



Approche d'ingénierie inverse d'un convertisseur Buck synchrone bidirectionnel en TP EEA*

Michael Bressan^{1*}, Frédéric Thiery¹, Morgane Almerge², Michael Canu², Thierry Talbert¹

¹ Laboratoire PROMES-CNRS, Université de Perpignan Via Domitia, Perpignan, France

² Service PLATINUM, Université de Perpignan Via Domitia, Perpignan, France

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

Résumé : *L'ingénierie inverse est une méthode pédagogique permettant d'analyser et d'évaluer des systèmes électroniques complexes. Cet article présente l'étude d'un convertisseur Buck synchrone bidirectionnel à partir de sa carte PCB dans le cadre d'un TP pour des étudiants en Licence 3 EEA. La démarche inclut l'extraction du schéma électronique avec le logiciel Eagle, l'identification des principaux composants et la reconstitution de l'architecture du circuit : étage de puissance, commande et capteurs de mesure. Une analyse du système de puissance et de la valeur de ses composants a permis d'établir la fonction de transfert et d'évaluer la stabilité du système en fonction des spécifications du cahier des charges. Des tests expérimentaux ont validé les performances du convertisseur, avec mesure du rendement et analyse des oscillogrammes des signaux clés. Les résultats ont été comparés aux modèles théoriques, permettant de valider les performances et d'identifier les limitations du système. Dans un objectif pédagogique, ce travail s'inscrit dans une approche d'Apprentissage Par Projets et par Problème (APP), favorisant une immersion pratique des étudiants. En partant d'un système réel, ils sont amenés à reconstruire les connaissances théoriques et expérimentales nécessaires à la compréhension et à la modélisation du convertisseur. Cette étude met en lumière l'intérêt de l'ingénierie inverse comme outil pédagogique pluridisciplinaire, favorisant une approche appliquée et intégrant théorie et expérimentation*

Mots clés : Ingénierie inverse, électronique de puissance, convertisseur Buck, pédagogie, APP.

Abstract: Article title translated in English

Reverse engineering is a teaching method for analyzing and evaluating complex electronic systems. This article pre-sents the study of a

* Note de bas de page liée au titre de l'article.

bidirectional synchronous Buck converter from its PCB board, as part of a practical course for students in Licence 3 EEA (Electronics, Electrical energy, Automation). The approach includes extracting the electronic schematic with Autodesk Fusion software, identifying the main components and reconstructing the circuit architecture: power stage, control and measurement sensors. An analysis of the power system and its component values enabled us to establish the transfer function and evaluate the system's stability in relation to the specifications. Experimental tests validated the converter's performance, with efficiency measurements and oscillogram analysis of key signals. The results were compared with theoretical models, validating performance and identifying system limitations. With a pedagogical objective in mind, this work is part of a Project and Problem-Based Learning (PBL) approach, favoring hands-on immersion for students. Starting with a real system, they are led to reconstruct the theoretical and experimental knowledge needed to understand and model the converter. This study highlights the value of reverse engineering as a multi-disciplinary pedagogical tool, favoring an applied approach and integrating theory and experimentation

Keywords: Reverse engineering, Power Electronics, Buck converter, Pedagogy, Problem-Based Learning.

Introduction

L'électronique de puissance et sa commande associée sont des domaines fondamentaux dans la conception de systèmes électriques, en particulier pour les applications d'énergie renouvelable, de gestion d'énergie et de véhicules électriques [1]. Les convertisseurs de puissance, comme les convertisseurs Buck synchrones bidirectionnels, sont des éléments clés dans la conversion d'énergie entre différentes formes, tout en maintenant une efficacité élevée et une régulation stable des tensions. Dans un contexte éducatif, l'étude des convertisseurs de puissance offre aux étudiants une opportunité d'approfondir leurs connaissances en électronique de puissance, en commande de systèmes et en instrumentation, à travers l'analyse directe de systèmes réels.

L'ingénierie inverse est une méthode pédagogique particulièrement adaptée à ce type d'étude, car elle permet aux étudiants de déconstruire des systèmes complexes pour en comprendre les principes sous-jacents. Cette approche offre une immersion pratique, leur permettant d'explorer les architectures des circuits, d'analyser les fonctions de commande et de tester les performances du système dans des conditions réelles [2]. Plusieurs études ont montré l'efficacité de cette approche dans l'apprentissage de la conception de circuits électroniques complexes. Par exemple, Les auteurs dans [3] proposent une méthodologie complète pour l'ingénierie inverse des circuits électroniques imprimés, en partant de l'imagerie du circuit pour extraire un schéma de connexions (netlist). Cette approche permet de reconstruire l'architecture du circuit à partir de l'analyse visuelle et de l'extraction d'informations électriques, facilitant ainsi la compréhension et la reproduction des systèmes électroniques complexes. De plus, [4] explore l'application de l'ingénierie inverse dans la conception et l'analyse des systèmes de contrôle, en permettant aux ingénieurs de déconstruire des systèmes existants pour en extraire des modèles et des stratégies de commande.

