



Introduction à la régulation numérique en travaux pratiques d'électronique de puissance avec SIMULINK et DSPiC

Thierry Martiré¹, Guillaume Pellecuer¹, Philippe Enrici¹, Carole Hénaux¹, J.P Gairaud¹, E.
Briquet¹, Jean-Jacques Huselstein¹,

¹Département EEA,Fds, Université de Montpellier, CC76 Place Eugène Bataillon, 34095
Montpellier

*Auteur de correspondance : Thierry.martire@umontpellier.fr

Résumé : *Cet article propose une approche pédagogique de la régulation sur DSPiC avec SIMULINK et son application en électronique de puissance avec un ensemble matériel à faible coût. Le système matériel, la modélisation, la simulation et l'implémentation de la régulation par les étudiants sont décrits en vue de faciliter leur apprentissage et de renforcer leurs compétences en contrôle-commande d'électronique de puissance.*

Mots clés : Régulation, SIMULINK, DSPiC, électronique de puissance

Abstract: **Introduction to digital control in power electronics laboratory work with SIMULINK and dsPIC**

This article proposes a pedagogical approach to control on a dsPIC using SIMULINK and its application in power electronics with a low-cost hardware platform. The hardware system, modeling, simulation, and implementation of the control by students are described with the aim of facilitating their learning and strengthening their skills in power electronics control.

Keywords: Control, SIMULINK, dsPIC, Power Electronics.

1. Introduction

Il est difficile pour les enseignants d'intégrer de manière simple et concise les nouvelles technologies de contrôle et commande dans les cours d'électronique de puissance. Cet article propose une solution simple et à bas coût combinant des micro-contrôleurs de la famille DSPiC, un outil de simulation Simulink et du matériel pédagogique adapté aux travaux pratiques pour illustrer les principes de régulation les plus fréquemment utilisés en électronique de puissance.

Grâce à ce matériel, les étudiants peuvent rapidement créer des systèmes de contrôle et tester de petits circuits d'électronique de puissance sans avoir besoin de connaissances avancées en programmation. Pour cela, ils utilisent une carte équipée d'un kit Microstick II, ainsi que des composants et conditionneurs pour traiter les signaux et gérer la puissance. L'utilisation de Simulink et des outils de réglage PID de MATLAB permet aux étudiants de concevoir et améliorer leurs systèmes de manière intuitive. Cette approche, enseignée en Master 2, facilite la transition entre la simulation et l'application concrète.

Ce document explique tout le processus de la modélisation initiale avec SIMSCAPE à la mise en pratique, en passant par la simulation et le réglage des paramètres. Il montre comment cette méthode aide les étudiants à mieux comprendre l'électronique de puissance en leur offrant une expérience proche du monde industriel.

2. La bibliothèque Simulink

Le cœur du système de régulation est donc basé sur l'utilisation d'un microcontrôleur DSPIC, d'une bibliothèque SIMULINK gratuite permettant de programmer le microcontrôleur sous simulink et de matériel pédagogique disponible en salle de travaux pratiques (Figure 1) pour réaliser des régulations numériques et mettre en œuvre de petits convertisseurs en travaux pratiques et en projets.

