

#### Article 4. Simulation d'un gradateur nouveau modèle monophasé commandé par FPGA

M. Volana RANDRIAMANDIMBISOA<sup>1</sup>, Maharo RAKOTOARIMANANA<sup>1</sup>, Fanjanirina RAZAFISON<sup>1</sup>, Georgette RAMANANTSIZEHENA<sup>2</sup>, Harlin ANDRIATSIHOARANA<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institut Supérieur de Technologie d'Antananarivo

<sup>2</sup>Facultés des Sciences Université d'Antananarivo

<sup>3</sup>Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo

Correspondant : [mirantsoanany@gmail.com](mailto:mirantsoanany@gmail.com)

#### Résumé

L'objectif de ce travail est d'effectuer la modélisation et la simulation d'un gradateur nouveau modèle monophasé et de réaliser sa commande par la description VHDL d'un FPGA cyclone III EP3C25F324C6. Le circuit de puissance est modélisé avec le logiciel MATLAB Simulink et la commande est conçue à l'aide des logiciels Quartus II et ModelSim. Les résultats obtenus sont le fruit d'une Cosimulation entre ces outils. Des avantages seront perçus grâce à un circuit de commande performant, fiable et facilement modifiable. La finalité portera sur la comparaison des paramètres d'un gradateur classique et ceux du nouveau modèle, surtout en ce qui concerne les harmoniques.

**Mots clés :** Gradateur, Monophasé, FPGA, Cosimulation, Harmonique.

#### Introduction

Le gradateur est un convertisseur statique alternatif – alternatif. Le gradateur classique ou à angle de phase, alimenté sous une tension sinusoïdale de valeur efficace constante, fournit à la charge un courant alternatif non sinusoïdal de même fréquence que la tension d'alimentation, mais de valeur efficace réglable [2]. Cependant, ce convertisseur a toujours été lié aux problèmes des harmoniques. Pour remédier à ces inconvénients, nous avons été amenés à travailler sur l'étude d'un nouveau modèle de gradateur afin d'améliorer les effets provoqués par ces harmoniques, surtout ceux de rang faible.

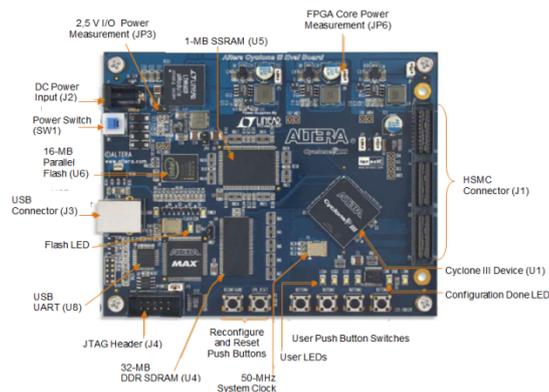
#### 1. Méthodologie

La méthodologie adoptée pour mener l'étude est la suivante :

- Description de la commande du gradateur nouveau modèle sur le circuit FPGA à l'aide du logiciel Quartus II ;
- Modélisation du circuit de puissance sur Simulink ;
- Simulation de l'ensemble commande/puissance avec les logiciels ModelSim et Simulink.

##### 1.1 Partie commande [1][4][5]

L'objectif est de décrire les signaux de commande du gradateur nouveau modèle monophasé sur un FPGA. Dans notre cas, le langage choisi pour la description est le VHDL ou **V**ery **H**igh **S**peed **I**ntegrated. Le circuit intégré utilisé est de référence cyclone III EP3C25F324C6 associé à une carte DK-START-3C25N de la société Altera (fig II.1).



**Figure II-1 : Carte DK-START-3C25N avec un FPGA cyclone III EP3C25F324C6**

Les étapes de conception sont assistées par ordinateur et présentent la chronologie suivante :

- description de la fonction souhaitée par entrée schématique ou syntaxique ;
- simulation logique puis temporelle de la fonction réalisée et éventuellement retour à l'étape précédente ;
- compilation et génération d'un fichier de programmation ;
- programmation et test du composant.