Cet article se concentre sur l'étude d'un convertisseur Buck synchrone bidirectionnel dans le cadre d'un TP en Licence 3 EEA, en appliquant une méthode d'ingénierie inverse. Nous présentons la démarche adoptée pour analyser ce système en plusieurs étapes, en combinant la théorie et la pratique pour une meilleure compréhension du fonctionnement du convertisseur. Cette étude se divise en plusieurs sections clés :

- 1) Méthodologie : les étapes de reverse engineering du convertisseur, de l'extraction du schéma électronique à la reconstitution de l'architecture du circuit, sont décrites.
- 2) Analyse du système de commande : nous établissons la fonction de transfert, évaluons la stabilité et analysons la régulation de la tension de sortie.
- 3) Validation expérimentale : les tests réalisés valident les performances du convertisseur, incluant la mesure du rendement et l'analyse des oscillogrammes.
- 4) Discussion des résultats : nous comparons les résultats expérimentaux avec les théories (Matlab/Simulink et Plecs) et discutons des limitations.

Contexte et Objectifs de l'Enseignement

Cet enseignement, sous forme de Travaux Pratiques, sera proposé dans le cadre de la Licence 3 Électronique, Électrique et Automatique (EEA) pour plusieurs matières, telles que l'Électronique de puissance et l'Automatique, à l'Université de Perpignan Via Domitia (UPVD). L'objectif est d'implémenter 6 heures de TP synchrones, complétées par du travail asynchrone. Le public de ce cours, composé d'environ 25 étudiants, provient de formations variées, créant ainsi un groupe hétérogène qui ne se connaît pas forcément, avec une diversité de profils (L2 EEA, BTS, BUT, L2 d'autres établissements) et des connaissances et compétences inégales. Partant de ce constat, le type d'APP présenté par [5] présente un potentiel pédagogique significatif.

L'APP est définie comme « une stratégie pédagogique visant à faire participer les étudiants à des tâches authentiques du “monde réel”, afin d'améliorer l'apprentissage. Les étudiants se voient confier des projets ou des problèmes ouverts comportant plusieurs approches ou réponses, destinés à simuler des situations professionnelles ». Ce type d'APP comporte deux approches : l'approche par projets et l'approche par problèmes. Les deux approches combinées ont un impact sur les méthodes de travail et les attitudes des étudiants, ainsi que sur l'acquisition de nouvelles connaissances.

Cet enseignement, basé sur l'ingénierie inverse d'un convertisseur Buck synchrone bidirectionnel, utilisera donc l'APP avec une prédominance pour l'approche par problèmes. Elle permettra aux étudiants, en groupes de deux, de partir d'un cas concret pour remonter jusqu'à la théorie, et ainsi mieux appréhender les connaissances fondamentales de la matière afin d'être ensuite en mesure de réaliser des simulations. Selon l'étude [6] sur une réforme à l'Université catholique de Louvain, l'APP dans la formation des ingénieurs présente plusieurs avantages, comme l'amélioration de l'autonomie et la responsabilisation des étudiants, leur engagement et leur motivation, ou encore l'amélioration des performances d'apprentissage.

L'objectif de cet enseignement est d'améliorer l'apprentissage des étudiants en utilisant l'APP avec un accent sur l'approche par problèmes. Cette méthode nécessite toutefois un certain temps d'adaptation de la part des étudiants. Pour répondre à ce double objectif, d'amélioration des apprentissages et d'augmentation du temps de travail, un format hybride pourra être proposé. En effet, plusieurs méta-analyses [7-9] montrent l'intérêt d'hybrider

l'enseignement du point de vue de l'apprentissage des étudiants. Cette approche les implique davantage et les mobilise différemment par rapport au format présentiel classique.

Méthodologie de l'Étude du Convertisseur Buck Synchron Bidirectionnel

1.1. Présentation du Convertisseur

Le convertisseur Buck synchrone bidirectionnel est un système de conversion de puissance très utilisé dans les applications de gestion d'énergie, offrant une haute efficacité grâce à sa capacité de fonctionner dans les deux sens. Ce convertisseur abaisseur de tension utilise des transistors MOSFET pour les commutations, des inductances pour le stockage d'énergie, ainsi qu'un circuit de commande pour réguler la tension de sortie. Le schéma général d'un convertisseur Buck est représenté dans la Figure 1. En pratique la diode sera remplacée par un deuxième MOSFET.

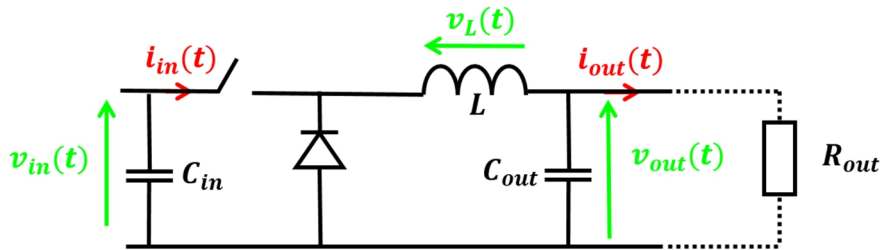


Figure 1. Schéma électrique du convertisseur Buck

Les paramètres du convertisseur Buck synchrone sont décrits dans le tableau 1.

