2] à l'aide de méthodes très diverses : asservissement fréquentiel de type PID, commande dans l'espace d'état, commande floue, apprentissage par deep learning.

La conception d'un tel système ouvre donc de larges perspectives qui peuvent en faire un fil rouge liant différents enseignements allant du génie électrique à l'intelligence artificielle en passant par l'automatique ou le traitement du signal.

Durant 24h de projet les élèves, constitués en binômes, conçoivent et réalisent leur propre maquette de pendule tout en validant chaque étape en simulation. Compte

tenu du caractère contraint temporellement de l'exercice, l'élève est certes guidé d'un point de vue méthodologique mais il s'approprie un projet qu'il met en œuvre de bout en bout.

L'article est organisé comme suit : après une introduction rapide aux concepts du Model Based Design, la démarche guidée de conception telle que proposée aux élèves est détaillée. Un retour d'expérience présentant les avantages et inconvénients d'une telle approche, acquis entre autres auprès des étudiants, est établi. Enfin, une conclusion vient proposer quelques perspectives d'extension à d'autres champs disciplinaires.

2 PROTOTYPAGE RAPIDE PAR MODEL BASED DESIGN

2.1 Principes

En ingénierie des systèmes, les phases de conception – qu'elle soit architecturale ou détaillée – et d'intégration doivent s'accompagner d'une rétroaction permanente destinée à valider le bienfondé de chaque micro-décision : choix technologiques, dimensionnement, choix algorithmiques... Cette validation s'apprécie, dans une démarche méthodique itérative, à l'aune de l'écart constaté entre les performances attendues établies lors de l'étape de spécification et celles effectivement observées en simulation puis réellement.

Le Model Based Design (MBD) fournit un cadre méthodologique à cette démarche en proposant une stratégie en quatre étapes permettant une transition contrôlée et progressive entre simulation et système physique explicitée sur la figure 1.

Généralement, le Model Based Design considère deux entités intégrées dans une boucle fermée :

- une partie opérative ou système physique à piloter ;
- un dispositif de contrôle-commande instrumentant la partie opérative et destiné à agir sur celle-ci

¹ Les travaux présentés ont été réalisés dans le cadre du projet DeMETeRE (Déploiement de Micro-Environnements Territoriaux pour la Réussite Etudiante), lauréat du PIA4 DemoES (Démonstrateur de l'Enseignement Supérieur) et financé au titre du plan France 2030 (ANR-21-DMES-0011). DeMETeRE est un projet expérimental de l'URCA qui repose sur la création de véritables écosystèmes de formation sur le territoire champardennais, appelés les micro-environnements territoriaux (MET). Le projet s'appuie sur trois livrables : la virtualisation du poste de travail, l'utilisation de la simulation et de la réalité virtuelle et la mise en place d'un portail mobile.

selon son état grâce à des algorithmes optimisés dans le respect de contraintes énoncées dans un cahier des charges.

Souvent, le MBD ne vise qu'à valider le fonctionnement de la partie opérative ou à en optimiser les stratégies de contrôle. Plus rarement, elle peut poursuivre les deux objectifs simultanément dans une démarche de conception globale. Dans tous les cas, elle permet de réduire le temps de développement et de sécuriser le projet en graduant sa progression, deux avantages déterminants dans une séquence pédagogique à temps contraint.

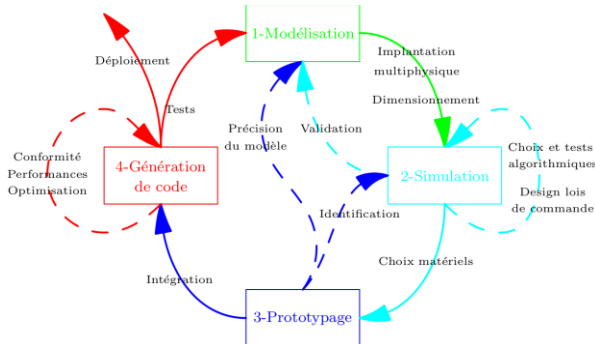


Fig. 1 : Les étapes du Model Based Design

Une première étape du MBD consiste à **modéliser la partie opérative** par ses équations ou par graphes d'états. Dans une démarche de conception, cette étape présuppose l'architecture opérative établie et les degrés de liberté résultant sont principalement paramétriques.