##### 1.2. Partie puissance

###### 1.2.1 Structure du gradateur nouveau modèle

Le circuit de puissance est modélisé sur MATLAB Simulink. La structure du gradateur nouveau modèle monophasé est composée de quatre transistors MOSFET notés T1, T2, T1P et T2P et de quatre diodes notées D1, D2, D1P et D2P (fig II.2).

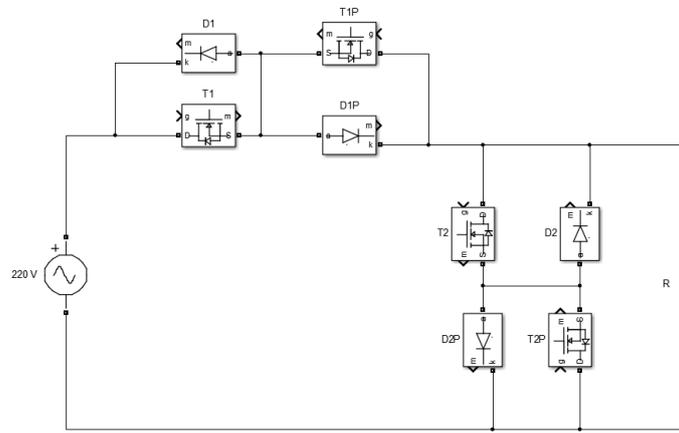


Figure II-2 : Schéma du gradateur monophasé nouveau modèle

### 1.2.2 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement du gradateur nouveau modèle est tel que :

- **lorsque le courant est positif**, c'est-à-dire de  $[0; \frac{T}{2}]$ , avec  $T$  la période, T1 et T2P conduisent de manières successives (fig II. 3). Si T1 conduit et T2P bloqué, le gradateur est dit en phase d'alimentation (fig II.4). Si T2P conduit et T1 bloqué, le gradateur est dit en phase de roue libre (fig II.5).

