

# Collaboration Industrielle et Enseignement par Projet en Electronique de Puissance

F.Plumier, P.Bleus, C.Geuzaine  
f.plumier@ulg.ac.be

Université de Liège, Institut Montefiore (B28), Applied and Computational Electromagnetics (ACE)  
B-4000 Liège (Belgique)

**RESUME :** Pour la première fois au cours de l'année académique 2007-2008, une réalisation complète d'un convertisseur DC/DC, sur base des seules spécifications, a été demandée aux étudiants qui suivent à l'Université de Liège le cours de base d'Electronique de Puissance (30h+30h). Ce dispositif pédagogique très réaliste a permis aux étudiants d'être plus autonomes, de se former à la gestion de projet ainsi qu'au travail en équipe. Après adaptation, cette approche sera appliquée à un Baccalauréat de Promotion Sociale en électronique.

**Mots clés :** dispositif pédagogique, transfert de savoir-faire, retour d'expérience.

## 1 INTRODUCTION

L'application du décret de Bologne a impliqué une réorganisation des cours dispensés dans les Universités et Hautes Ecoles. C'est dans ce contexte qu'un cours d'Electronique de Puissance a été confié à l'Université de Liège à Paul Bleus, directeur R&D de la société CE+T basée à Liège, leader mondial des onduleurs pour applications de télécommunications, avec Frédéric Plumier comme assistant. Ce cours est dispensé au sein du service « Applied and computational Electromagnetics (ACE) » du Professeur Geuzaine.

Dans les matières techniques, une grande place est toujours accordée à la théorie. En électronique de puissance notamment, la complexité des phénomènes en jeu implique de passer un temps considérable à leur étude théorique. Cette étude, absolument nécessaire, risque parfois non seulement de rebuter certains étudiants, mais également de leur donner une vision fort abstraite de l'électronique, si une juste place n'est pas accordée à la réalisation pratique de circuits.

C'est pourquoi il est primordial qu'une place de choix soit réservée au dimensionnement, à la simulation ainsi qu'à la réalisation de circuits électroniques. Dans le cadre d'un cours, cela peut être fait par une approche par projet, incluant ainsi en plus pour les étudiants un travail en équipe, dont l'apprentissage est précieux.

Dans cet article, nous présentons de façon détaillée les projets soumis aux étudiants, avec un exemple d'énoncé et la succession des étapes du travail. Nous poursuivons ensuite avec l'intérêt de la méthode, puis avec quelques « règles de bonne pratique » à respecter pour une mise en œuvre réussie de cette méthode d'apprentissage par projet. Enfin est discutée la possibilité d'une application de la méthode à d'autres niveaux d'enseignement.

Article disponible sur le site <http://www.j3ea.org> ou <http://dx.doi.org/10.1051/j3ea:2008056>

## 2 PRESENTATION DES PROJETS

### 2.1 Exemple d'énoncé

Les quatre énoncés proposés en 2007-2008 incluaient les convertisseurs suivants :

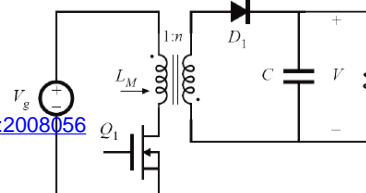
- Buck-Boost bidirectionnel
- Forward
- Cuk
- Flyback (énoncé donné ci-dessous)

Réaliser un convertisseur destiné à alimenter des drivers. Il a comme entrée une tension continue entre 7 et 15V et devra pouvoir fournir 5W maximum en sortie. Les deux sorties ont une tension continue de 15V, et sont isolées entre elles. Les deux tensions doivent être régulées avec une précision de +/- 3%.

Spécifications du convertisseur à réaliser

Puissance de sortie	5 W
Tension d'entrée minimum	7 V
Tension d'entrée maximum	15 V
Tension de sortie 1	15 V
Ondulation max de la tension de sortie $\Delta V_1$	1 %
Tension de sortie 2	15 V
Ondulation max de la tension de sortie $\Delta V_2$	1 %
Fréquence de découpage	entre 25 et 250 kHz
Tension d'isolation entre enroulements	1,5kV
Commande analogique la moins coûteuse	

Une structure de convertisseur convenant à cette application est présentée ci-dessous.



## 2.2 Etapes du projet

Dans le but d'aider les étudiants à travailler au projet de façon structurée, des rapports intermédiaires leur ont été demandés. Pour cela, nous avons découpé le projet en blocs de tâches.