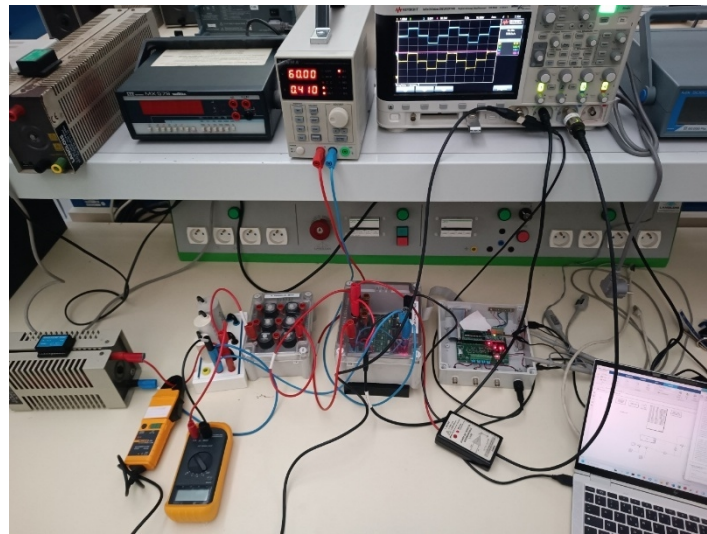


Figure 1. Mise en œuvre matérielle

La bibliothèque SIMULINK [1,2] a été développée par Lubin Kerhuel aux alentours de 2009 dans ses premières versions. Elle permet de créer des applications autonomes à partir d'un modèle à temps discret représenté dans Simulink et de générer, compiler et charger le code de l'application sur la carte cible. De nombreux dsPIC33 et microcontrôleurs PIC32 et SAM (650 à ce jour) développés par Microchip sont pris en charge. Les blocs de la bibliothèque fournissent une interface graphique pour configurer les périphériques de microcontrôleurs Microchip de la famille DSPIC tels que ADC, QEI, PWM, IC, OC, CN, I2C, SPI, UART, Ampli-op, Comparateur, DAC... et peut être téléchargée à l'adresse :

<https://github.com/MPLAB-Blockset/MPLAB-Device-Blocks-for-Simulink>

Aucune connaissance spécifique en programmation n'est requise. L'ensemble des blocs permet un prototypage rapide sur les cartes équipées d'un dsPIC ou d'un MCU pris en charge. Une

connaissance minimale du fonctionnement d'un microcontrôleur et de ses périphériques est toutefois un avantage.

3. La carte de controle développée

Pour que les étudiants puissent développer leur propre convertisseur régulé en courant ou en tension ou encore régulé avec une double boucle courant-tension, nous avons développé une petite carte supportant un kit Microstick II (DSPIC33FJ128MC802) [3] associé à des conditionneurs analogiques permettant d'utiliser directement les sondes disponibles en salle de TP (courant x 10 et tension x 100) et à une interface permettant de piloter et alimenter un bloc de puissance multi-fonctions [4,5]. La carte Microstick II est montée sur un support DIL28 pour pouvoir être remplacée facilement, la carte de fond de panier comprend 4 entrées analogiques sur des BNC et les conditionneurs d'entrée reliés à ces BNC peuvent être utilisés en amplificateurs non inverseurs, en amplificateurs différentiels ou encore en suiveurs avec un étage d'entrée diviseur en configurant des cavaliers. La carte embarque également 3 leds a disposition de l'utilisateur, une interface pour un codeur incrémental et une interface RS232 vers USB. Le bloc de puissance peut générer un signal d'arrêt d'urgence en cas de défaut qui est relié directement à l'entrée halt de l'unité PWM du microcontrôleur. L'ensemble est placé dans un boîtier PLEXO avec un couvercle transparent (figure 2).

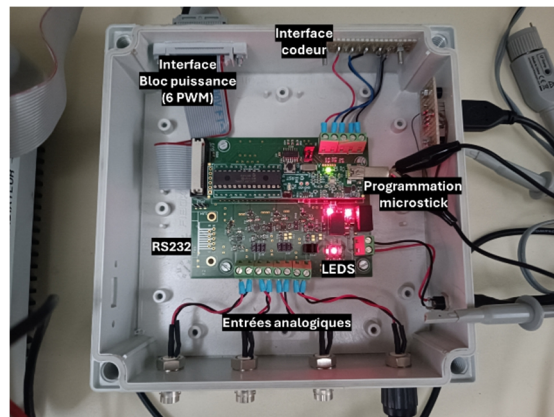


Figure 2: photographie de la carte

4. Utilisation de l'ensemble

L'avantage de cette bibliothèque simulink est qu'elle peut être utilisée en conjonction avec les outils de réglage de PID (PI dans le cas de l'exemple choisi ci-après) qui permettent le calcul automatique des gains proportionnels et intégral, pour peu que l'on dispose d'un modèle assez fidèle du système que l'on cherche à réguler. L'usage de cet outil est enseigné en M2 en TP d'électronique de puissance au cours d'une séance de 3H.

