

# Chapitre 1

## Validation croisée entre les différentes plateformes de simulations

Ce chapitre présente une comparaison des simulateurs selon les paramètres des simulation critiques : courant dans les électroaimants, tension aux bornes des électroaimants, courant à l'entrée de l'AFE, tension du bus CC, courants et tensions dans les IGBT. Les sous-modèles se séparent en plusieurs catégories, soit les simulations représentant l'AFE, ceux représentant le convertisseur CC-CC et ceux représentant un montage avec un AFE et un convertisseur CC-CC. Il est à noté que le temps de simulation qui est employé pour fins d'analyse est de  $1\mu\text{s}$ .

### 1.1 Comparaison entre PSIM et SPS

Cette section décrit des comparaisons faites sur le fonctionnement des éléments de bases fondamentaux pour le projet, dans les simulateurs PSIM et SPS.

#### 1.1.1 Algorithmes de simulation sur PSIM et SPS

PSIM et SPS utilisent des méthodes de résolution différentes. SPS est un outil de simulation puissant et générique. Il établit un système d'équations d'états à partir du modèle de simulation, ces équations permettant de déterminer la solution du circuit. Les éléments non-linéaires sont modélisés comme des sources de courants. Les interrupteurs sont modélisés par une faible résistance en conduction et une forte résistance en blocage. Afin d'obtenir des modèles discrets, SPS discrétise les équations d'états continues en utilisant la méthode de Tustin<sup>1</sup>, la figure 1.1 présente un résumé schématique de l'implémentation. Afin d'augmenter la vitesse de simulation de l'électronique de puissance, SPS utilise un algorithme dans lequel les commutations sont idéales. Il existe deux méthodes de détection des passages par zéro dans SPS , soit la méthode Tustin (équivalente à une méthode trapézoïdale) et la méthode Backward Euler. La méthode trapézoïdale offre une meilleure précision pour un temps de calcul fixe, mais peut parfois présenter des oscillations numériques. La méthode Backward Euler est moins précise pour un pas de simulation donné, mais permet d'éviter les oscillations numériques. PSIM implémente les modèles au moyen d'une matrice d'admittance nodale<sup>2</sup>. Les interrupteurs sont idéaux et représentés par une résistance faible en conduction et par une résistance élevée en blocage. La méthode de simulation de PSIM est moins adaptée à l'étude

---

1. <http://www.mathworks.com/products/simpower/description4.html>, 17 avril 2014

2. <http://powersimtech.com/support/frequently-asked-questions/>, 17 avril 2014

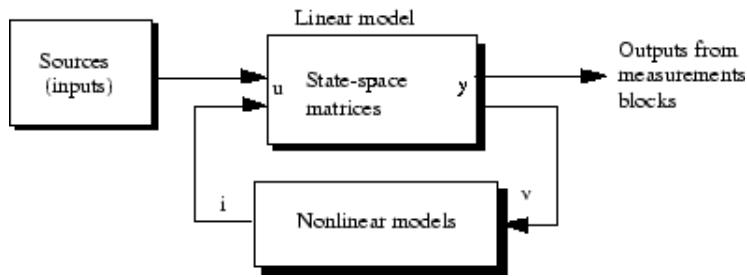


FIGURE 1.1 – Méthode de solution des systèmes implantée dans SPS

des transitoires pour l'électronique. Elle est cependant plus rapide et permet des études de plus haut niveau. La méthode de détection des passages par zéro de PSIM est une méthode trapézoïdale.

### 1.1.2 Comparaison des modèles d'IGBT

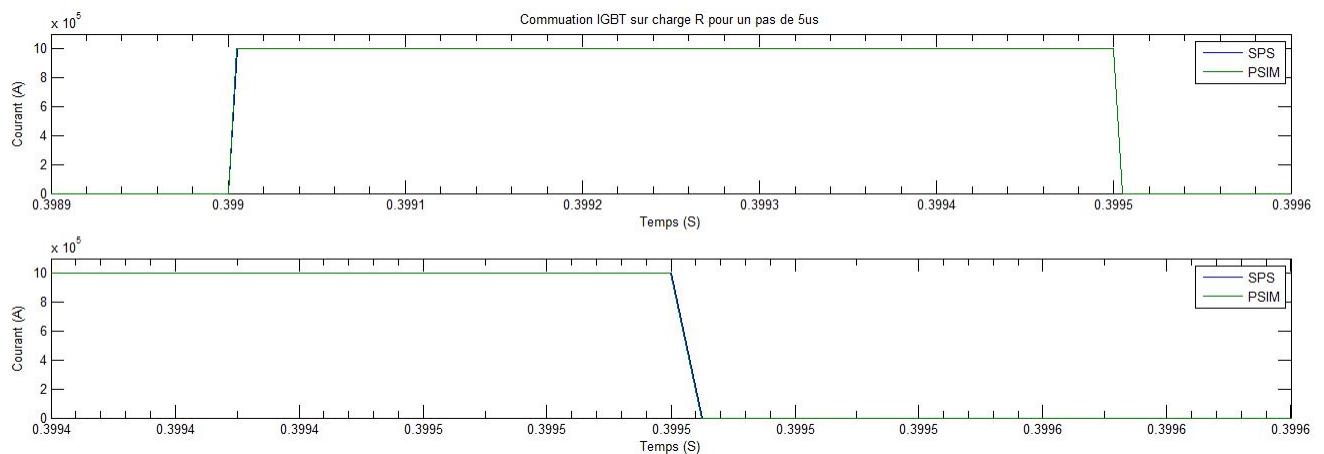


FIGURE 1.2 – Commutation d'un IGBT à un pas de calcul de  $5\mu\text{s}$

Les IGBT sont les interrupteurs utilisés dans chacun des sous-modèles simulés du projet. On remarque sur la figure 1.2 que le courant traversant l'IGBT est identique dans le cas d'un IGBT sur une charge résistive de  $50\text{k}\Omega$ . Le pas de calcul employé sur les deux plateformes est de  $5\mu\text{s}$ . L'indice de modulation des IGBT est de 0.5 et la fréquence de commutation de  $\text{kKHz}$ . Le montage est alimenté par une tension continue de  $1\text{kV}$  et possède une résistance interne de  $0.01\Omega$ .