Nous avons distingué les tâches suivantes :

- Dimensionnement du circuit de puissance
- Dimensionnement des composants magnétiques (transformateurs et bobines)
- Simulation du circuit de puissance
- Réalisation du circuit de puissance
- Conception du circuit de commande
- Tests du circuit
- Présentation publique à la fin du projet

Nous avons réparti ces tâches sur les 11 semaines de cours de la façon suivante :

Semaine de cours	Tâches à effectuer
5 <sup>ème</sup> semaine	Rapport sur le dimensionnement du circuit de puissance
6 <sup>ème</sup> semaine	Rapport sur le dimensionnement des magnétiques (transformateurs et bobines)
8 <sup>ème</sup> semaine	Rapport sur la simulation du circuit de puissance
11 <sup>ème</sup> semaine	Présentations publiques des projets

Nous avons consacré les 4 premières semaines de cours à enseigner les bases théoriques nécessaires aux projets. A partir de la 5<sup>ème</sup> semaine, nous avons divisé les séances de 4 heures en une partie théorique et une partie consacrée à l'encadrement des étudiants travaillant à leurs projets.

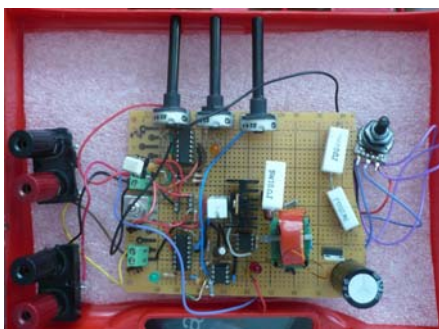


fig 1 : Projet Flyback

## 2.3 Réalisations des étudiants

Tous les groupes d'étudiants sont parvenus, non sans mal, à réaliser un prototype du convertisseur DC/DC demandé (figure 1).

## 3 INTERET DE LA METHODE PAR PROJET

### 3.1 Introduction

Une méthode d'apprentissage par projet bien menée a de nombreux apports vis-à-vis d'une méthode d'enseignement plus transmissive.

Citons les principaux :

- réalisme
- compétences transversales
- gestion de projet
- gestion d'un travail de groupe
- motivation
- implication dans son propre apprentissage
- relations et développement humain

Examinons brièvement quelques-uns de ces apports.

### 3.2 Réalisme

A un niveau global, cette approche par projet met les étudiants dans une situation d'apprentissage très proche de la réalité professionnelle dans laquelle ils évolueront après leurs études. Les convertisseurs à concevoir correspondent à des applications réelles. Ceci est rendu possible au travers de la collaboration industrielle avec CE+T.

Par ailleurs, l'apprentissage par projet permet aux étudiants de se confronter à la réalité et d'ainsi mieux distinguer modèle théorique et réalisation pratique. Par exemple, si les étudiants calculent qu'une bobine doit comporter une centaine de spires, le fait de devoir les bobiner à la main sur un noyau magnétique leur permet de saisir d'une façon directe les difficultés liées à la fabrication et la réalisation d'un composant magnétique (figure 2).

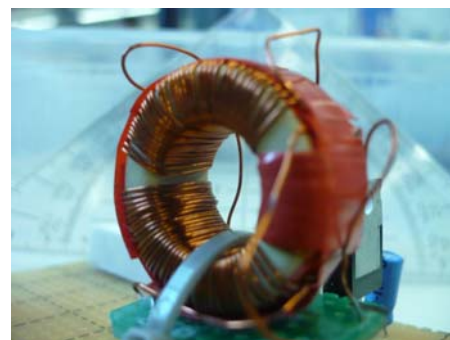


fig 2 : Transformateur Flyback bobiné à la main par les étudiants (12 spires primaires et 36 spires pour chacun des deux secondaires)

Notons également que les étudiants (aux moments des essais) ont réalisé de manière concrète les limites de la modélisation et du dimensionnement théorique qui ne porte que sur une partie de la réalité. Les essais pratiques font découvrir des choses imprévisibles.

Le réalisme est certainement un des avantages principaux de cette approche par projet.

### 3.3 Compétences transversales

De nombreuses compétences transversales sont mises en œuvre par les étudiants durant leur projet.

Citons notamment :

- Différentiation entre spécifications (imposées) et variables de design (au choix du concepteur)
- Utilisation de datasheets
- Utilisation d'un logiciel de simulation de circuits
- Utilisation d'un fer à souder
- Utilisation de divers moyens de mesures
- Présentation orale

Il est très intéressant de noter que ces compétences sont mise en œuvre en vue du projet et non pour elles-mêmes. Ceci permet aux étudiants de mieux les intégrer et de les placer dans un contexte cohérent.

### 3.4 Relations et développement humain

Dans toute formation, il est important d'avoir pour objectif de former la personne dans son ensemble et non seulement les aspects de connaissance et de raisonnement. Un dispositif didactique bien conçu devrait donc inclure une partie théorique, mais aussi une partie pratique incluant aussi une présentation du travail réalisé (sous forme écrite et/ou orale).