Pour l'exploiter pleinement, la première étape consiste à établir un modèle précis du système à réguler, avec l'aide de la librairie SIMSCAPE, ici un hacheur abaisseur (figure 3). Ce hacheur se compose d'un bloc de puissance qui fournit un bras d'onduleur utilisé pour réaliser la cellule de commutation, d'une boîte contenant des inductances de 470uH pouvant être associées en série et parallèle (3 ensembles de deux inductances en série avec un point milieu), chaque inductance peut supporter un courant de 4A. Un bloc de condensateurs pouvant être associés

en parallèle (5+10+20uF) pour un total de 35uF (l'ensemble est visible sur la photographie de la figure 1).

La régulation présentée dans l'exemple de base vu en TP est une régulation de courant. Dans le modèle (Figure 3), sont également représentés la pince de courant x10, ainsi que le filtre passe bas (RC, $F_c = 10\text{kHz}$ à -3dB) qui lui est associé. Le convertisseur Analogique numérique du DSPIC est représenté par un gain de 1023/3.3 (plage d'entrée du convertisseur A/D égale à 0-3,3V sur 10 bits) et le modulateur MLI du DSPIC qui fonctionne à une fréquence de 20kHz est quant à lui représenté par un gain de 1/3999 (0 pour 0% et 3999 pour 100%) afin d'être compatible avec le bloc PWM de SIMSCAPE dont la plage d'entrée va de 0 à 1. (Il est à noter que la plage numérique de rapport cyclique et donc la précision de ce dernier dépend de la fréquence de découpage dans les DSPIC, pour simplifier plus la fréquence de découpage est élevé plus le nombre de bits du rapport cyclique est faible).

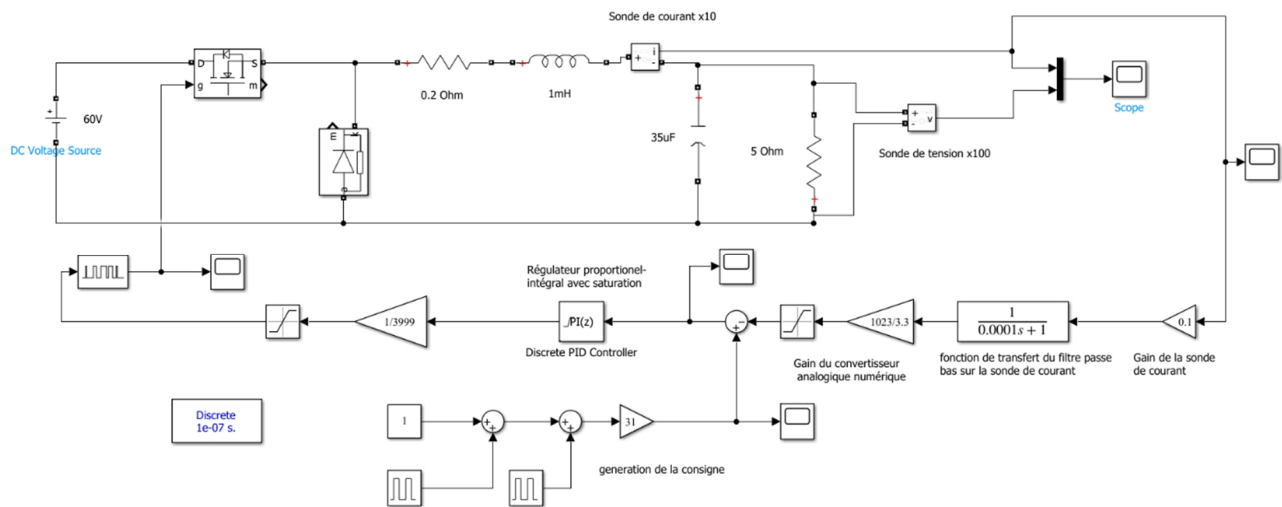


Figure 3: le modèle Matlab de référence utilisé pour la simulation du convertisseur