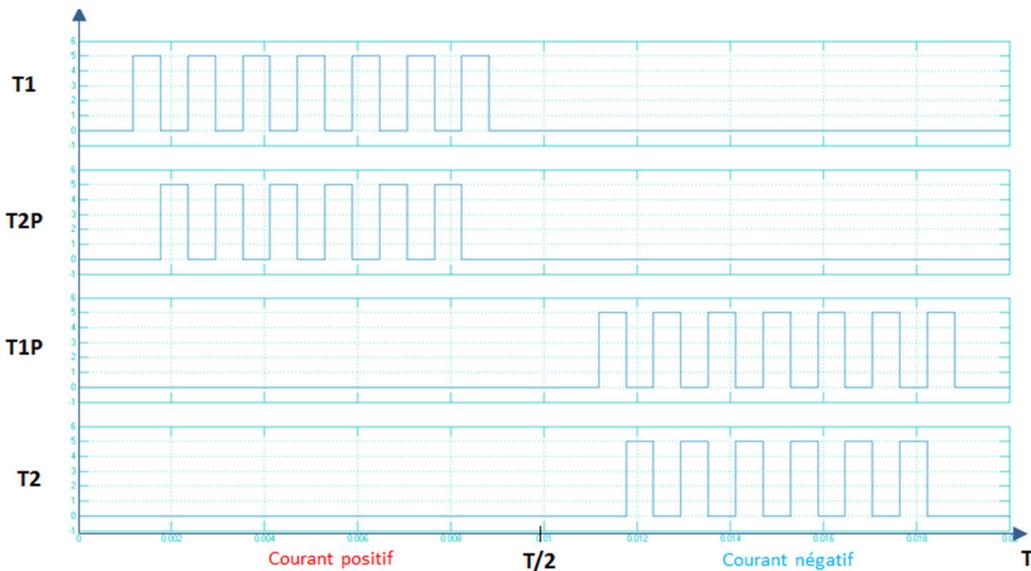


Figure II-3 : Principe de commande du gradateur monophasé en alternance positive

- **lorsque le courant est négatif**, c'est-à-dire de  $[\frac{T}{2}; T]$ , T1P et T2 conduisent de manières successives (fig II.3). Si T1P conduit et T2 bloqué, le gradateur est dit en phase d'alimentation (voir fig II.6). Si T2 conduit et T1P bloqué, le gradateur est dit en phase de roue libre (voir fig II.7).

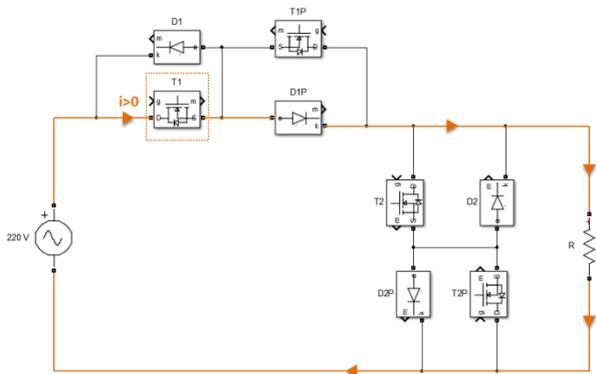


Figure II-4 : Phase d'alimentation du gradateur monophasé nouveau modèle – alternance positive

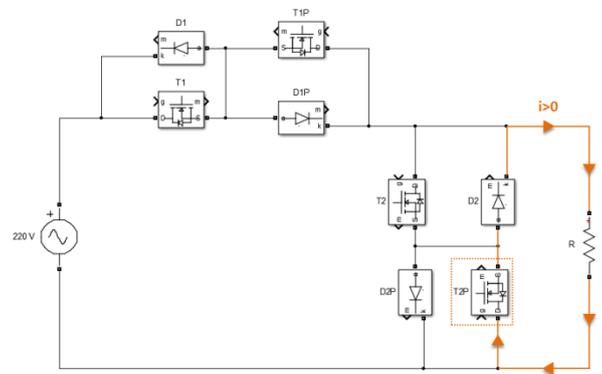


Figure II-5 : Phase de roue libre du gradateur monophasé nouveau modèle – alternance positive

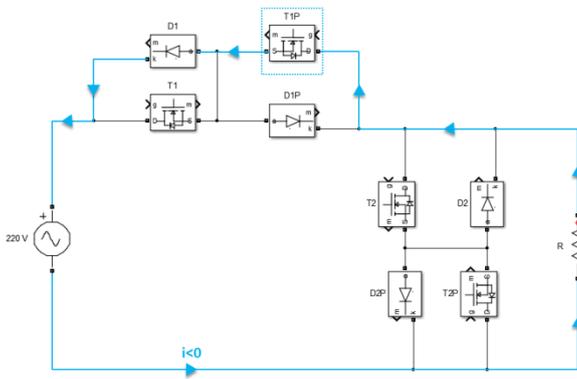


Figure II-6 : Phase d'alimentation du gradateur monophasé nouveau modèle – alternance négative

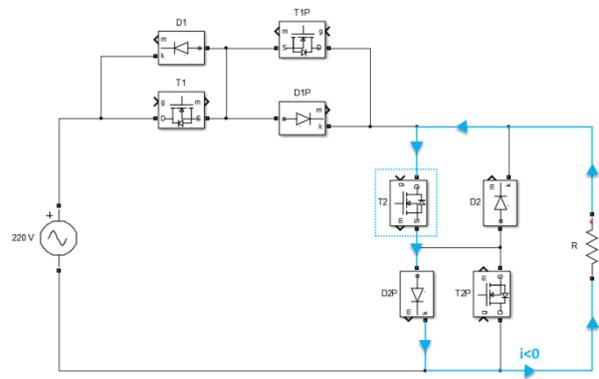


Figure II-7 : Phase de roue libre du gradateur monophasé nouveau modèle – alternance négative

## 2. Résultats

### 2.1 Modélisation [1][3]

Le modèle conçu sous Simulink se divise en deux blocs (fig III.1). Le bloc 1 appelé simulateur MODELSIM (fig III.2), crée un lien de communication entre MODELSIM et Simulink afin de pouvoir effectuer la simulation commande/puissance. Cette action est appelée cosimulation.