Sur SPS, l'IGBT possède un snubber RC intégré, tandis que sur PSIM il faut l'incorporer manuellement. Pour les deux simulations, le snubber employé est une résistance de  $100\text{k}\Omega$ .

### 1.1.3 Contrôleur proportionnel-intégrateur (PI)

L'implantation des blocs PI est différente entre SPS et PSIM. Sur SPS, il est possible d'obtenir une forme idéale ainsi qu'une forme parallèle, tandis que sur PSIM, les blocs par défaut ne comportent que la forme idéale. La forme parallèle doit être implantée manuellement. On remarque sur la figure 1.3 que les résultats sont identiques entre une implantation manuelle sur PSIM et le bloc par défaut de SPS. La valeur du gain intégrateur du PI est de 50 et celle du gain proportionnel de 0.071.

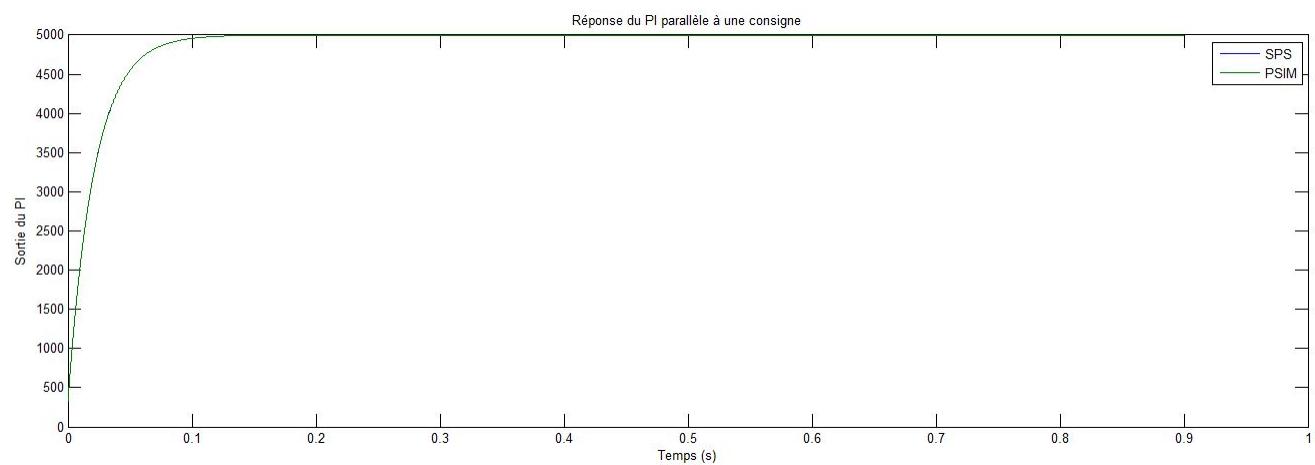


FIGURE 1.3 – Réponse d'un contrôleur PI suite à une consigne d'erreur

## 1.2 Convertisseur CC-CC 4 quadrants à 4 interrupteurs IGBT

### 1.2.1 Description du sous-système

Le hacheur 4 quadrants, à proprement parlé, est constitué de 4 interrupteurs IGBT commandés au moyen d'une régulation MLI. La figure 1.4 présente le circuit électrique associé à un tel convertisseur. Ce type de montage est un montage de base utilisé afin de valider le concept de fonctionnement d'un convertisseur CC-CC et d'établir la méthodologie de comparaison des simulations. Le tableau 1.1 présente les paramètres utilisés pour le hacheur 4 quadrants.

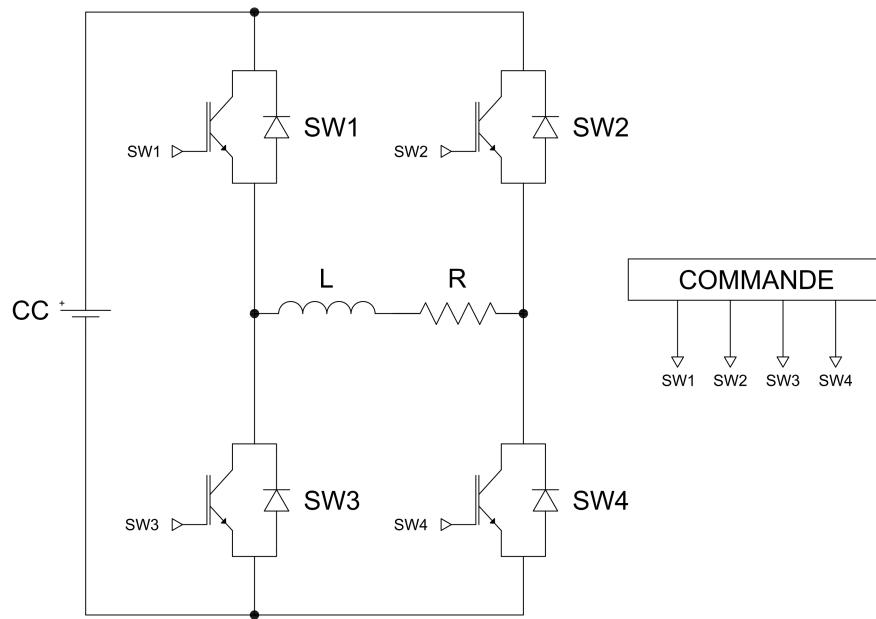


FIGURE 1.4 – Circuit électrique du convertisseur CC-CC 4 quadrants à 4 interrupteurs IGBT

### Vérification pour un pas de calcul de $1\mu\text{s}$

Cette section présente les résultats de simulations du convertisseur CC-CC 4 quadrants, formé avec 4 interrupteurs IGBT, pour un pas de calcul de  $1\mu\text{s}$ .