Une fois tous les éléments en place, une première simulation peut être faite en boucle ouverte pour que les étudiants vérifient la justesse de leurs calculs de dimensionnement qui font partie de la préparation du TP qu'ils doivent faire chez eux. Dans l'énoncé les étudiants sont guidés pour naviguer dans l'explorateur de bibliothèques de SIMULINK qui peut s'avérer dense lors d'une première utilisation car tous n'ont pas l'expérience de SIMULINK. Ils sont donc guidés pour la saisie du schéma avec la boucle complète par l'enseignant, mais sans le PI dans un premier temps. La boucle de retour est ouverte juste après le comparateur d'erreur et la sortie du PI est remplacée par une constante comprise entre 0 et 3999). Ils observent alors les différentes grandeurs (courant dans l'inductance, ondulations de courant et de tension, etc.). Cela permet également de faire le lien entre les valeurs des grandeurs de commande et les valeurs attendues en sortie du convertisseur analogique-numérique, ce qui aura une certaine importance lors de l'utilisation de l'outil de calcul de PID de MATLAB qui demande d'avoir bien conscience des plages d'évolution de ces grandeurs.

5. Outil de calcul de PID

Lorsque cette simulation est pleinement fonctionnelle on peut invoquer l'outil de calcul automatique de PID de MATLAB, son utilisation se fait en 3 étapes. En premier lieu, le système étant non linéaire en raison de son fonctionnement en commutation, l'outil a besoin de linéariser le système et ouvre (automatiquement) la boucle de régulation au niveau du PI pour faire un test permettant d'obtenir la réponse à l'échelon du convertisseur (il applique donc un step en sortie du PI déconnecté et récupère ce qui arrive à l'entrée du régulateur. Les étudiants doivent paramétrer l'instant de début du step, sa durée et son amplitude. C'est une difficulté pour eux car ce step représente une variation brusque de rapport cyclique et il leur est parfois difficile de faire le lien entre le rapport cyclique compris entre 0 et 1 et la valeur numérique en entrée du modulateur PWM, entre 0 et 3999). Cette réponse (figure 4, droite) est alors utilisée pour calculer une fonction de transfert qui servira de base au calcul des paramètres du PI. Enfin, la dernière étape permet d'ajuster les paramètres du PI en jouant sur la rapidité escomptée de la réponse ainsi que sur des critères de robustesse ou d'agressivité de cette même réponse (figure 4, gauche).