Le bloc 2 renferme le modèle du circuit de puissance (fig II.1 précédente).

La source d'alimentation est de 220V avec une fréquence de 50Hz.

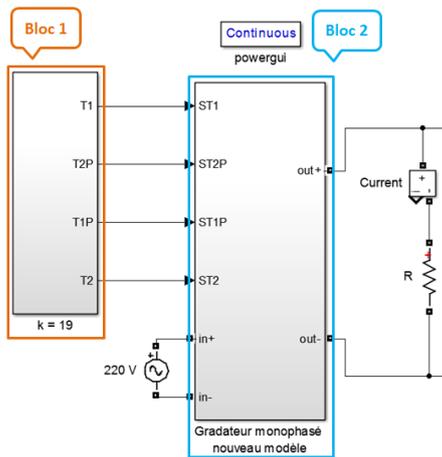


Figure II-8 : Modèle des blocs de simulation du gradateur sous Simulink

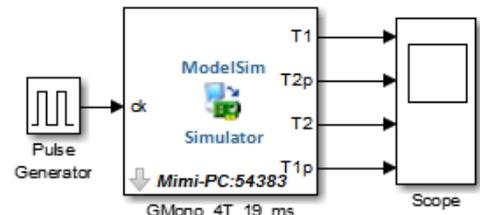


Figure II-9 : Simulateur ModelSim sur Matlab Simulink

### 2.2 Résultats de simulations avec une charge résistive R

Les résultats de simulations comportent la représentation de la tension (fig III.3), du courant (fig III.5) et des spectres des harmoniques du courant (fig III.7). Ces caractéristiques sont comparées à ceux d'un gradateur classique (fig III.4, fig III.6 et fig III.8). Pour les deux modèles, la charge R utilisée pour la simulation est de même valeur.

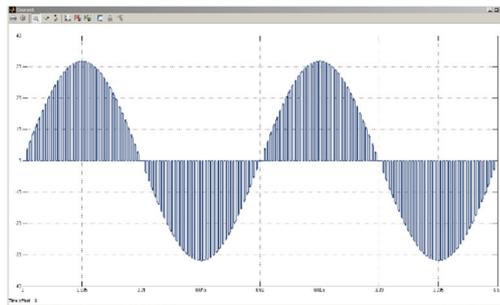


Figure II-10 : Tension en sortie du gradateur nouveau modèle monophasé / Charge R  
 $V_{Reff} = 154,2V$

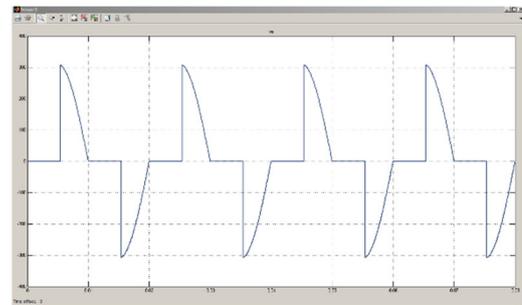


Figure II-11 : Tension en sortie du gradateur classique monophasé / Charge R avec  $\alpha = 95,58^\circ$   
 $V_{Reff} = 156,6V$