L'étape de simulation repose sur les équations de description obtenues lors de la modélisation. Elle permet de déterminer le réalisme comportemental, de fixer des plages paramétriques assurant la satisfaction du cahier des charges, de dimensionner et choisir les actionneurs et finalement d'obtenir un jumeau numérique du système à prototyper sur lequel les solutions de contrôle pourront être rapidement testées. Pour cela, l'outil de simulation intègre généralement la possibilité de développer, interfacer et exécuter des algorithmes de commande dans un mode dit *Model in the Loop* (MIL), c'est-à-dire dans une boucle fermée n'intégrant que des éléments simulés, tant pour la partie opérative que pour la partie commande.

L'étape de prototypage convertit le système numérique simulé en maquette physique. C'est à ce stade que le système est instrumenté : les actionneurs retenus lors de l'étape précédente sont intégrés, les capteurs sont installés, les paramètres non documentés dans les datasheets sont identifiés et réinjectés dans le jumeau numérique.

Enfin, l'étape de **génération de code** consiste à convertir les algorithmes de contrôle-commande, décrits dans un langage simplifié et souvent graphique en code déployable sur une cible temps-réel autonome (généralement un microcontrôleur). Cette étape peut être totalement automatisée et c'est ainsi qu'elle est

exploitée dans le projet. A ce niveau, on distingue les générations non instrumentées et instrumentées.

Dans le premier cas, seul le code de l'algorithme de contrôle-commande est synthétisé puis exécuté sur la cible à un rythme synchronisé à l'exécution du modèle sur le PC hôte. Dans ce mode appelé *Processor in the Loop* (PIL), il est possible de déterminer le taux d'occupation du microcontrôleur et on s'affranchit des imperfections des capteurs et actionneurs.

Le mode *Hardware in the Loop* (HIL) est quant à lui instrumenté : comme en mode PIL, l'algorithme de contrôle-commande est embarqué sur la cible mais il est cette fois exécuté en temps-réel et interfacé au prototype réel via ses capteurs et actionneurs et au travers d'une carte électronique exploitant des modules de mesure ou de contrôle du microcontrôleur.

2.2 Bénéfice du MBD dans une pédagogie par conception

L'apprentissage par conception (Design Based Learning) est une approche pédagogique proche de l'apprentissage par projet : comme en pédagogie par projet, il définit un objectif concret décrit par un cahier des charges et prétexte à l'activation de connaissances et de savoir-faire. En revanche, il se concentre davantage sur la création d'un objet et moins sur la résolution d'une problématique comme c'est le cas en pédagogie par projet. Lorsqu'elle est correctement guidée et couplée à la méthodologie MBD, la pédagogie par conception présente de nombreuses qualités tant pour l'étudiant que pour l'enseignant :

- elle est stimulante car motivée par un objectif clair et fédérateur ;
- elle établit un pont concret et continu entre la démarche de conception et la rigueur, notamment théorique nécessaire à sa réalisation ;
- elle alterne des phases concrètes et abstraites et maintient ainsi l'intérêt des étudiants ;
- davantage guidée qu'un apprentissage par projet, la démarche par conception permet de gagner un temps considérable en écartant rapidement les pistes vouées à l'échec, trop complexes, peu robustes, peu structurées ou exploitant insuffisamment les acquis de la formation.
- elle découple les problématiques grâce à une modélisation de complexité progressive ;
- elle permet la parallélisation des tâches en fournissant un jumeau numérique en amont d'un prototypage physique qui peut présenter des facteurs non maîtrisés : lenteur de l'impression 3D, délais de livraison de matériel ...
- elle minimise les tâches de codage, généralement chronophages et peu gratifiantes pour l'étudiant mais aussi source de désorganisation pour l'enseignant (on reconnaîtra ici ces tâches de débogage en séance qui ne concernent qu'un binôme et rendent de facto l'enseignant indisponible pour les autres).

En résumé, un apprentissage par conception guidée est à la frontière entre la pédagogie par projet, plus délicate à maîtriser et moins rapidement productive et la traditionnelle séance de travaux pratiques et le MBD contribue à structurer sa mise en œuvre. La section suivante illustre plus précisément cette démarche.