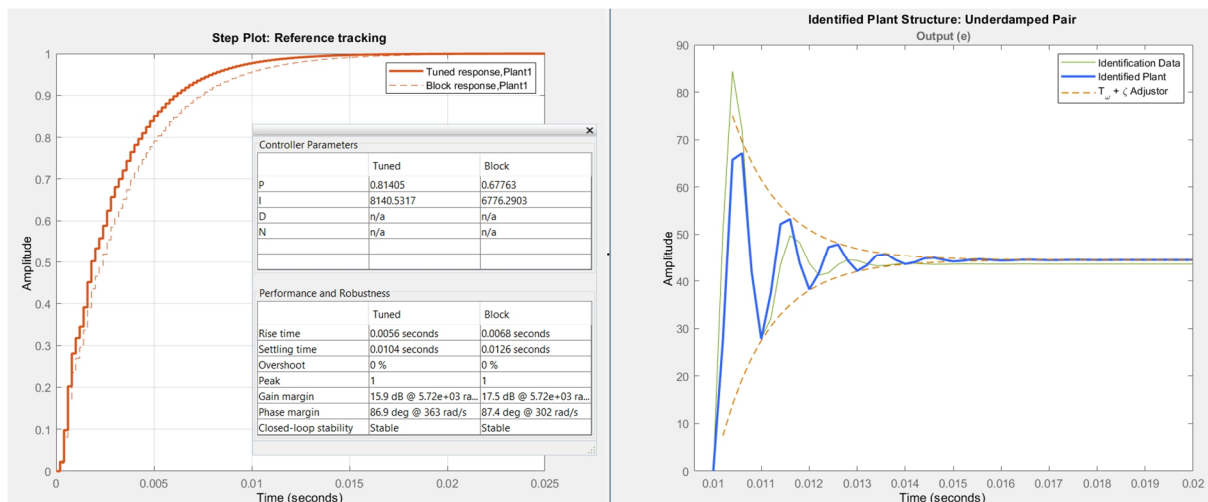


Figure 4: à gauche, réponse escomptée du PI et réponse simulée du PI, à droite en vert : réponse à l'échelon, réponse de la fonction de transfert calculée en bleu.

Une fois les paramètres calculés et rentrés dans la simulation SIMULINK de référence on obtient un premier résultat de simulation qui est aussi proche que possible du résultat que l'on souhaite avoir en réel et, qui peut toujours être affiné par la suite avec l'ajout d'éléments parasites et des caractéristique spice des composants semi-conducteurs. Dans la simulation de cet exemple nous avons utilisé une consigne en créneau d'une période de 0,2s avec la séquence suivante 2, 3, 2, 1 ampères pendant 50 ms chacun. Le résultat est montré sur la figure 5.

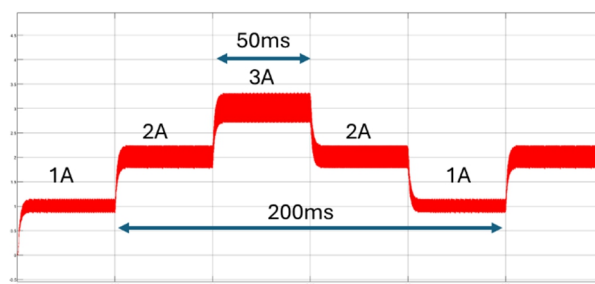


Figure 5: Résultat de la simulation MATLAB (ampères en ordonnées et temps en abscisses)

Le bloc PI peut alors être directement collé dans le programme (graphique dessiné sous SIMULINK avec les éléments de la bibliothèque relative aux DSPIC) qui doit aller dans le microcontrôleur. Comme le montre la figure 6, celui-ci se compose d'un bloc servant à décrire les paramètres généraux du microcontrôleur (source d'horloge, boot, pll etc...) et de blocs dédiés à chaque périphérique utilisé (convertisseur A/D, PWM et commande de sortie I/O numérique dans notre exemple). Les autres blocs (le PI, les gains, les sommateurs et les générateurs d'impulsions) sont des blocs de la librairie standard de SIMULINK et seront automatiquement convertis en code C lors de la compilation du modèle.