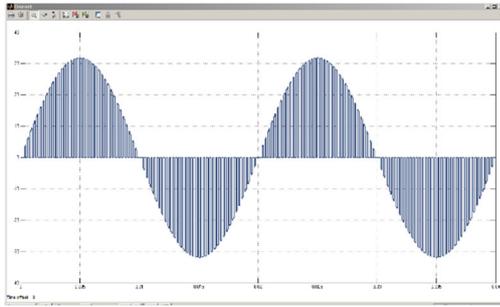


Figure II-12 : Courant traversant la charge pour le gradateur nouveau modèle monophasé / Charge R

$$I_{Reff} = 15,93A$$

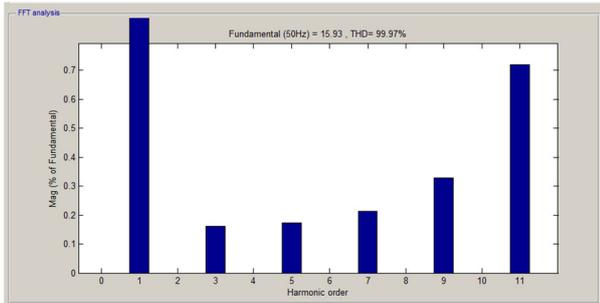


Figure II-14 : Spectre des harmoniques du courant pour le gradateur nouveau modèle / Charge R

$$h_3 = 0,16\%$$

$$h_5 = 0,17\%$$

$$h_7 = 0,21\%$$

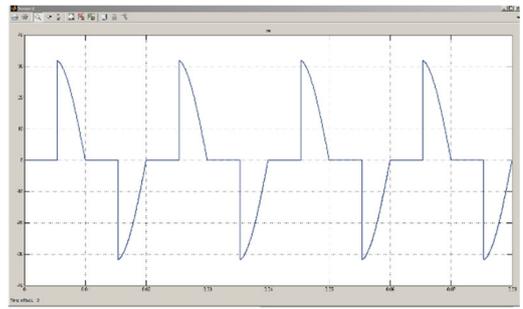


Figure II-13 : Courant traversant la charge pour le gradateur classique monophasé / Charge R avec  $\alpha = 95,58^\circ$

$$I_{Reff} = 16,8A$$

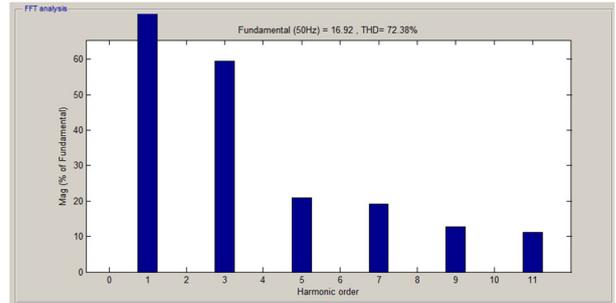


Figure II-15 : Spectre des harmoniques du courant pour le gradateur classique monophasé / Charge R

$$h_3 = 59,50\%$$

$$h_5 = 20,93\%$$

$$h_7 = 19,28\%$$

Les signaux de commandes simulés sur ModelSim sont représentés par la figure III.9.

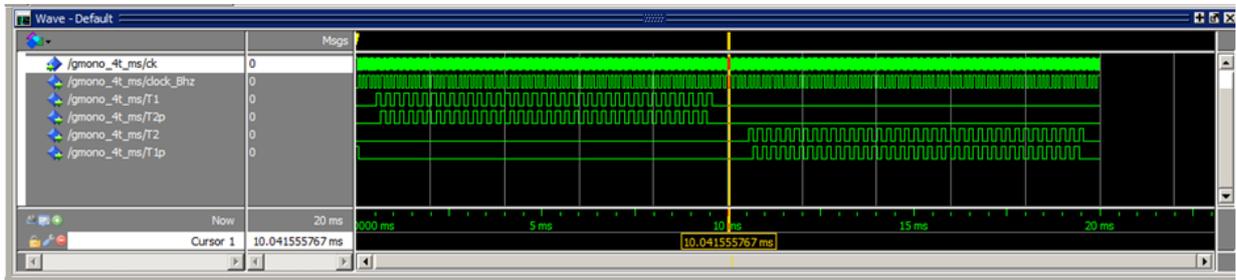


Figure III.9 : Signaux de commande sur ModelSim

### 2.3 Résultats de simulations avec une charge RL

Les résultats de simulations comportent la représentation de la tension (fig III.9), du courant (fig III.11) et des spectres des harmoniques du courant (fig III.13). Ces caractéristiques sont comparées à ceux d'un gradateur classique (fig III.10, fig III.12 et fig III.14).