Tableau 1 : Caractéristiques électriques du convertisseur Buck

Caractéristiques	Valeurs
Puissance (W)	300W
Fréquence, F_s (kHz)	100
Rapport cyclique, D (%)	64
Bobine, L (μ H)	20
Condensateur d'entrée, C_{in} (μ F)	100
Condensateur de sortie, C_{out} (μ F)	110

1.2. Processus de l'ingénierie inverse sur le PCB

Le travail commencera par l'extraction du schéma électronique du convertisseur à partir de sa carte PCB à l'aide du logiciel Autodesk Fusion. Cette étape permettra de reconstituer l'architecture du circuit, en identifiant les composants clés et leur agencement :

- 1) Étage de puissance : composants clés tels que les MOSFET, les inductances et les condensateurs.
- 2) Étage de commande : composants de régulation, tels que les circuits de contrôle et les capteurs de rétroaction.

- 3) Capteurs de mesure : dispositifs permettant la mesure de la tension, du courant et de la température pour assurer un bon fonctionnement et une sécurité optimale.

Les étudiants devront reconstituer le montage de puissance illustré aux Figures 2 et 3 en identifiant les composants, en suivant les pistes du circuit imprimé et en s'appuyant sur la nomenclature du PCB. Cette étape leur permettra d'identifier les éléments passifs et actifs afin de reconstruire le schéma du circuit présenté à la Figure 1.

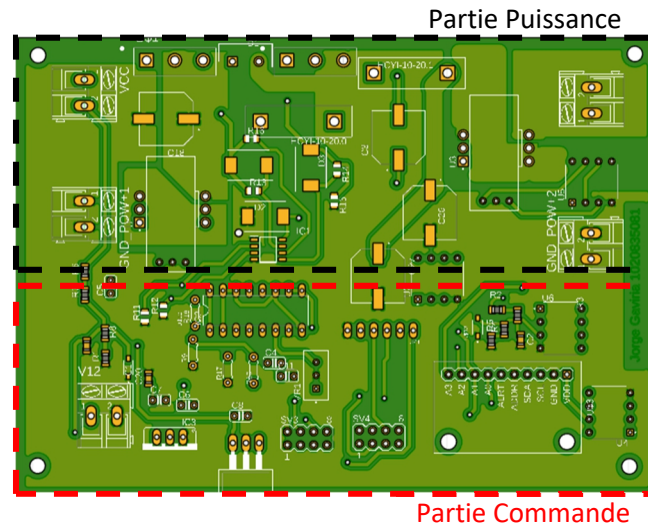


Figure 2. Face avant du PCB du convertisseur buck

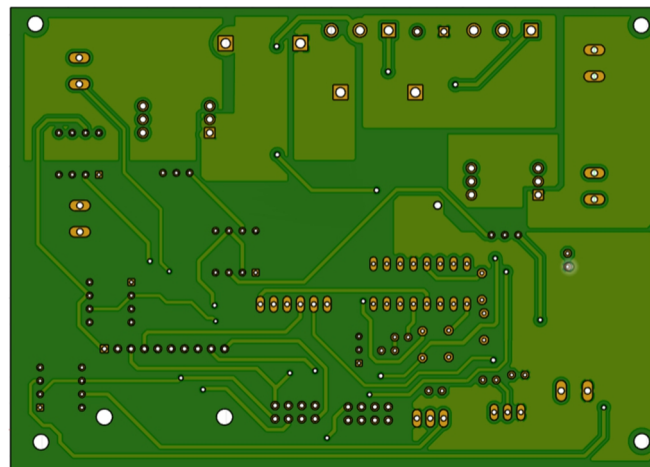


Figure 3. Face arrière du PCB du convertisseur Buck

1.3. Modélisation mathématique du convertisseur

La deuxième étape consistera à déterminer le modèle non linéaire du convertisseur durant une période de fonctionnement en utilisant des méthodes d'analyse de circuit comme par exemple la loi des mailles et la loi des nœuds. Les étudiants analyseront le circuit de la Figure 1 en deux étapes :

- 1) Lorsque $t \in [0; D * T_{sw}]$, l'interrupteur du MOSFET « HIGH SIDE » est en mode ON. La diode est remplacée par un MOSFET « LOW SIDE » qui sera en mode OFF. Le schéma équivalent sur une demi période est représenté par la Figure 4.