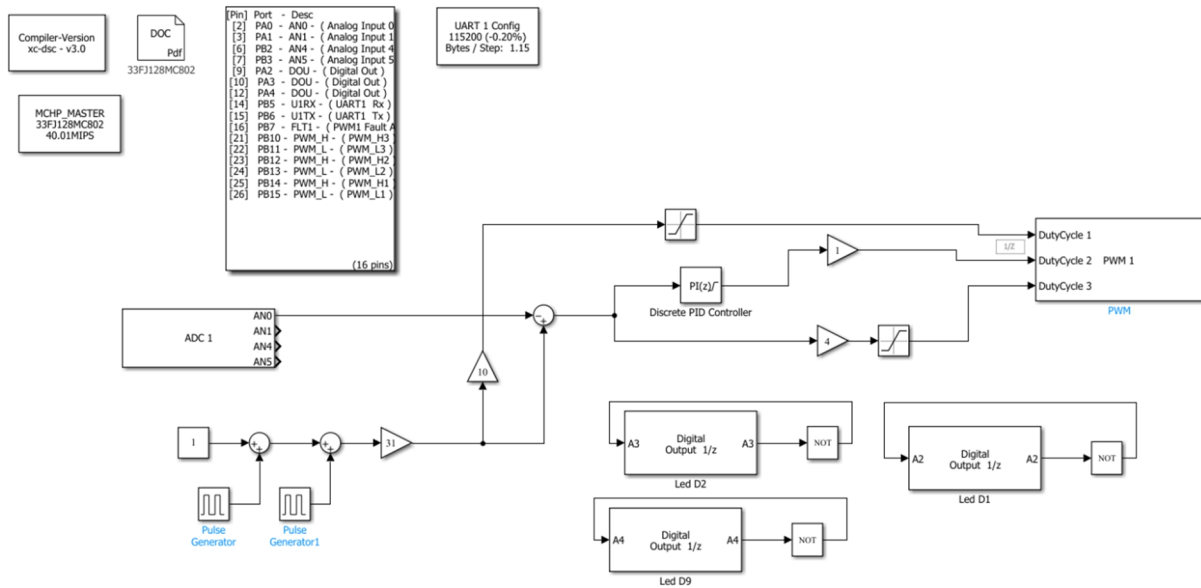


Figure 6: programme SIMULINK en vue de son implémentation dans le DSPiC

Un fichier vierge, servant de template est fourni aux étudiants afin de leur éviter la configuration parfois laborieuse de ces blocs et leur permettre ainsi de se concentrer sur la régulation elle-même, un résumé des broches utilisées est également fourni. On retrouve donc sur ce schéma le convertisseur A/D du microcontrôleur qui échantillonne le courant, les blocs qui génèrent la consigne (mais qui aurait tout aussi bien pu arriver sur une des autres entrées A/D grâce à un GBF ou autre). Le PI est un PI échantillonné basé sur la transformée en Z. Le résultat des calculs effectués dans la boucle de régulation est directement transféré sur le bloc générant la PWM qui est utilisé à la fois pour piloter le bras de pont qui constitue le hacheur mais aussi pour visualiser certaines variables, ici le bras 1 (DutyCycle1, figure 6) est utilisé comme « convertisseur numérique-analogique » à découpage et permet de visualiser la consigne générée au travers d'une sonde de tension et d'un filtre passe bas, le bras 2 (DutyCycle2) pilote donc le bras d'onduleur de notre hacheur, le bras 3 (DutyCycle3) est lui utilisé pour visualiser l'erreur avec la même méthode que sur le bras 1.

Il est important de garder à l'esprit que la périodicité d'exécution des blocs peut être ajustée et qu'ils ne s'exécutent donc pas tous à la même fréquence. La boucle globale dans laquelle ils sont insérés est ici calée sur 10kHz et les acquisitions analogiques-numériques se font à la même fréquence mais, le PI échantillonné fait ses calculs à 5kHz alors que la génération des consignes est à 5 et 10Hz, les leds sont gérées avec des périodes de 0,1s, 0,2s et 0,4s (ce sont simplement des indicateurs de fonctionnement ici). En pratique un petit séquenceur multi-tâches préemptif est implémenté automatiquement dans le microcontrôleur et cadence tout l'ensemble.

6. Résultats expérimentaux

Une fois le microcontrôleur programmé, il est possible de tester directement le système en manipulation.

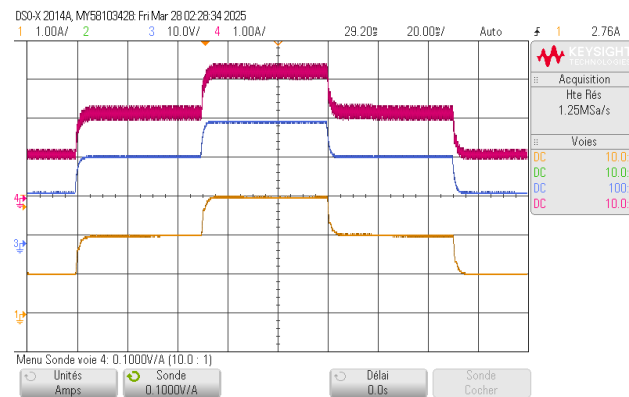


Figure 7: courbe en orange : courant mesuré après le filtre (1A/carreau), courbe en rose courant avant le filtre (1A/carreau), courbe en bleu sortie consigne filtrée(~10V/A)