3 CONCEPTION D'UN PENDULE INVERSÉ À ROUE D'INERTIE

3.1 Cahier des charges

Le cahier des charges fourni aux étudiants indique en premier lieu la finalité de l'objet à concevoir : il s'agit d'un pendule capable de se verticaliser grâce à un moteur installé à son extrémité oscillante et sur l'axe duquel est fixée une roue d'inertie (cf. fig. 2).

Seules quelques contraintes de réalisation sont indiquées : longueur maximale de la tige fixée 230 mm pour des raisons pratiques liées au plateau d'impression de nos imprimantes 3D (Ultimaker 2+). Idem pour le diamètre de la roue. Les éléments de jonction sont également imposés : roulements et moyeux. Enfin, l'exigence principale pour le dimensionnement impose une capacité de verticalisation d'un pendule lâché sans vitesse initiale et à 15° de la verticale, et ce, pour une vitesse de rotation initiale du moteur également nulle.

3.2 Démarche de conception

Une fois le cahier des charges et la démarche du MBD présentés, l'enseignant initie l'étape de modélisation mécanique. Celle-ci débute par un cours introduisant les notions de mécanique analytique, l'équation d'Euler-Lagrange et ses conditions d'application ainsi que ses avantages sur l'application directe des lois de Newton. Même si peu d'étudiants y ont été confrontés durant leur scolarité, la simplicité de cette approche est illustrée sur des exemples proches du système à concevoir : objet en chute libre, pendule simple et non actionné. S'ensuit une séance de travaux dirigés durant laquelle les équations du pendule à roue d'inertie sont établies. L'association de ces équations et des contraintes du cahier des charges conduit à l'étape de dimensionnement.

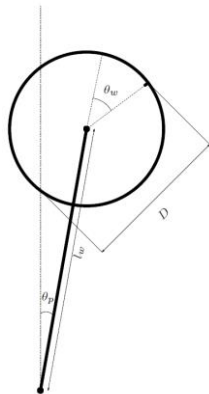


Fig. 2 : Représentation simplifiée du pendule inversé à roue d'inertie

3.2.1 Dimensionnement de la roue et de la tige

Une fois choisie de façon arbitraire mais dans les limites autorisées une longueur l_w de tige de pendule, l'étape de dimensionnement porte principalement sur deux éléments : la géométrie et la masse du volant d'inertie d'une part, le couple moteur minimal nécessaire à l'entraînement du volant et sa masse d'autre part. Généralement, pour une tension d'alimentation donnée, la masse d'un moteur DC croît avec le couple qu'il est susceptible de délivrer. Dans ce projet, un compromis doit être trouvé : un couple important permet d'actionner plus fortement le pendule mais une masse importante rend sa verticalisation plus difficile. Pour résoudre ce compromis mais également finaliser la modélisation, un cours établissant les équations du moteur à courant continu est dispensé à l'issue duquel l'étudiant se voit proposer un ensemble de datasheets de moteurs qu'il doit déchiffrer. Parmi les éléments déterminants, les constantes de couple k_c de vitesse k_e , et la résistance d'induit R , permettent d'établir le couple instantané selon :

$$C_w = \frac{k_c}{R} (u - k_e \dot{\theta}_w)$$

où u est la tension de commande du moteur. Ce couple permet à son tour de fixer la masse m_a maximale de l'équipage roue d'inertie moteur selon :

$$m_a \leq \frac{C_w / g \sin(\theta_p^{lim}) - l_p m_p}{l_w}$$

où m_p est la masse du pendule et l_p est la distance entre l'axe du pendule et son centre de gravité. Ce cours de modélisation permet également d'obtenir une expression de la fonction de transfert $\dot{\theta}_p(p)/U(p)$ du moteur chargé par son inertie, utile lors de la phase d'identification des paramètres inconnus tels les frottements liés à la résistance de l'air.

Une réflexion est ensuite menée sur le meilleur compromis entre masse et inertie de la roue qui aboutit à son dimensionnement en termes de diamètre externe et interne mais également d'épaisseur.