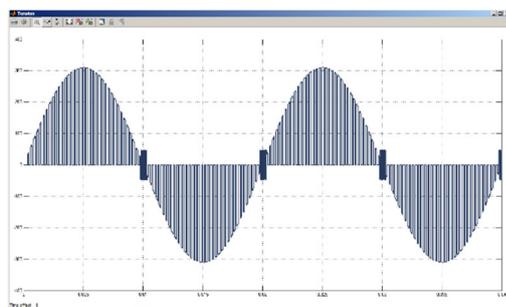


Figure II-9 : Tension en sortie du gradateur nouveau modèle monophasé / Charge RL

$$V_{RLeff} = 155,6V$$

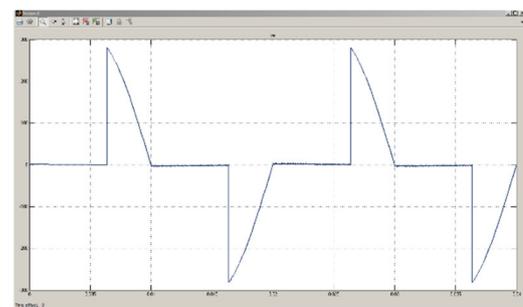


Figure II-10 : Tension en sortie du gradateur classique monophasé / Charge RL avec  $\alpha$

$$V_{RLeff} = 117,4V$$

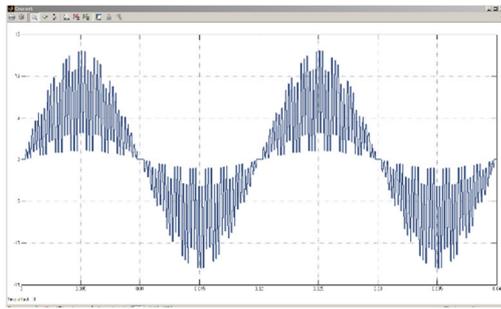


Figure II-11 : Courant traversant la charge pour le gradateur nouveau modèle monophasé / Charge RL

$$I_{RL\text{eff}} = 5,7A$$

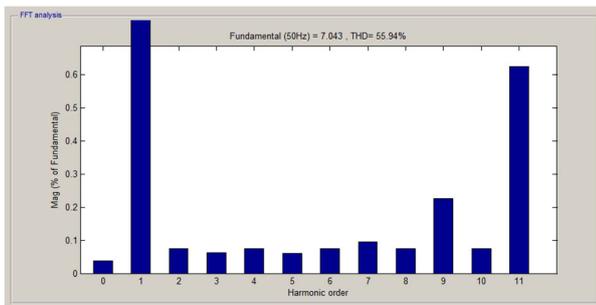


Figure II-13 : Spectre des harmoniques du courant pour le gradateur nouveau modèle / Charge RL

$$h_3 = 0,06\%$$

$$h_5 = 0,06\%$$

$$h_7 = 0,09\%$$

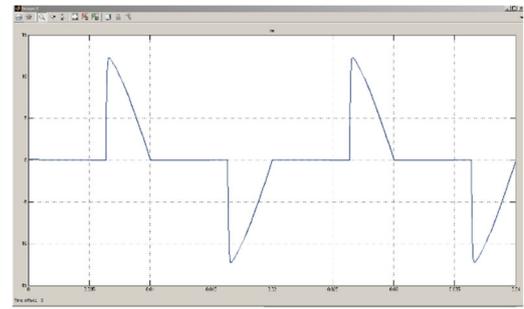


Figure II-12 : Courant traversant la charge pour le gradateur classique monophasé / Charge RL