Paramètre	Valeur
Tension CC	5000 V
Fréquence de modulation	1000 Hz
Rapport cyclique maximal	0.95
<b>IGBT</b>	
Résistance interne	0.001 Ω
Résistance du snubber	100k Ω
<b>PI</b>	
Gain proportionnel	0.071
Gain intégrateur	50
<b>Charge</b>	
Résistance	0.28 Ω
Inductance	0.1 H

TABLE 1.1 – Paramètres de simulation pour le convertisseur CC-CC à 4 interrupteurs

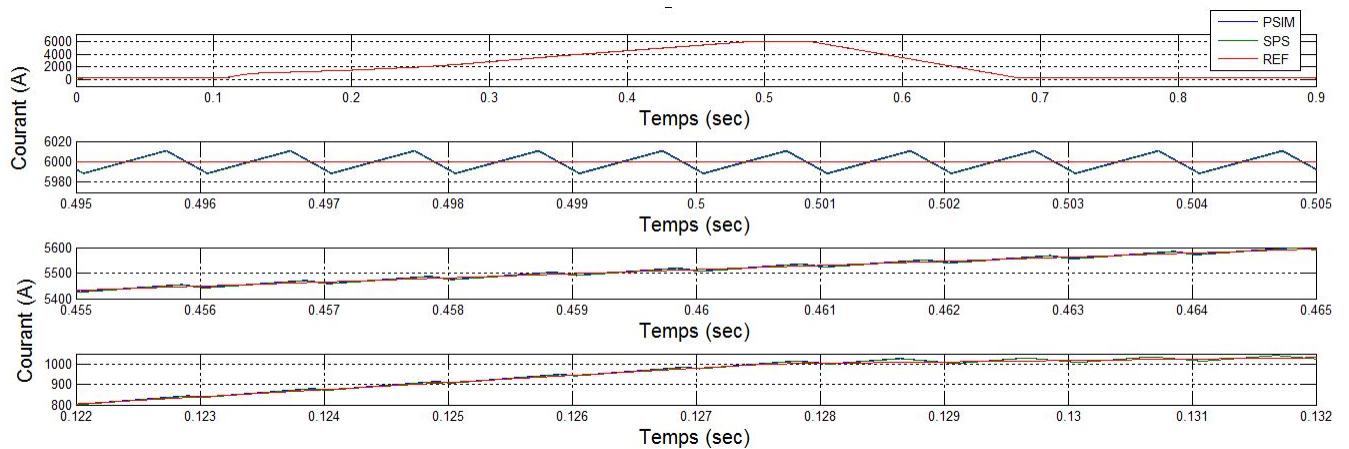


FIGURE 1.5 – Courant traversant la charge sur PSIM et SPS pour un pas de calcul de  $1\mu\text{s}$ , pour le hacheur 4 quadrants

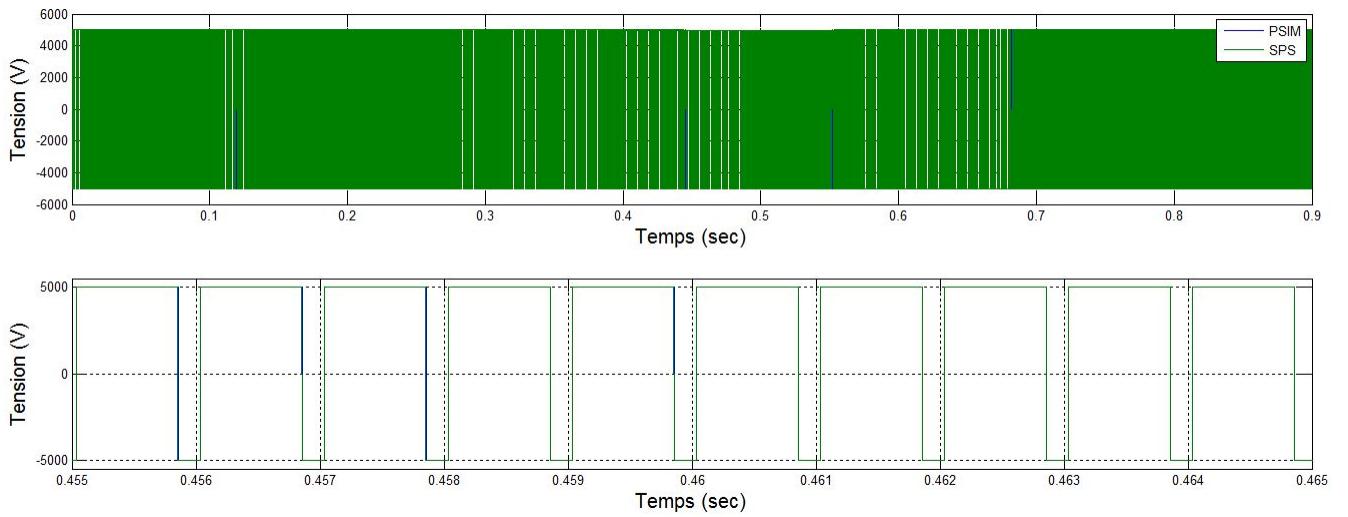


FIGURE 1.6 – Tension aux bornes de la charge sur PSIM et SPS pour un pas de calcul de  $1\mu\text{s}$ , pour le hacheur 4 quadrants