Une fois la roue et le moteur dimensionnés, il s'agit de concevoir les pièces associées en exploitant un logiciel de CAO. Pour cela, une introduction aux concepts et fonctionnalités principales du logiciel *Solidworks* est dispensée. À ce stade les étudiants sont sensibilisés aux points d'attention suivants :

- la tige conçue doit présenter une bonne résistance à la torsion afin de limiter les déformations dues au couple moteur appliqué à la roue qui n'est pas coplanaire à la tige du pendule ;
- les pièces conçues doivent être aisément imprimables (et donc présenter une face plane) ;
- la roue doit impérativement faire coïncider son centre de gravité et son axe de rotation ;
- les éléments de jonction (roulements et moyeux) doivent être intégrés à l'exercice de conception,

ce qui passe par l'étude des datasheets dimensionnelles associées à ces pièces ;

- le moteur doit être solidement fixé à l'extrémité de la tige.

L'outil d'évaluation des *propriétés de masse* indique la masse et les propriétés d'inertie de la roue. Sur la base de la connaissance de la densité du produit d'impression (ici du PLA), ces éléments peuvent aisément être confrontés aux résultats issus de la théorie.

La figure 2 présente un exemple de design des éléments structurels du pendule réalisé par un binôme.

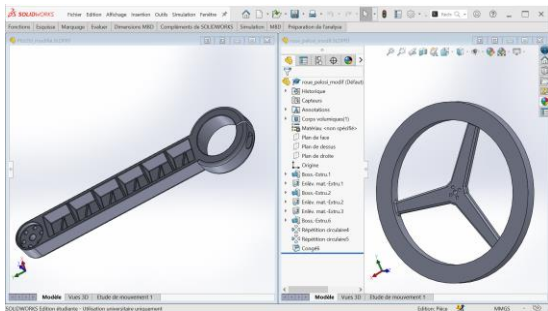


Fig. 2 : Exemple de conception et dimensionnement des éléments structurels du pendule dans Solidworks

3.2.2 Simulation multiphysique

La modélisation terminée fait ensuite l'objet d'une implémentation dans *Simulink*, basée sur la toolbox de simulation multi-physique *Simscape*. Après une introduction aux concepts de réseau physique et de variables duales série et parallèle, les étudiants sont invités à produire le modèle *Simscape Multibodies* associé à la modélisation mécanique du pendule. L'intérêt de cette étape est triple :

- elle ne nécessite pas de programmer les équations dynamiques du système ;
- elle produit une simulation graphique animée du modèle via l'outil *Mechanics Explorer* ;
- elle offre la possibilité d'intégrer les éléments de CAO y compris leurs propriétés de masse et d'inertie, par usage de blocs *file Solid*.

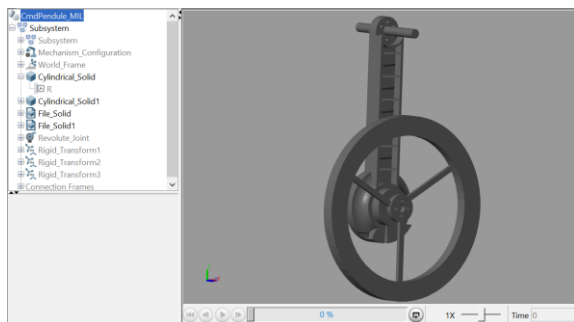


Fig. 3 : Jumeau numérique *Simscape Multibodies* intégrant les éléments de CAO *Solidworks* et visualisé dans *Mechanics Explorer*

Le modèle *Simscape Multibodies* est ensuite complété à l'aide d'éléments *Simscape Electrics* afin d'y intégrer la partie actionneur.

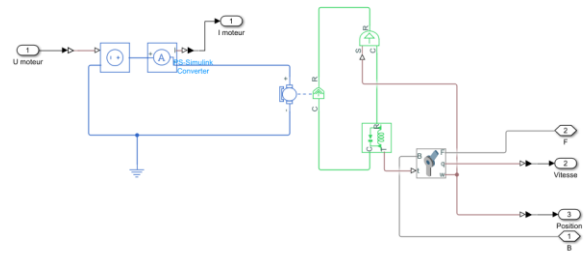


Fig. 4 : Modélisation électromécanique de la caractéristique tension-vitesse d'un moteur accouplé sur charge dans *Simscape*

Fort de ce jumeau numérique, les étudiants peuvent à présent confronter leur dimensionnement au cahier des charges et valider la contrainte de verticalisation énoncée en section 3.1. Lorsque cette étape est validée, le processus d'impression de leurs éléments structurels est lancé. La relative lenteur associée à la production de ces pièces (12 roues et 12 tiges à imprimer pour 24 étudiants à raison d'environ 5h d'impression par item) n'est pas réellement handicapante puisque les étudiants disposent d'un modèle fiable sur lequel ils peuvent tester leur algorithme de contrôle sans perte de temps.