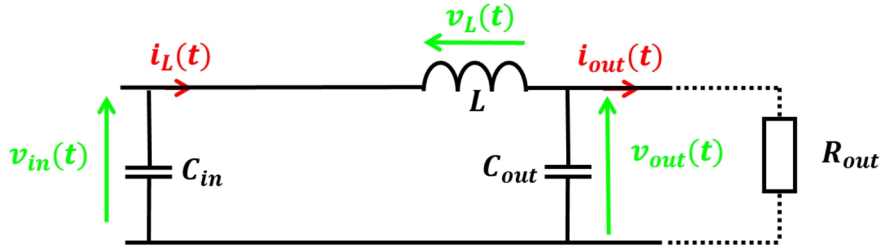


Figure 4. Schéma équivalent du convertisseur Buck lorsque $t \in [0; D * T_{sw}]$

Les étudiants seront accompagnés afin de déterminer les variables d'état du convertisseur soit $v_{out}(t)$ et $i_L(t)$. Grâce à l'analyse de Kirchhoff, les étudiants devront déterminer ce système d'équation :

$$\begin{cases} \frac{di_L(t)}{dt} = \frac{1}{L} * (v_{in}(t) - v_{out}(t)) \\ \frac{dv_{out}(t)}{dt} = \frac{1}{C_{out}} * \left(i_L(t) - \frac{v_{out}(t)}{R_{out}} \right) \end{cases} \quad (1)$$

- 2) Lorsque $t \in [D * T_{sw}; T_{sw}]$, l'interrupteur du MOSFET « HIGH-SIDE » est en mode OFF et le MOSFET « LOW-SIDE » en mode ON. Le schéma équivalent du circuit dans cette période est représenté dans la Figure 5.

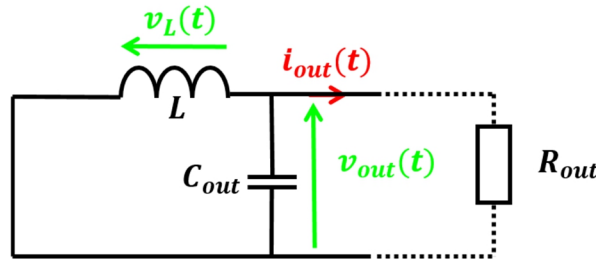


Figure 5. Schéma équivalent du convertisseur Buck lorsque $t \in [D * T_{sw}; T_{sw}]$

Les étudiants seront accompagnés afin de déterminer les variables d'état du convertisseur, soit $v_{out}(t)$ et $i_L(t)$ dans cette demi-période. Grâce à l'analyse de Kirchhoff les étudiants devront déterminer ce système d'équation :

$$\begin{cases} \frac{di_L(t)}{dt} = -\frac{1}{L} * v_{out}(t) \\ \frac{dv_{out}(t)}{dt} = \frac{1}{C_{out}} * \left(i_L(t) - \frac{v_{out}(t)}{R_{out}} \right) \end{cases} \quad (2)$$

L'étape suivante consistera à analyser la commande des transistors et sa synchronisation grâce à des signaux carrés (PWM) complémentés. Le rapport cyclique D est défini comme étant le rapport entre la durée t_1 de conduction du transistor et la période de commutation T_{sw} . La question qui leur est faite ici est de calculer la valeur moyenne du signal représenté dans la Figure 6 et de détailler les calculs.

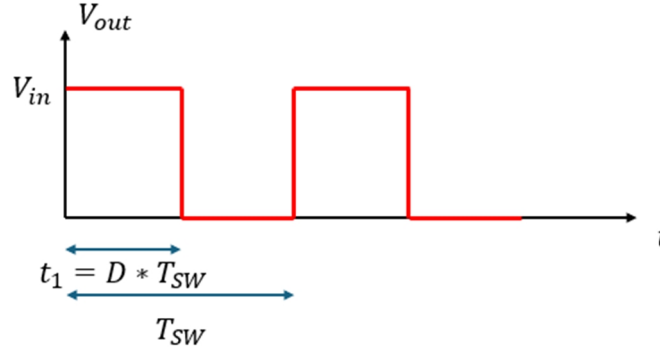


Figure 6. Représentation de l'entrée échelon V_{in} et rapport cyclique T_{sw}

L'obtention du résultat doit donner la relation suivante :

$$\langle V_{out} \rangle = D * V_{in} \quad (3)$$

Les étudiants devront d'abord formuler la définition du convertisseur Buck en analysant la relation entre la tension de sortie, la tension d'entrée et le rapport cyclique. Dans un second temps, ils compareront les deux régimes de fonctionnement sur une période complète (lorsque $t \in [0; T_{sw}]$) en analysant phase par phase : 1) pendant l'intervalle $[0; D * T_{sw}]$; 2) pendant l'intervalle $[D * T_{sw}; T_{sw}]$. La démarche clé consistera à intégrer explicitement le rapport cyclique pour établir les deux équations différentielles $\frac{di_L(t)}{dt}$ et $\frac{dv_{out}(t)}{dt}$. En conclusion, les étudiants démontreront que le convertisseur Buck se comporte comme un système dynamique du deuxième ordre, caractérisé par : 1) une double dépendance temporelle (dérivées première et seconde) ; 2) l'interaction entre inductance et condensateur dans la réponse fréquentielle.

$$\begin{cases} \frac{di_L(t)}{dt} = \frac{1}{L} * (d(t) * v_{in}(t) - v_{out}(t)) \\ \frac{dv_{out}(t)}{dt} = \frac{1}{C_{out}} * \left(i_L(t) - \frac{v_{out}(t)}{R_{out}} \right) \end{cases} \quad (4)$$