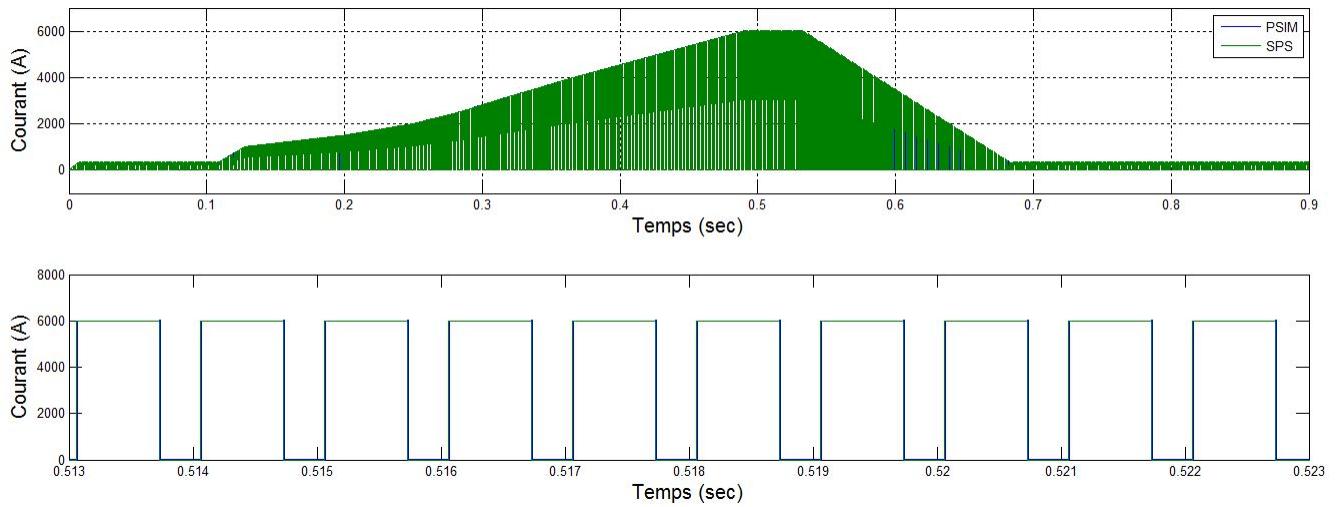


FIGURE 1.7 – Courant traversant un IGBT sur PSIM et SPS pour un pas de calcul de  $1\mu\text{s}$ , pour le hacheur 4 quadrants

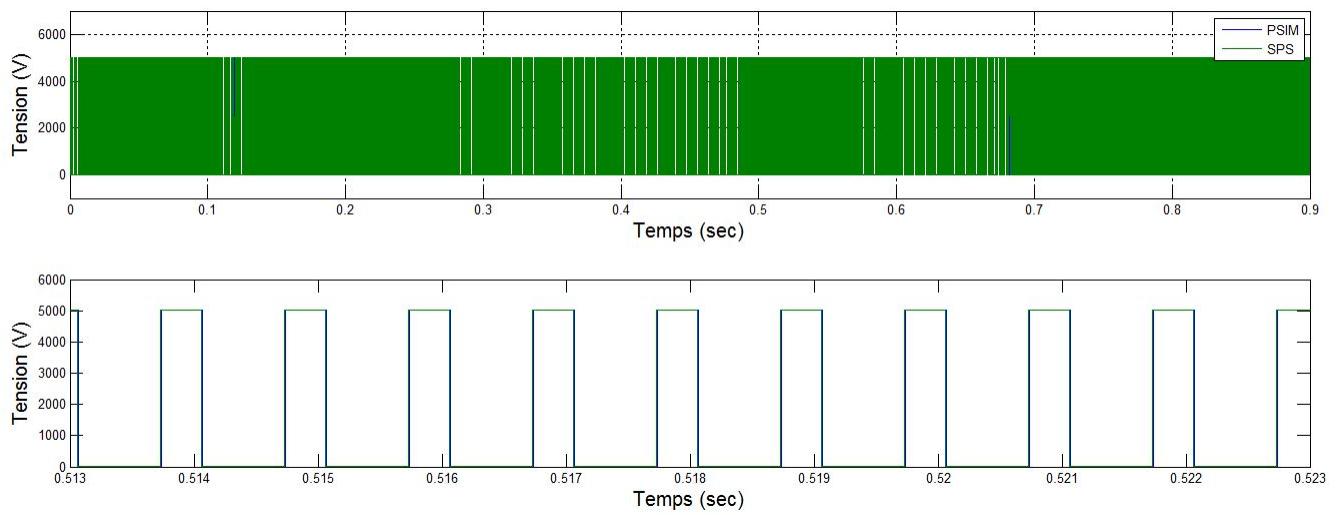


FIGURE 1.8 – Tension aux bornes d'un IGBT sur PSIM et SPS pour un pas de calcul de  $1\mu\text{s}$ , pour le hacheur 4 quadrants

### 1.3 Convertisseur CC-CC 4 quadrants formé de 2 convertisseurs 3 niveaux NPC

Le montage implanté au CERN est un convertisseur CC-CC formé de 2 onduleurs triphasés 3 niveaux NPC. La cellule supérieure est dénotée par DCP et la cellule inférieure par DCN. L'assemblage des onduleurs est tel qu'il permet le fonctionnement dans les 4 quadrants. Cette version reproduit le fonctionnement du hacheur 4 quadrants de base avec un plus grand degré de liberté. Il est composé au total de 24 interrupteurs IGBT/DIODE commandé par MLI ainsi que de 12 diodes de point milieu. La figure 1.9 présente le circuit électrique du convertisseur. Le tableau 1.2 présente les données utilisées pour ce sous-système.