4 PROTOTYPAGE DU PENDULE

Cette section décrit plus spécifiquement la phase de prototypage de la commande du pendule.

4.1 Maquette de contrôle-commande

Le projet n'étant pas centré sur le développement électronique, une maquette de contrôle-commande développée au sein de notre département d'enseignement est directement fournie à chaque binôme.

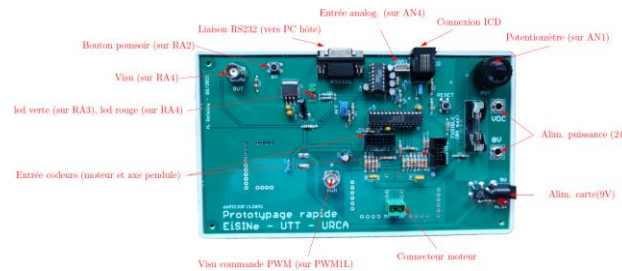


Fig. 5 : Maquette de contrôle-commande développée pour le projet

Celle-ci intègre ;

- un microcontrôleur dsPIC33FJ128MC802 ;
- deux connecteurs QEI permettant d'acquérir les mesures d'angle de l'arbre moteur et de la tige du pendule ;
- deux bras de pont BTN7970B constituant un hacheur 4 quadrants relié au moteur et commandés par un signal PWM issu du microcontrôleur ;
- une liaison UART permettant l'échange d'informations en temps réel entre le microcontrôleur et le PC.

4.2 Coûts associés à la réalisation

Les coûts par binôme engendrés par le prototypage sont à classer en deux catégories :

- Les consommables : PLA utilisé pour l'impression des éléments du pendule (10€)
- Les éléments investis :
 - Paliers PLA de support tige pendule (5€)
 - profilé aluminium (80€)
 - Moteur DC Maxon + codeur incrémental sur axe moteur (330€)
 - Codeur HEDL axe pendule (65€)
 - Carte de contrôle commande (200€)
 - Roulements, jonctions métalliques, tige de support pendule (15€)

Soit un total d'environ 710€ par maquette dont 700€ réutilisables l'année suivante.

À l'issue de l'étape de prototypage, chaque étudiant dispose d'une maquette similaire à celle présentée sur la figure 6. Il ne lui reste alors plus qu'à tester la commande générée en temps-réel par la cible sur ce système.

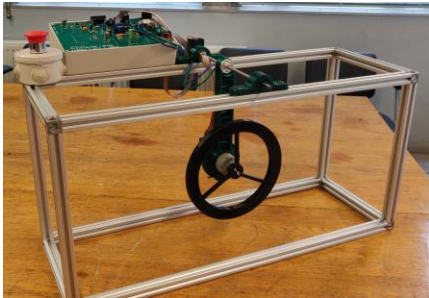


Fig. 6 : Modélisation électromécanique de la caractéristique tension vitesse d'un moteur accouplé sur charge

5 CONTRÔLE-COMMANDE DU SYSTÈME

L'asservissement vertical du pendule est entrepris en parallèle de l'étape de prototypage en se basant sur le jumeau *Simscape* du système.

5.1 Verticalisation

S'agissant d'un système sous-actionné partant d'une position stable d'énergie très inférieure à celle de la position d'asservissement, une phase de contrôle non linéaire permettant une accumulation d'énergie doit nécessairement être mise en place. Classiquement et par analogie à une balançoire, l'étudiant propose naturellement une approche par oscillations successives que l'on retrouve sous le nom de swing-up dans la littérature [2]. La méthode consiste à programmer une commutation précise de l'alimentation moteur en fonction du signe de la vitesse angulaire du pendule :

$$u(t) = V \text{sign}(\dot{\theta}_p(t))$$

Après validation du bienfondé de cette approche sur *Simscape*, celle-ci est affinée afin de limiter la vitesse d'entrée du pendule dans le cône angulaire défini par $|\theta_p| < \theta_p^{lim} = 15^\circ$. Pour cela, on module la commande selon l'énergie totale accumulée par le pendule. Dès

l'entrée dans ce cône, la commande est basculée en mode linéaire et une stratégie de contrôle par retour d'état est alors appliquée.