Cette partie du cours permettra aux étudiants de maîtriser l'analyse des circuits d'électronique de puissance en appliquant les lois de Kirchhoff pour établir un modèle non linéaire générique du convertisseur en fonction de son rapport cyclique. Ils apprendront à décomposer rigoureusement le fonctionnement du convertisseur en phases ON et OFF selon ce rapport, à formuler les équations différentielles correspondantes à chaque état de commutation, puis à synthétiser un modèle moyen représentant le comportement global. Cette méthode leur permettra de comprendre l'influence du rapport cyclique sur la dynamique du système, ouvrant la voie à une linéarisation autour du point de fonctionnement et à une analyse en petit signal.

Analyse du Système de Commande

1.4. Modélisation mathématique du convertisseur

L'étape suivante consistera à analyser le système de commande du convertisseur à travers la Fonction de Transfert en Boucle Ouverte (FTBO). Cette FTBO permettra de relier l'entrée du système (tension d'entrée) à la sortie (tension de sortie). Elle est cruciale pour évaluer la capacité du convertisseur à maintenir une tension de sortie stable malgré les variations de la charge. Les élèves auront à leur disposition la FTBO du convertisseur. Il est clairement expliqué qu'avant d'obtenir cette FTBO, une étape de linéarisation du système a été établie. Les étudiants compareront et identifieront les paramètres de cette fonction de transfert avec la fonction de transfert générique d'un système de 2eme ordre.

$$H_{BOg}(s) = K \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (5)$$

$$H_{BOconv}(s) = \frac{1/C_{out} * L * V_{in}}{s^2 + \frac{1}{C_{out} R_{out}} s + \frac{1}{L C_{out}}} \quad (6)$$

Les étudiants détermineront d'abord les paramètres clés du système du 2ème ordre de K (gain statique), ω_n (pulsation naturelle) et ζ (coefficient d'amortissement). Dans un second temps, ils proposeront un code MATLAB/Simulink afin d'étudier la stabilité du système. Un exemple de code est fourni ci-dessous :

```
%Tension d'entrée du convertisseur
Vinbuck=8;
%Rapport cyclique du convertisseur
dbuck=0.64;
%Valeur de la bobine
Lbuck=20e-6;
%Valeur du condensateur de sortie
Cbuck=110e-6;
%Valeur de la résistance de sortie
Rout=1.5;

% Valeur de la tension de sortie du convertisseur (5.12V)
Vout = dbuck*Vinbuck;

%Fonction de transfert en boucle ouverte
Cos1=Vinbuck/(Lbuck*Cbuck);
buck=tf([Cos1],[1 1/(Rout*Cbuck) 1/(Lbuck*Cbuck)]);

%Echelon unitaire en entrée pour obtenir la réponse ne sortie
%en fonction du rapport cyclique
step(buck*dbuck)
stepinfo(buck*dbuck)
```

1.5. Etude de stabilité du convertisseur en Boucle Ouverte

Une étude de stabilité sera réalisée conformément au cahier des charges, en se concentrant sur deux aspects principaux : 1) l'analyse de la réponse temporelle ; 2) l'évaluation de la stabilité en BO. L'objectif principal de ce travail est d'analyser et de commenter la dynamique de sortie du convertisseur. La Figure 7 illustre graphiquement cette dynamique obtenue par simulation.

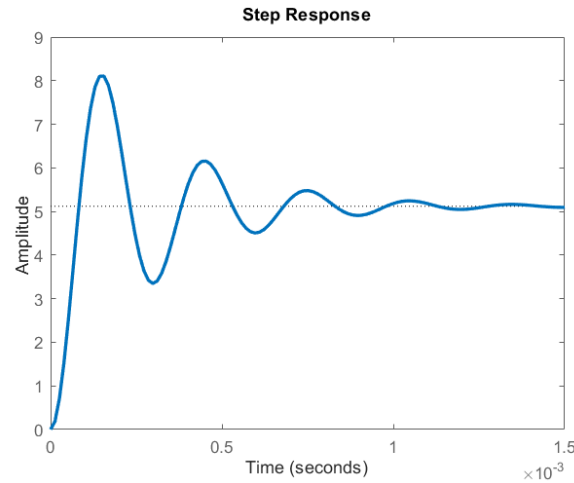


Figure 7. Dynamique de la tension de sortie $v_{out}(t)$ avec une réponse échelon en entrée

Les questions posées sont les suivantes :

- 1) Le système est-il stable ? Justifiez votre réponse.
- 2) Quel régime d'oscillations représente le convertisseur Buck (apériodique ($\zeta > 1$), critique ($\zeta = 1$), pseudo-périodique ($\zeta < 1$) ?
- 3) À partir du graphique, déterminez le temps auquel la première valeur maximale est atteinte après l'entrée du signal (Temps de crête, T_C).
- 4) Déduisez le dépassement maximal en pourcentage par rapport à la valeur finale du système (Dépassement, M_P).
- 5) Identifiez la période des oscillations visibles sur le graphique (Période pseudo-périodique, T_{PP}).
- 6) Déterminez l'amortissement ζ à partir de la décroissance des oscillations.
- 7) Identifiez le temps de stabilisation du système (temps nécessaire pour atteindre $\pm 2\%$ de la valeur finale, T_S).