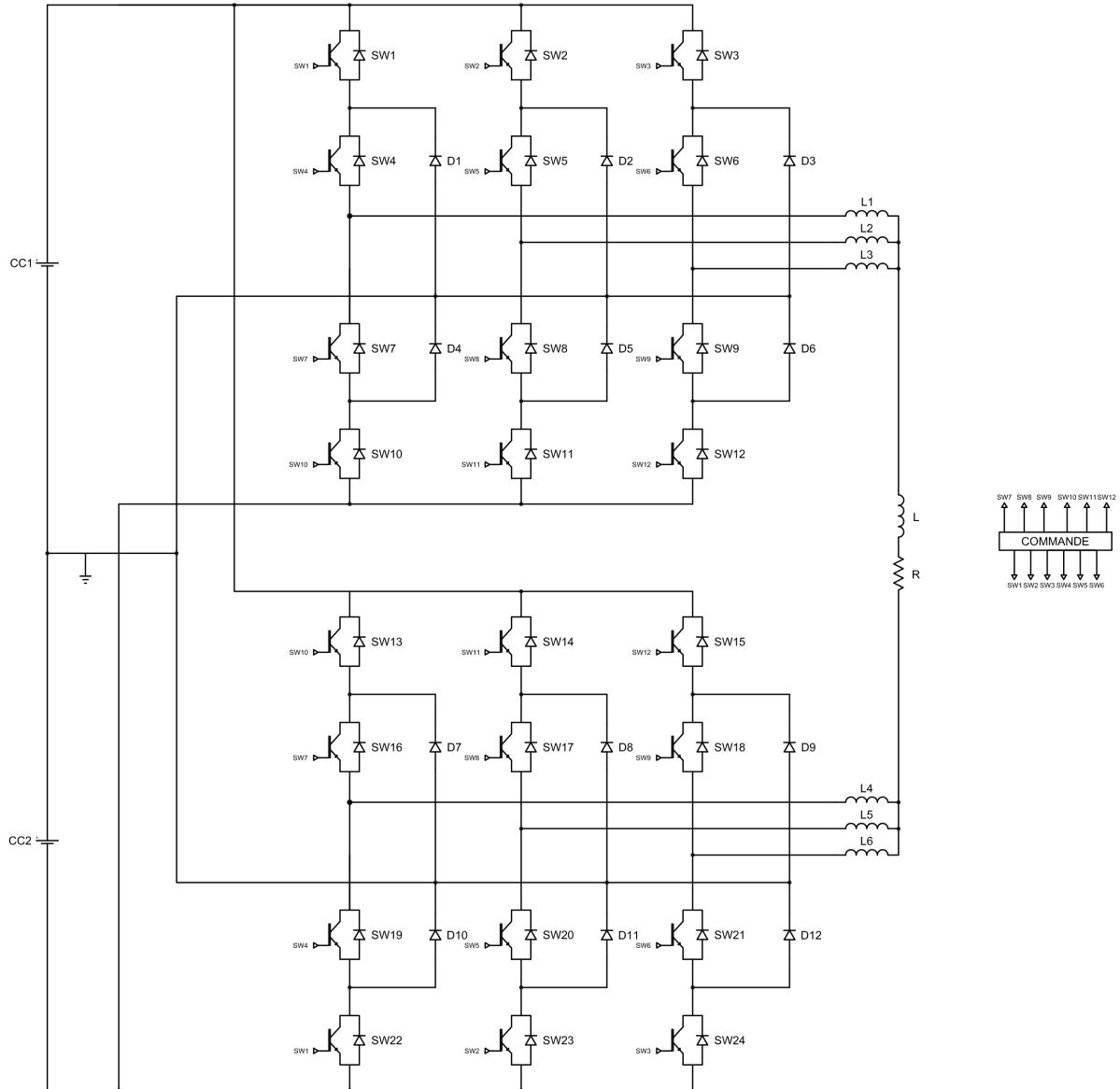


FIGURE 1.9 – Circuit électrique du convertisseur CC-CC 4 quadrants formé de 2 convertisseurs 3 niveaux NPC

<b>Paramètre</b>	<b>Valeur</b>
Tension CC	5000 V
Fréquence de modulation	1000 Hz
Rapport cyclique maximal	1
Inductance de couplage	10e-6 H
<b>IGBT</b>	
Résistance interne	0.001 Ω
Résistance du snubber	100k Ω
<b>PI</b>	
Gain proportionnel	1.5611
Gain intégrateur	24.6
<b>Charge</b>	
Résistance	0.28 Ω
Inductance	0.1 H

TABLE 1.2 – Paramètres de simulation pour le DCP/DCN

### 1.3.1 Vérification à un pas de calcul de $1\mu\text{s}$

Cette section présente les résultats de simulation obtenus sur PSIM et SPS pour le convertisseur CC-CC 4 quadrants formé de 2 cellules NPC 3 niveaux, pour un pas de calcul discret de  $1\mu\text{s}$ .