5.2 Contrôle dans l'espace d'état

Le contrôle par retour d'état nécessite avant tout de définir les grandeurs représentatives de l'état du système (ici $X = [\theta_p, \dot{\theta}_p, \dot{\theta}_w]^T$) puis d'exprimer son évolution à l'aide des équations dynamiques linéarisées du système.

Un cours spécifique d'automatique (4h) introduisant les notions de commandabilité, d'observabilité, la technique de placement de pôle et de calcul des coefficients de rétroaction associés est alors dispensé. Les étudiants utilisent directement ces connaissances pour déterminer leur valeur dans Matlab – d'abord par programmation matricielle puis en utilisant la fonction *place* – puis pour l'appliquer sur le jumeau *Simscape* comme présenté sur la figure 7.

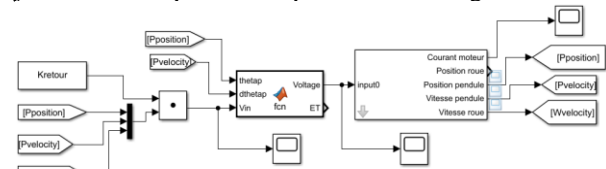


Fig. 7 : Commande MIL du pendule à roue d'inertie

Après validation du fonctionnement du modèle, reste l'étape d'identification des paramètres inconnus du modèle ainsi que l'export de l'algorithme de commande sur une cible temps-réel. C'est l'objet de la section suivante.

5.3 Implémentation HIL de la commande

MathWorks propose la toolbox *Embedded Coder* permettant de générer du code C pour des plateformes embarquées. En utilisant *Embedded Coder*, il est possible d'exécuter tout ou partie de modèles Simulink sur des cibles dédiées, sans aucune étape de codage, et en monitorant les résultats produits.

Le code exécuté sur la cible peut se limiter à un bloc du diagramme Simulink (prototypage PIL) ou constituer l'ensemble de la commande (HIL). Sur la base d'*Embedded Coder*, Microchip a développé le *MPLab Device Blocks for Simulink* [3] qui propose un ensemble de blocs compatibles avec la quasi-totalité des microcontrôleurs de la marque (processeur et périphériques). Après une description rapide des blocs proposés par la toolbox, les étudiants réalisent l'instrumentation du schéma de la figure 7 : pour cela, ils remplacent le modèle par les blocs de contrôle des modules du microcontrôleur : les mesures angulaires sont implémentées au travers du module QEI (Quadrature encoder interface) présent sur le dsPIC et la commande exploite son module PWM. Cette étape particulièrement simple permet d'obtenir en moins d'une heure un transfert fonctionnel sur la cible réalisant l'asservissement, ainsi qu'une satisfaction certaine des étudiants comme en atteste la figure 8.

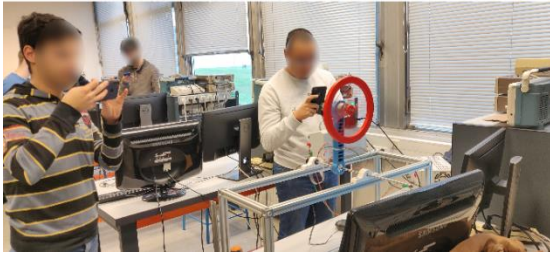


Fig 8 : Finalisation du projet de conception

6 RETOUR D'EXPÉRIENCE ET RESENTI ETUDIANT

La mise en place d'un tel enseignement bien que très motivante pour l'enseignant du fait de la dynamique qu'elle engendre dans l'appropriation des compétences transmises, requiert un haut niveau d'investissement de ce dernier en termes de supports et de phasage. L'efficacité de l'approche par conception guidée doit également être évaluée auprès des étudiants eux-mêmes. À cette fin, un questionnaire leur a été communiqué à l'issue de l'enseignement. Cette enquête de 26 questions (taux de réponse = 74% d'une classe de 23 étudiants) a permis de tirer un premier bilan de cette expérience.