L'objectif est de permettre aux étudiants d'analyser la réponse temporelle d'un système du second ordre pseudo-périodique. Ils devront déterminer ses paramètres caractéristiques (temps de crête, dépassement maximal, période pseudo-périodique, amortissement, temps de stabilisation) et interpréter leur impact sur la stabilité du système.

Analyse Validation Expérimentale et Analyse des Résultats

Des tests expérimentaux seront effectués pour valider les performances du convertisseur dans des conditions réelles.

1.6. Comparaison entre le modèle pseudo-périodique et les mesures expérimentales

Le premier test expérimental consistera à comparer le comportement du convertisseur Buck en BO avec le modèle simulé sous MATLAB/SIMULINK. Pour ce faire, les grandeurs

électriques clés seront mesurées expérimentalement, puis comparées aux résultats obtenus par simulation.

Le dispositif expérimental que l'étudiant devra mettre en place comprend :

- Une source d'alimentation DC réglable pour alimenter le convertisseur Buck configurée avec une tension d'entrée V_{in} donnée.
- Un générateur de basses fréquences (GBF), utilisé pour générer un signal PWM pilotant le driver du convertisseur, réglé avec le rapport cyclique donné.
- Un oscilloscope numérique, permettant de capturer les formes d'onde de la tension de sortie, du courant de charge et des signaux de commande PWM.
- Une charge variable, réglée à la valeur donnée, utilisée pour analyser l'influence de la charge sur la réponse dynamique du convertisseur

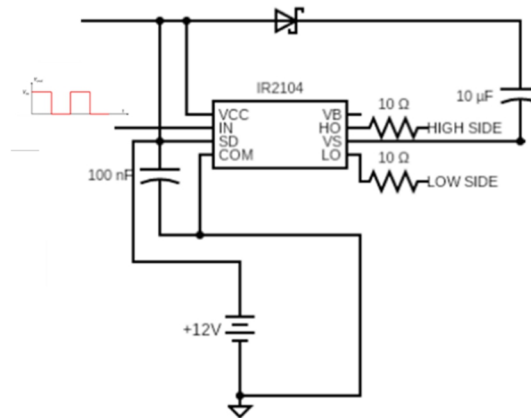


Figure 8. Schéma de connexion de la partie commande sur le PCB

La Figure 8 illustre le schéma de connexion de la partie commande en BO. Le circuit sera mis en place en connectant la sortie du GBF, configurée en signal PWM avec un rapport cyclique de 64% et une amplitude de 10V, à l'entrée du driver (*IN*). L'autre entrée du driver (*SD*), sera maintenue à 12V, tout comme son alimentation (*VCC*). Les sorties *HO* et *LO* du driver sont reliées respectivement aux grilles des transistors « HIGH-SIDE » et « LOW-SIDE ». Le convertisseur Buck sera alimenté sous $V_{in} = 8V$, et la charge variable fixée à 1.5Ω afin d'étudier son impact sur la réponse dynamique.

L'oscilloscope numérique sera utilisé pour capturer la tension de sortie, le courant de charge et le signal PWM, ainsi que pour enregistrer la réponse transitoire après une variation de charge ou de commande.

À partir des oscillogrammes, les étudiants pourront extraire plusieurs paramètres :

- Temps de crête T_C : instant du premier maximum.
- Dépassement maximal M_p : overshoot en %
- Période pseudo-périodique T_{pp} : durée entre deux pics successifs.
- Temps de stabilisation T_S : durée avant d'atteindre $\pm 2\%$ de la valeur finale

- Amortissement ζ : estimé via la décroissance des oscillations.

L'objectif de ce travail est que les étudiants puissent comparer la dynamique observée à celle obtenue par simulation, et commenter les résultats en apportant des informations sur les raisons de ces différences.

1.7. Détermination du rendement du convertisseur

Les groupes d'étudiants, réaliseront l'expérimentation afin de mesurer le rendement du convertisseur en fonction de la puissance de sortie. Chaque groupe commencera par mettre en place le circuit en connectant l'entrée du convertisseur à une source d'alimentation stabilisée et en reliant la sortie à une charge variable. Ils placeront ensuite des sondes de mesure pour capturer les tensions et courants d'entrée et de sortie, tout en configurant l'oscilloscope pour observer les signaux clés, notamment la tension, le courant et le signal PWM.

Une fois l'installation prête, chaque groupe fera varier la charge afin d'obtenir différentes valeurs de puissance de sortie P_{out} . Pour chaque valeur, ils mesureront la tension et le courant d'entrée (V_{in} , I_{in}) ainsi que ceux de sortie (V_{out} , I_{out}), tout en enregistrant les oscillogrammes correspondants. À partir de ces mesures, ils calculeront la puissance d'entrée $P_{in} = V_{in} * I_{in}$, et la puissance de sortie $P_{out} = V_{out} * I_{out}$, puis détermineront le rendement du convertisseur en appliquant la formule $\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$.