L'oscillogramme de la figure 7 présente les résultats obtenus avec notre exemple. Cette figure montre que le résultat obtenu est très satisfaisant et conforme à ce qu'on l'on attendait par rapport à la simulation avec le système modélisé sous SIMULINK.

7. Avis des étudiants de M2 3EFS

Le TP est effectué au premier semestre de Master 2 3EFS (Energie Electrique, Environnement et Fiabilité des Systèmes) depuis le début du LMD5. Un sondage (Tableau 1) a été réalisé pour recueillir les avis des étudiants à travers 6 questions notées de 1 à 4, 1 étant un avis totalement négatif et 4 un avis complètement positif).

Tableau 1 : notes moyennes aux questions du sondage

Le TP est-il adapté à l'UE ?	4
La préparation est-elle difficile ?	2
La simulation est-elle compliquée?	3
Après ce TP est-ce difficile de realiser une régulation ?	3
La génération de code est complexe ?	2
Faudrait-il plus de seances ?	4

La figure 8 montre les notes moyennes obtenues pour chaque question (18 étudiants sondés). A l'unanimité il faudrait d'avantages de séances pour tout assimiler mais le TP est bien adapté à l'UE.

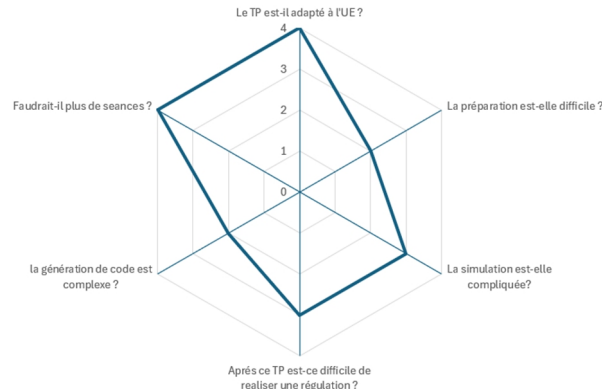


Figure 8: Moyenne des notes obtenues aux questions

8. Conclusion

L'association de cette maquette à très bas coût (<150€), des bibliothèques dédiées au microcontrôleur DSPiC et de SIMULINK permet donc de prototyper très rapidement (sur une séance de 3H de TP, une fois que les étudiants ont été entraînés à cette technologie) des petits systèmes d'électronique de puissance et de réaliser des projets régulés en tension et/ou en courant et plus seulement des systèmes en boucle ouverte.

Il faut toutefois noter que l'utilisation de cet outil est liée à l'acquisition des licences MATLAB des différentes toolboxes appelées par l'outil de calcul de PID (simulink control design toolbox) et par le blockset microchip MPLAB (Embedded Coder, Matlab Coder, Simulink Coder). L'installation de MPLAB et du compilateur pour DSPiC (tous deux gratuits) est également nécessaire. Bien qu'il n'y ait pas de réelles limitations pédagogiques à l'utilisation de ce système d'apprentissage, les impératifs logiciels peuvent donc être un frein à son déploiement à grande échelle (une dizaine de postes pour un groupe de TP de 10 binômes), notamment en raison des nouvelles politiques de licence de MATHWORKS.