L'enquête analysait deux sujets :

- Le ressenti relatif à leurs expériences antérieures d'enseignement par projet ;
- Le niveau d'adhésion à la pédagogie par projet de conception proposée.

Concernant l'enseignement par projet, les étudiants y plébiscitent avant tout le fait de pouvoir choisir un sujet proche de leurs centres d'intérêt et de réaliser ce travail en équipe (18% des réponses pour chaque item). Pour eux, l'enseignant doit avant tout être un facilitateur en leur fournissant un support matériel ainsi qu'un guide leur évitant de persévérer dans des voies non viables. Les enseignements et le réemploi des techniques de gestion de projet leur semblent en revanche souvent perfectibles de même que le niveau d'aide théorique et technique habituellement apporté par l'enseignant (29% des réponses pour chaque item). Finalement et étonnamment du point de vue de l'enseignant, ils préfèrent (à 75%) aboutir à un résultat final fonctionnel quitte à utiliser des technologies et connaissances basiques et sans rapport avec les théories abordées en cours plutôt que d'utiliser un formalisme théorique élégant mais fournissant dans un premier temps des résultats moins aboutis.

Sur la pédagogie par projet de conception, les bénéfices principaux ressentis par les étudiants concernent la confrontation permanente entre théorie et pratique (score 70%) et une motivation renforcée (70%) pour assimiler des concepts théoriques habituellement présentés très en amont de leur utilisation, lors de cours magistraux. Ils reconnaissent néanmoins que fortement guidés, la place laissée à l'innovation s'en trouve réduite (52%) tout en appréciant le fait d'obtenir une proposition de solution de la part de l'enseignant (58%)

et de disposer d'un fascicule de réalisation de projet détaillé, indiquant des pistes de résolution et développant des compléments théoriques (82%). Ils pointent également le risque accompagnant cette méthode, d'un approfondissement insuffisant des questions théoriques (54%). Toutefois, 92% des étudiants indiquent avoir progressé ou renforcé leurs connaissances sur les sujets théoriques abordés durant le projet.

Si cette enquête met en lumière un bénéfice de ce mode d'enseignement (68%) supérieur en moyenne à ses inconvénients (48%) auprès des étudiants, elle ne préjuge évidemment pas de son efficacité concernant l'acquisition des compétences pour laquelle d'autres outils d'évaluation devront être mis en place. En revanche, elle montre qu'un certain nombre de défauts associés à l'enseignement par projet (demande d'encadrement, incertitude de succès et réticence à mettre en œuvre des concepts théoriques challengeants) peuvent être limités par cette approche.

7 CONCLUSION

L'objectif de cette communication était de présenter une démarche globale de pédagogie par projet de conception guidé associant trois caractéristiques principales :

- la conception et la réalisation d'un système nécessitant des compétences larges de mécanique, contrôle-commande et prototypage rapide dans un cadre MBD.
- une méthodologie de réalisation encadrée à mi-chemin entre TP et projet mais reposant sur une solution validée par l'enseignant et assurant l'exploitation des connaissances requises par la formation.
- un apport théorique dispensé parallèlement à la réalisation du projet et guidé par les besoins identifiés au cours de celui-ci.

Les premiers retours de satisfaction obtenus auprès des étudiants semblent encourager le développement de cette pédagogie mais également l'extension du projet proposé à d'autres problématiques : effet du passage en virgule fixe, mise en place d'un observateur pour la suppression d'un des capteurs ou encore la commande du système à l'aide d'algorithmes de machine learning.

Bibliographie

- [1] Gonzalo Belascuen, Nahuel Aguilar, "Design, Modeling and Control of a Reaction Wheel Balanced Inverted Pendulum ", *IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON)*, June 2018.
- [2] Franck Jepsen, Anders Soborg, Anders R. Pedersen, Zhenyu Yang, "Development and Control of an Inverted Pendulum Driven by a Reaction Wheel", *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Changchun (China)*, August 2009.
- [3] <https://fr.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/71892-mplab-device-blocks-for-simulink-dspic-pic32-and-sam-mcu>