Le projet de convertisseur DC/DC proposé aux étudiants dans le cadre de ce cours est impossible à réaliser seul. Cela force intrinsèquement les étudiants à développer des qualités humaines et relationnelles peu mises en valeur par un cours ex-cathedra.

## 4 QUELQUES CONDITIONS POUR UNE MISE EN ŒUVRE RÉUSSIE

### 4.1 Introduction

La méthode d'apprentissage par projet présentée dans cette article, si elle est réussie, est d'un grand intérêt pour la formation des étudiants en ingénieur civil.

Il y a toutefois plusieurs conditions à remplir pour qu'elle puisse être mise en œuvre. Les paragraphes qui suivent détaillent ces conditions dont l'équipe d'encadrement du cours, l'articulation entre cours théorique et projet, les indications à donner aux étudiants et l'évaluation. Ainsi le projet est non seulement possible mais surtout fructueux.

### 4.2 Equipe d'encadrement

Pour l'encadrement des projets présentés (figure 3), nous sommes à l'Université de Liège une équipe de trois personnes :

- un directeur R&D (CE+T), titulaire du cours,
- un assistant,
- un technicien.

Remarquons qu'avec ces trois personnes sont représentés dans l'équipe les aspects industriel, pédagogique et technique.



fig 3 : Jean Arban, technicien (à gauche) écoute les questions d'un groupe d'étudiants

Il est très important de rappeler ici que des réalisations réelles posent des problèmes réels. Il ne suffit pas de dire : « il est bon que les étudiants soient confrontés avec la réalité ». Si un problème concret se pose, il faut être capable de trouver rapidement la solution ou du moins de donner une indication claire permettant aux étudiants de le solutionner.

Il faut donc soit avoir soi-même effectué une pré-étude du projet, soit avoir une équipe suffisamment solide pour faire face aux difficultés qui se présentent. Si leur circuit complexe ne fonctionne pas, cette confrontation avec la réalité aura seulement conduit à de la frustration.

Encadrer un projet réel de dimensionnement d'un convertisseur DC/DC n'est donc pas trivial.

### 4.3 Articulation entre cours théorique et projet

Pour un projet réussi, il est nécessaire d'étudier soigneusement la façon dont le cours théorique et le projet sont agencés. L'expérience acquise au cours du travail avec les étudiants a permis d'identifier une articulation nécessaire à deux niveaux :

- contenu du cours théorique
- agencement du cours théorique et du projet

#### 4.3.1 Contenu du cours théorique

Le cours théorique doit contenir les bases théoriques et méthodologiques nécessaires pour réaliser le projet. Il doit aussi contenir les solutions originales que les étudiants n'auront pas le temps de développer dans leurs projets afin de leur donner la chance d'étudier ces solutions techniques très élégantes à côté desquelles ils passeraient.

Afin de couvrir l'ensemble de la matière, il est évident que le cours théorique devra couvrir aussi les domaines qui ne sont pas abordés par le projet [1].

#### 4.3.2 Agencement du cours théorique et du projet

Nous avons cette année commencé par donner 3 séances de cours théoriques de 4h avant de donner les énoncés des projets aux étudiants. Cela a entraîné une

démotivation temporaire des étudiants dès la deuxième semaine de cours car ils se sont sentis bombardés de théorie.

Il serait beaucoup plus intéressant de donner les projets aux étudiants dès la deuxième semaine de cours. La première semaine suffirait en effet pour donner aux étudiants la formation nécessaire pour commencer le dimensionnement de la partie de puissance du convertisseur. Cela permettrait d'inciter les étudiants dès le début du cours à un engagement personnel dans leur propre formation [2].

#### 4.4 Informations à donner aux étudiants sur leurs projets

Il est essentiel de donner aux étudiants des informations sur le travail à réaliser, mais aussi des conseils d'ordre méthodologique. Travailler par groupe de six personnes n'est pas facile. Si tous les six travaillent par exemple en même temps à une même chose, leur projet ne pourra être mené à bien dans le temps imparti.

#### 4.5 Evaluation des groupes

Les étudiants sont évalués sur base du projet et d'un examen oral, chacun intervenant pour 50% de la cote globale du cours.

Les projets étant complexes, ils requièrent un grand nombre d'étudiants par groupe. Nous avons travaillé cette année avec des groupes de 6 étudiants. Se pose dès lors la question de l'évaluation des étudiants :

« faut-il attribuer aux étudiants d'un même groupe une même cote ou plutôt individualiser les cotes, au risque de détériorer ainsi la cohésion au sein du groupe ? »

Nous avons choisi un compromis entre ces deux extrêmes. Nous avons découpé les projets en 6 parties, chaque étudiant devant prendre la responsabilité d'une des parties au début du projet. Les responsabilités sont

- |                   |            |
|-------------------|------------|
| - Dimensionnement | étudiant a |
| - Simulation      | étudiant b |
| - Réalisation     | étudiant c |
| - Tests           | ...        |
| - Commande        |            |
| - Présentation    |            |

La cote pour chaque étudiant est la moyenne des cotes

- de la partie dont il est le responsable
- du projet dans son ensemble

Si l'étudiant x a choisi d'être dans son groupe le responsable des tests, sa cote sera calculée comme suit

$$\text{Cote étudiant } x = 0.5 \cdot T + 0.5 \cdot ((D+S+R+T+C+P)/6)$$

où D = cote du Dimensionnement,  
S = cote de la Simulation,  
etc.