Références

- [1] <https://lubin.kerhuel.eu/>, site web de Lubin Kerhuel, Microchip, consulté le 24/03/2025.
- [2] <https://rcp.ctrl-elec.fr/>, site web de Romain DELPOUX, Insa Lyon, consulté le 24/03/2025
- [3] <https://www.microchip.com/en-us/development-tool/dm330013-2>, site web de Microchip, MICROSTICK II, consulté le 24/03/2025
- [4] J.-J. HUSELSTEIN, T. MARTIRE, *Ensemble pédagogique expérimental hacheur onduleur*, CETSIS2005, Nancy, 25-27 octobre 2005, 6 pages
- [5] Huselstein, J.-J & Martiré, Thierry. (2006). *Ensemble pédagogique expérimental hacheur onduleur*. J3ea. 5 HORS SÉRIE 2. 10.1051/j3ea:2006048.

Biographie des auteurs

Thierry Martiré : maître de conférences, enseigne depuis 2006 dans le département EEA de la Faculté des Sciences de l'Université de Montpellier et est rattaché à l'Institut d'Électronique et des Systèmes, au sein du groupe de recherche en Génie Électrique, Matériaux et Systèmes. Diplômé d'un doctorat en 2001 sur le thème de l'électronique de puissance pour les énergies renouvelables, ses travaux de recherche concernent l'étude, la modélisation, la commande et la réalisation de convertisseurs de puissance basse tension et forts courants.

Guillaume Pellecier : maître de conférences, enseigne depuis 2022 dans le département EEA de la Faculté des Sciences de l'Université de Montpellier et est rattaché à l'Institut d'Électronique et des Systèmes, au sein du groupe de recherche en Génie Électrique, Matériaux et Systèmes. Diplômé d'un doctorat en 2019 sur le thème de la fiabilité des composants de puissance, ses travaux de recherche concernent l'étude, la modélisation, la commande et la réalisation de convertisseurs de puissance dédiés à l'interconnexion des réseaux électriques.

Philippe Enrici : Maître de Conférences à l'Université de Montpellier et Directeur adjoint du Département Electronique Energie Electrique Automatique. Enseignant en Licence et Master au sein du département EEA et Responsable du Parcours Energie Electrique, Environnement et Fiabilité des Systèmes (3EFS) du Master EEA. Affilié à l'Institut d'Electronique et des Systèmes dans le Groupe Energie et Systèmes, il travaille sur le dimensionnement, la modélisation et la conception d'actionneurs électriques innovants pour l'électrification de système (Avion plus électrique, Motorisation, Energie Eolienne...).

Carole Henaux : professeur des Universités a obtenu son doctorat en 1997 et enseigne dans le département EEA de la Faculté de Sciences de l'Université de Montpellier depuis 2022. Affiliée à l'Institut d'Electronique et des Systèmes dans le groupe de recherche en Génie Electrique, Matériaux et Systèmes, ses recherches sont focalisées sur le dimensionnement d'actionneurs et générateurs électriques innovants principalement dédiés à des systèmes embarqués (aéronautique, automobile, spatial).

Jean-Jacques Huselstein : Jean-Jacques Huselstein est maître de conférences à l'Université de Montpellier, où il enseigne depuis 1994 au sein du département Électronique, Électrotechnique et Automatique (EEA) de la Faculté des sciences. Il est rattaché à l'Institut d'Électronique et des Systèmes (IES), dans l'équipe Génie Électrique, Matériaux et Systèmes (GEMS). Ancien élève de l'ENS Paris-Saclay et agrégé de Génie Électrique (1988), il a soutenu en 1993 une thèse de doctorat à l'Université de Montpellier portant sur la commutation des convertisseurs matriciels. Ses travaux de recherche portent sur le dimensionnement, la réalisation et la commande rapprochée, implémentée sur FPGA, de convertisseurs de puissance multicellulaires..

Etienne briquet et Jean-Pierre Gairaud : techniciens au sein du département EEA de l'université de Montpellier, ils ont en charge l'organisation et la préparation des trois salles de T.P. de Génie Electrique. Ils sont membres à part entière de l'équipe pédagogique de génie électrique et participent activement à la conception et à la mise en place de nouveaux T.P en licence EEA et Master EEA parcours 3EFS (Energie Electrique, Environnement et Fiabilité des Systèmes) ainsi qu'à lka rédaction des documents associés.