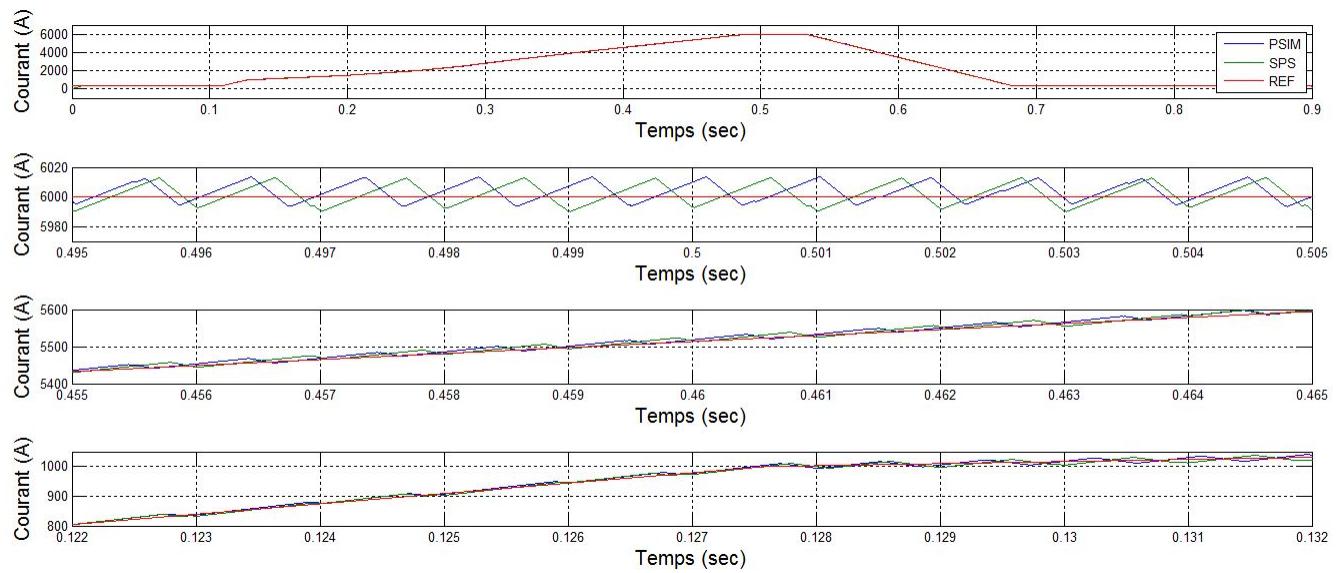


FIGURE 1.10 – Courant traversant la charge sur PSIM et SPS pour un pas de calcul de  $1\mu\text{s}$  pour le DCP/DCN

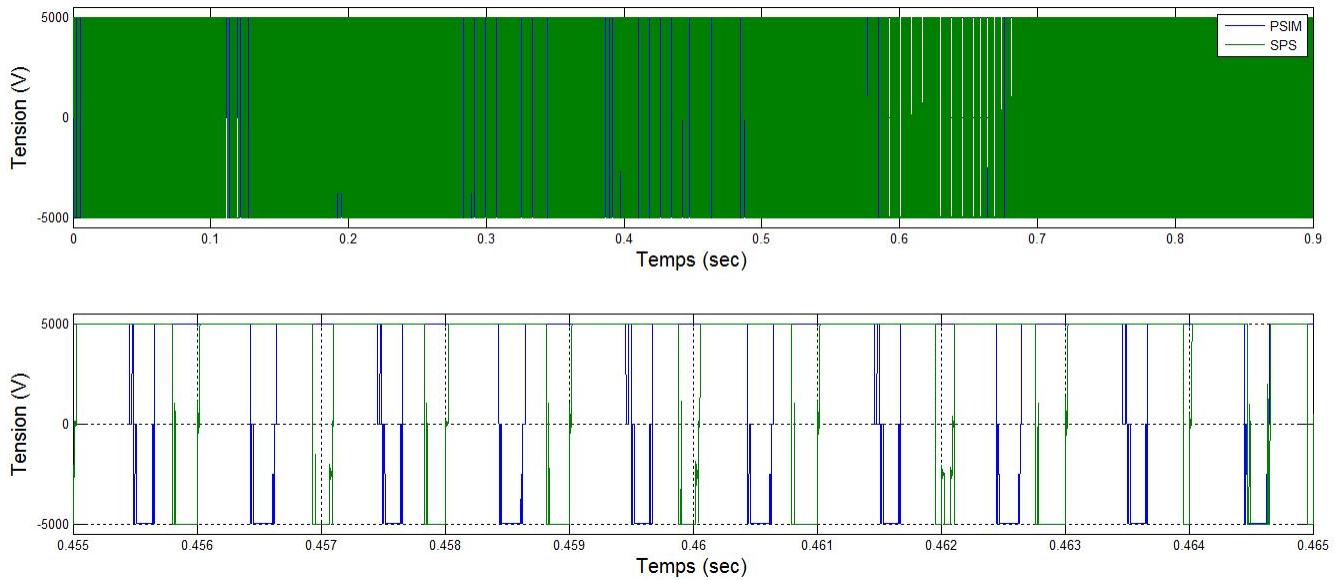


FIGURE 1.11 – Tension aux bornes de la charge sur PSIM et SPS pour un pas de calcul de  $1\mu\text{s}$  pour le DCP/DCN

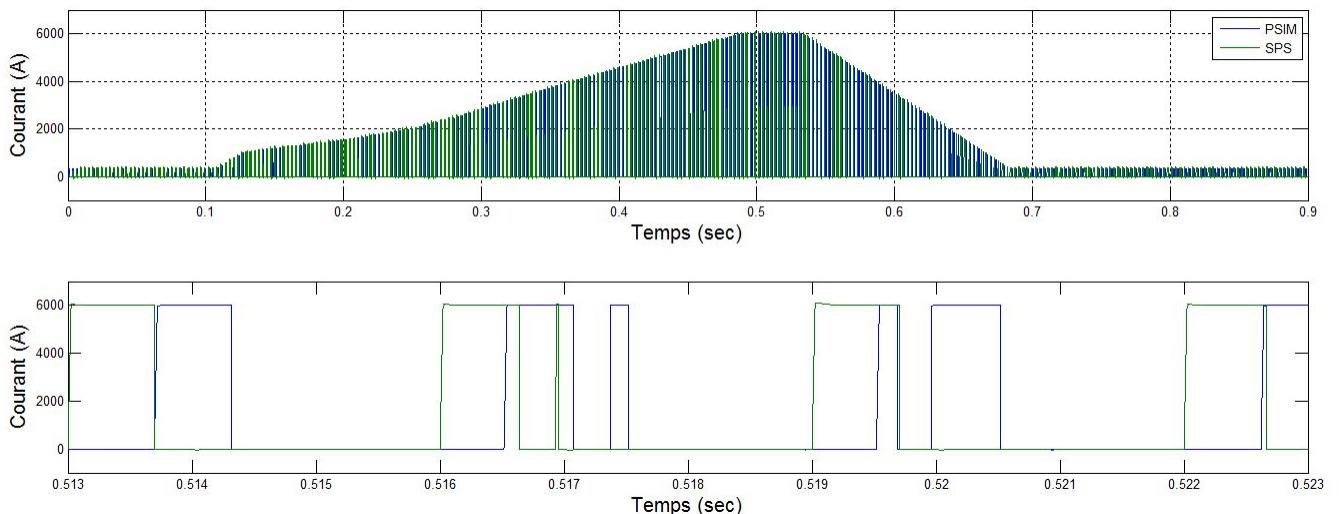


FIGURE 1.12 – Courant traversant un IGBT sur PSIM et SPS pour un pas de calcul de  $1\mu\text{s}$  pour le DCP/DCN