$$I_{RL\text{eff}} = 5,2A$$

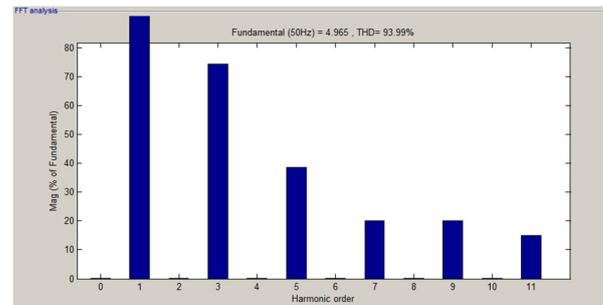


Figure II-14 : Spectre des harmoniques du courant pour le gradateur classique monophasé / Charge RL

$$h_3 = 66,46\%$$

$$h_5 = 24,64\%$$

$$h_7 = 8,58\%$$

## Conclusion et discussions

En guise de conclusion, on peut affirmer que les objectifs visés sont atteints. Le travail a débuté par la modélisation sous Simulink de la partie puissance comportant le nouveau modèle de gradateur. Ce gradateur est composé de quatre transistors MOSFET et de quatre diodes. Ensuite, la partie commande a été réalisée par la description et la programmation d'un FPGA cyclone III EP3C25F324C6. Il s'est achevé par la simulation de l'ensemble du système commande/puissance. Afin de mieux analyser les résultats, il a fallu simuler en parallèle un modèle de gradateur classique ayant les mêmes caractéristiques au niveau de la source d'alimentation et de la charge.

Lors d'une première simulation, une résistance a été choisie comme charge. Comme pour toute charge résistive, la tension et le courant sont de la même forme. Dans le cas des deux convertisseurs statiques, la valeur efficace de ces derniers ne présente pas énormément de différence. Par contre, au niveau du spectre des harmoniques, cette différence est flagrante pour les rangs faibles. En effet, les harmoniques ont toujours été une source de problèmes pour le gradateur classique lors des applications industrielles. Ainsi, en utilisant le gradateur nouveau modèle, les harmoniques de rang faibles seront réduites voire même éliminés.

Lors d'une seconde simulation, la résistance a été remplacée par une charge de type RL. Ce changement a été effectué pour voir le comportement du gradateur nouveau modèle par rapport à une charge inductive. La forme de la tension et du courant n'est pas identique. Concernant la tension, une déformation d'une dizaine de Volt est constatée à chaque demi-période. Quant au courant, sa forme commence à se rapprocher une sinusoïde. Les taux d'harmoniques de rang faible sont également réduits.

Le gradateur nouveau modèle est un convertisseur performant et fiable. Il serait très profitable de l'exploiter dans le milieu industriel. L'élimination des harmoniques de rang faible aura un impact positif au niveau financier et au niveau de la sécurité des installations. De plus, grâce aux signaux générés par FPGA, la commande sera facilement modifiable dans une perspective d'amélioration ou d'adaptation du système à une application spécifique.

## Références

- [1] D. Chillet, E. Casseau, « Tutorial MODELSIM VHDL », Université de Rennes 1, 2008, pages 1 à 8
- [2] Guy SEGUIER, « Electronique de puissance », Dunod, Paris, 2015, pages 1 à 20
- [3] Cosimulation Wizard for Simulink, [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com), consulté en septembre 2017
- [4] Cyclone III FPGA Starter Kit User Guide, 2010, [www.altera.com](http://www.altera.com), consulté en août 2017
- [5] Technologie des circuits intégrés programmables FPGA, article 13, Actes des Journées de recherche des IST 2018, page 115