Enfin, chaque groupe tracera la courbe représentant l'évolution du rendement en fonction de P_{out} et analysera les résultats obtenus.

A titre d'exemple, la Figure 9 illustre un résultat typique où le rendement augmente rapidement pour les faibles puissances de sortie avant d'atteindre un maximum aux alentours de $P_{out} = 15W$ à $20W$, puis se stabilise. Les étudiants analyseront cette tendance et compareront leurs résultats avec les spécifications du convertisseur afin d'identifier la plage de fonctionnement optimale. Cette démarche leur permettra de mieux comprendre les performances énergétiques d'un convertisseur en conditions réelles et de se familiariser avec les méthodes de caractérisation expérimentale des systèmes électroniques de conversion d'énergie.

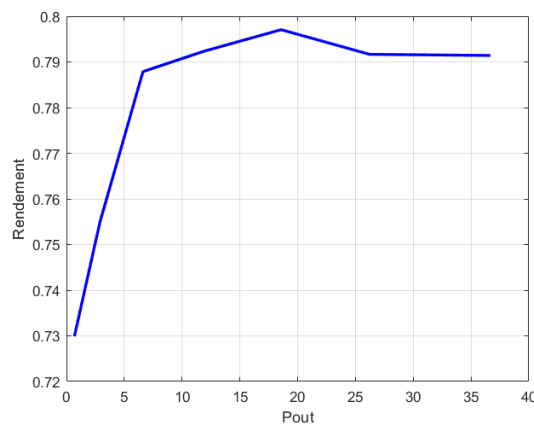


Figure 9. Évolution du rendement du convertisseur en fonction de la puissance de sortie P_{out}

Retour des Etudiants

Afin d'évaluer l'efficacité et la pertinence de cette méthodologie, un premier test est actuellement mené avec un étudiant de L3 EEA. Son expérience servira à identifier les points forts et les éventuelles difficultés rencontrées au cours du TP et des questions qui lui sont posées. Un questionnaire de perception sera ultérieurement administré pour recueillir ses impressions sur l'organisation, la clarté des consignes, l'équilibre entre autonomie et encadrement, ainsi que l'impact de cette approche sur sa compréhension des notions abordées. Les résultats de cette enquête permettront d'ajuster et d'optimiser la démarche avant une généralisation auprès d'un plus large public étudiant.

Conclusion

Cette proposition de TP basée sur l'approche d'ingénierie Inverse représente une approche innovante et adaptée aux nouvelles attentes pédagogiques. En combinant des activités pratiques et numériques, elle favorise l'engagement des étudiants tout en optimisant l'acquisition des compétences visées dans les disciplines concernées. La méthodologie mise en place permet non seulement une flexibilité d'apprentissage, mais aussi une meilleure assimilation des concepts grâce à l'alternance entre autonomie et encadrement. L'expérimentation en cours avec un étudiant test fournira des retours précieux afin d'affiner et d'améliorer encore cette approche avant une mise en œuvre plus large.

Comme travaux futurs, l'hybridation pourrait inclure une plateforme d'accès à distance aux TP, permettant aux étudiants d'entrer les données des convertisseurs à distance et de visualiser les résultats graphiques en temps réel. Cette solution offrirait une flexibilité accrue, favoriserait l'apprentissage autonome et faciliterait l'encadrement par les enseignants, contribuant ainsi à l'amélioration des compétences des étudiants.

Références

- [1] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications and Design*. John Wiley & Sons, 2003.
- [2] R. W. Messler Jr., *Reverse Engineering: Mechanisms, Structures, Systems & Materials*, 1st ed. McGraw-Hill Education, 2014.
- [3] A. T. Erozan, M. Hefenbrock, M. Beigl, J. Aghassi Hagmann, and M. B. Tahoori, "Reverse engineering of printed electronics circuits: From imaging to netlist extraction," *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 15, pp. 475-486, 2020, doi: 10.1109/TIFS.2019.2922237.
- [4] D. Alazard, *Reverse Engineering in Control Design*. John Wiley & Sons, 2013.
- [5] R. Donnelly and M. Fitzmaurice, "Collaborative project-based learning and problem-based learning in higher education: A consideration of tutor and student role in learner-focused strategies," in *Emerging Issues in the Practice of University Learning and Teaching*, G. O'Neill, S. Moore, and B. McMullin, Eds., 2005, pp. 87-98.
- [6] M. Frenay, B. Galand, and A. Laloux, "L'approche par problèmes et par projets dans la formation des ingénieurs à l'UCL : une formation professionnalisante," in *L'université peut-elle vraiment former les enseignants : Quelles tensions ? Quelles modalités ? Quelles conditions ?*, R. Étienne, Ed., 2009, pp. 161-179.