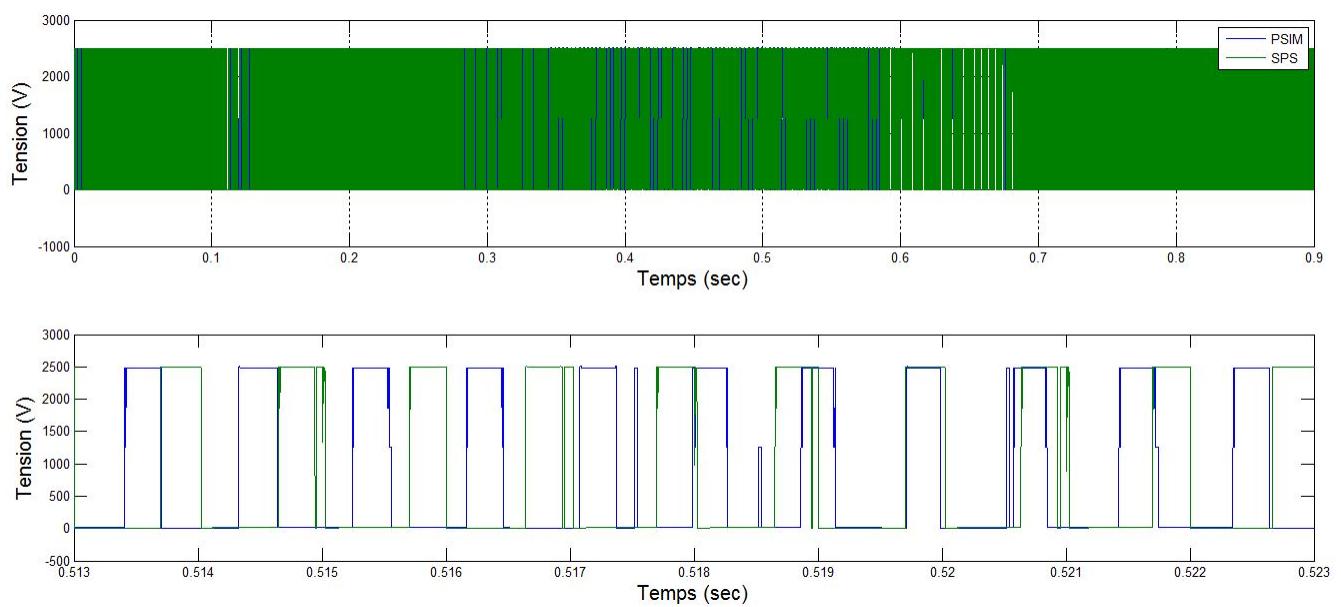


FIGURE 1.13 – Tension aux bornes d'un IGBT sur PSIM et SPS pour un pas de calcul de  $1\mu\text{s}$  pour le DCP/DCN

## 1.4 AFE 2 niveaux avec contrôle par hystérésis débitant sur une source idéale

L'AFE (Active Front End) est un redresseur triphasé permettant de réguler le facteur de puissance à l'entrée du montage. La charge étant une source idéale pour cette simulation, il est possible d'en observer le fonctionnement dans les 4 quadrants. Ce convertisseur CA/CC est constitué de 6 interrupteurs, soit deux par bras. Ce système a pour fonction d'alimenter un bus CC et de maintenir sa tension à 5kV avec un facteur de puissance variable vu à l'entrée. Une méthode de contrôle par hystérésis est employée afin de réguler le courant (en amplitude et en phase) du côté du réseau. La figure ?? est une représentation schématique de la commande de l'AFE débitant sur une source idéale. La figure 1.14 présente le circuit électrique du convertisseur. Le tableau 1.3 présente les paramètres utilisés pour la simulation.

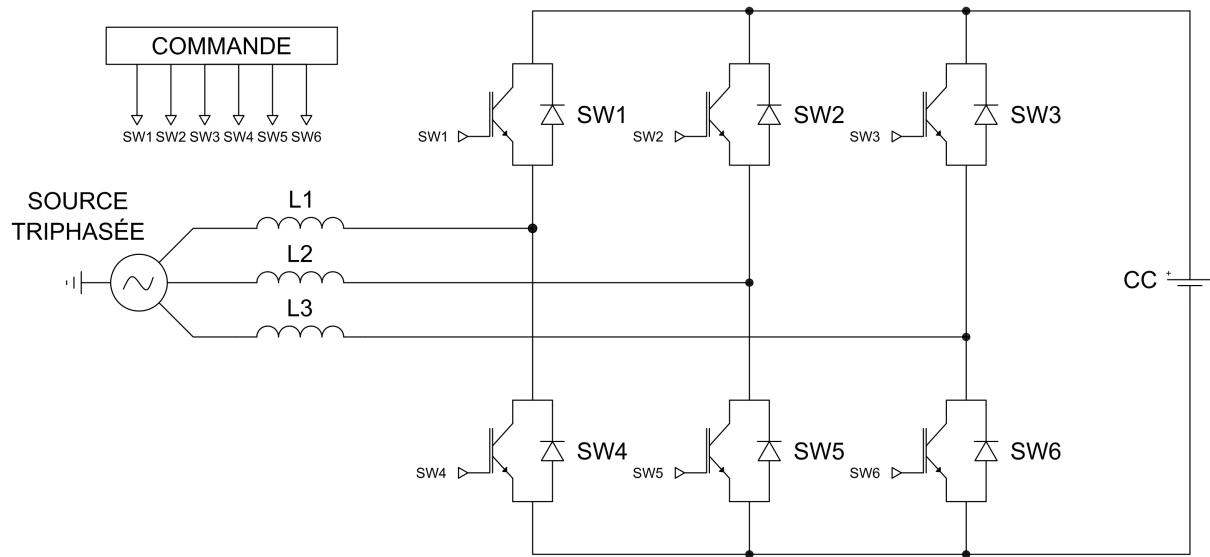


FIGURE 1.14 – Circuit électrique de l'AFE 2 niveaux sur source parfaite

Paramètre	Valeur
Tension bus CC	5000
Courant référence	1000A
Seuil hystérésis	450A
Courant maximal à l'entrée	1500A
<b>IGBT</b>	
Résistance interne	0.001Ω
Résistance du snubber	100kΩ
<b>PI de courant</b>	
Gain proportionnel	5
Gain intégrateur	20
<b>PI de phase</b>	
Gain proportionnel	0.48
Gain intégrateur	8