Exemple

Partie Test: 14/20 (= T)

Projet global: 16/20 (= (D+S+R+T+C+P)/6)

Cote étudiant 15/20 (si il est responsable des tests)

Cette méthode d'évaluation a donné de très bons résultats en cette première année d'application. Pour la plupart des groupes, chaque étudiant du groupe a pris une part de responsabilité dans le projet et tous les groupes ont travaillé avec une bonne cohésion au sein du groupe.

Il est arrivé cependant qu'un étudiant beaucoup plus faible que les autres du groupe soit supporté par le groupe qui veut que son projet aboutisse. Dans ce cas, l'évaluation finale de l'étudiant faible ne reflète pas sa maîtrise de la matière. Il sera donc nécessaire d'adapter encore précautionneusement le mode d'évaluation des travaux de groupes.

#### 4.6 Dissémination des résultats

En vue de faire profiter l'ensemble des étudiants de l'ensemble de l'expérience acquise lors de la réalisation des projets, ceux-ci se terminent par une présentation de l'ensemble du projet. Cette présentation inclut notamment les problèmes rencontrés et les solutions apportées, des mesures effectuées sur le produit fini pour le caractériser. Il est aussi demandé aux étudiants d'inclure dans leur présentation une analyse sur la façon dont ils ont travaillé en groupe. Ceci a pour but de les faire réfléchir sur leurs méthodes de travail en vue de les faire progresser à ce niveau également.

Il est intéressant de remarquer ici que tous les étudiants se sont montrés enthousiastes lors de la présentation de leur projet aux autres. Ceci est un indicateur du fait que les étudiants ont été motivés par cette approche pédagogique et se sont sérieusement impliqués dans la réalisation de leurs projets.

## 5 APPLICATION A D'AUTRES NIVEAUX D'ENSEIGNEMENT

Cette approche par projet en électronique de puissance semble pouvoir être appliquée à d'autres niveaux d'enseignement, ainsi d'ailleurs qu'à d'autres matières.

Examinons le cas d'un cours d'électronique de puissance donné dans le cadre d'un baccalauréat en électronique de Promotion Sociale (cours du soir pour adultes). Cette formation étant à caractère plus pratique, la charge de conception dans les projets doit être réduite.

Les projets consisteront dans ce cas en la réalisation et le test d'un circuit au départ d'un schéma existant. Il est possible de ne pas donner aux étudiants certaines parties du schéma. Une autre possibilité est de demander aux étudiants de calculer les valeurs de certains éléments du schéma de puissance.

Il est clair que cela demande néanmoins de la part du chargé de cours un investissement en temps qui est non négligeable.

## 6 CONCLUSION

Une expérience réussie d'apprentissage par projet en électronique de puissance a été présentée. Elle a été menée avec une classe de 24 étudiants.

Ses avantages par rapport à une approche plus transmissive ou comportant uniquement des travaux pratiques ont été listés et brièvement explicités. L'intérêt principal de ce dispositif pédagogique est sa proximité avec une situation professionnelle réelle. Celle-ci est rendue meilleure encore dans le cas présent via la collaboration industrielle entretenue avec CE+T au niveau de ce cours.

Les conditions qui ont fait que le projet a porté du fruit ont ensuite été énumérées. Parmi celles-ci, la plus importante concerne l'équipe d'encadrement. Celle-ci doit être à même de faire face aux problèmes réels posés par les projets. Ceci est nécessaire pour que la confrontation des étudiants avec une réalisation réelle les mène à reconnaître la réalité comme maîtrisable.

Enfin, l'application à d'autres niveaux d'enseignement a été brièvement discutée. Elle est tout à fait possible, moyennant une adaptation de la difficulté des projets soumis aux étudiants. Cela demande aussi une pré-étude par le chargé de cours.

### Bibliographie

- [1] R.W. Erickson, D. Maksimović, *Fundamentals of Power Electronics, Second Edition*, y (2001), *University of Colorado, Boulder, Colorado*.
- [2] B. Bloom, *Caractéristiques individuelles et apprentissages scolaires, Education 2000*, y (1979), *Fernand Nathan, Paris, Editions Labor – Bruxelles*