- [7] B. Means, Y. Toyama, R. Murphy, and M. Baki, "The effectiveness of online and blended learning: A meta-analysis of the empirical literature," *Teachers College Record*, vol. 115, no. 3, pp. 1–47, 2013.
- [8] R. M. Bernard, E. Borokhovski, R. F. Schmid, R. M. Tamim, and P. C. Abrami, "A meta-analysis of blended learning and technology use in higher education: From the general to the applied," *Journal of Computing in Higher Education*, vol. 26, no. 1, pp. 87–122, 2014.
- [9] Q. Liu et al., "The Effectiveness of Blended Learning in Health Professions: Systematic Review and Meta-Analysis," *Journal of Medical Internet Research*, vol. 18, no. 1, p. e2, 2016,

Biographie des auteurs

Michael Bressan a obtenu son doctorat en génie électrique à l'Université de Perpignan, France, en 2014. Il est actuellement maître de conférences à l'Université de Perpignan, où il enseigne et mène des recherches dans les domaines du génie électrique et des systèmes d'énergie renouvelable. Il a auparavant occupé le poste de professeur assistant à l'Universidad de los Andes, à Bogotá (Colombie), où il a dirigé le projet KIOSOL sur le développement d'un prototype de micro-réseau urbain intelligent à petite échelle. Ses travaux de recherche antérieurs incluent une activité au LAAS-CNRS de Toulouse sur la modélisation de l'énergie solaire et la gestion optimale des flux énergétiques, ainsi que des recherches appliquées sur les systèmes embarqués avec PulsarInnovation. Ses intérêts de recherche actuels portent sur les outils pédagogiques pour l'enseignement des énergies renouvelables, les applications de l'apprentissage automatique à la performance des systèmes photovoltaïques, l'électronique de puissance pour les infrastructures de recharge de véhicules électriques, ainsi que la simulation et le déploiement de micro-réseaux en courant continu hors réseau dans les zones rurales.

Frédéric Thiery est diplômé en 2003 en électronique, énergie électrique et automatique de l'Université des Sciences de Montpellier et a obtenu en 2006 un doctorat en sciences de l'ingénieur à l'Université de Perpignan. Actuellement maître de conférences au laboratoire PROMES du CNRS, il occupe également depuis 2021 le poste de doyen de la Faculté des Sciences Exactes et Expérimentales de l'Université de Perpignan Via Domitia (UPVD). Ses enseignements portent principalement sur l'automatique, les capteurs et l'électronique numérique. Ses recherches concernent le contrôle, la modélisation, la supervision et la détection de défauts, avec un intérêt particulier pour l'application de techniques d'intelligence artificielle, comme la logique floue, aux problématiques environnementales, ainsi que pour le traitement d'images appliqué à l'estimation et à la prévision de l'irradiance solaire. Il développe également des algorithmes de contrôle pour la gestion des sources d'énergie dans les réseaux intelligents.

Michaël Canu est Docteur en Didactique de la Physique (Paris 7) et membre associé du laboratoire de didactique André Revuz (UR4434). Après avoir été professeur associé en automatique et électronique à la faculté d'ingénierie de l'université de Los Andes et El Bosque en Colombie, et responsable du groupe de recherche GIIE STEM+B, exerce comme conseiller pédagogique à l'université Perpignan Via Domitia.

Morgane Almerge, titulaire d'un Master MEEF Pratiques et Ingénierie de la Formation parcours Conseil et Ingénierie pour l'Enseignement Supérieur est ingénieure pédagogique à l'Université de Perpignan Via Domitia (UPVD). Elle œuvre depuis plus de douze ans à l'accompagnement des enseignants-chercheurs pour leur développement professionnel. Référente en matière de formation, d'hybridation et d'innovation pédagogique, elle a contribué à la structuration, dans le service Platinium de l'UPVD, du pôle d'accompagnement à la

pédagogie et au numérique, qu'elle a co-dirigé entre 2021 et 2023. Ses travaux s'inscrivent dans une démarche de valorisation des pratiques pédagogiques et d'amélioration continue de l'enseignement supérieur. Elle est également impliquée dans la réponse à des appels à projets pédagogiques, la conception de formations pour les enseignants, et la diffusion de la recherche en pédagogie universitaire.

Thierry Talbert a obtenu son doctorat en génie électrique à l'Université de Montpellier, France, en 2001. Il est actuellement maître de conférences, habilité à diriger les recherches au laboratoire PROMES-CNRS / Université de Perpignan Via Domitia. Il enseigne et mène des recherches dans les domaines de l'électronique de puissance et des systèmes à énergie renouvelable. Il est responsable de la licence E.E.A. de l'Université de Perpignan Via Domitia depuis 2004 et responsable de l'équipe de recherche « *SIRE-Systèmes d'Interconnexion au Réseau Électrique* » depuis 2016. Ses activités de recherche portent principalement sur les structures de conversion de l'électricité, la modélisation des réseaux d'énergie, l'architecture des réseaux électriques incluant le MVDC mais aussi l'apprentissage par projet et par problèmes en enseignement.