TABLE 1.3 – Paramètres de simulation pour l’AFE débitant sur une source idéale

### 1.4.1 Vérification pour un pas de calcul de $1\mu s$

Cette section présente les résultats de simulation de l'AFE 2 niveaux avec contrôle par hystérésis, débitant sur une source idéale, pour un pas de calcul discret de  $1\mu s$ .

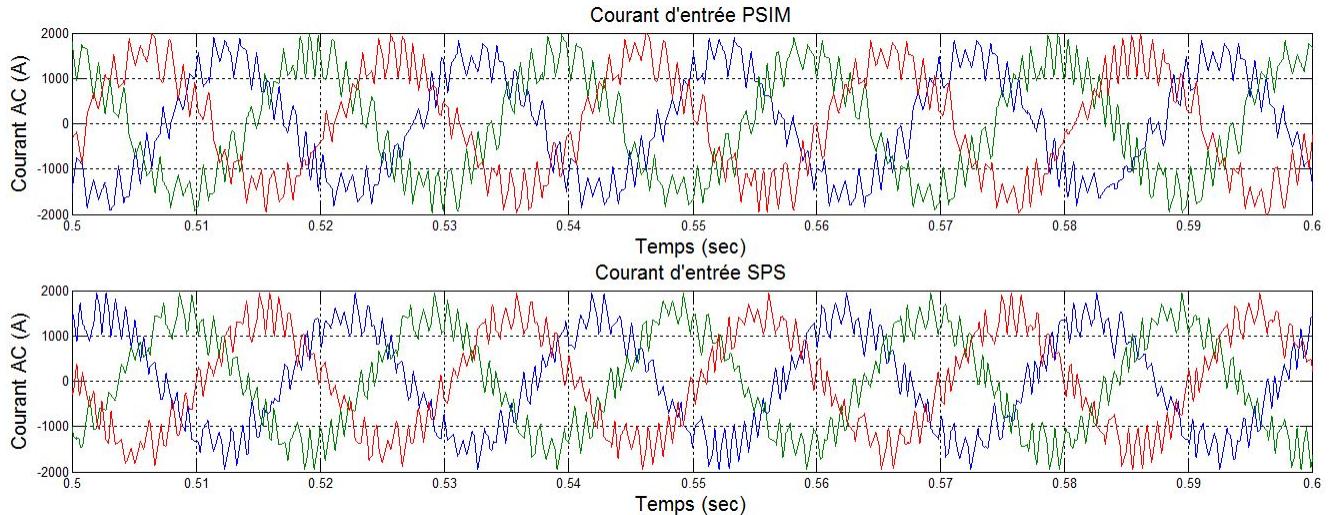


FIGURE 1.15 – Le courant d’entrée avec un pas de calcul de  $1\mu s$  pour l’AFE 2 niveaux avec contrôle par hystérésis sur source idéale

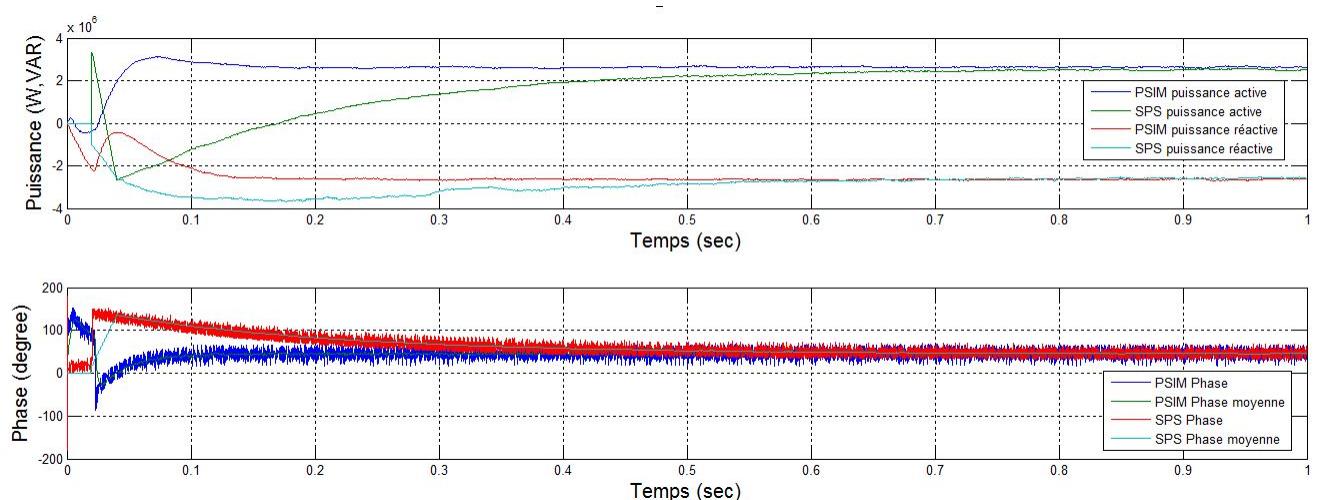


FIGURE 1.16 – Puissances active et réactive pour une courant déphasé de 45 degré pour un pas de calcul  $1\mu s$

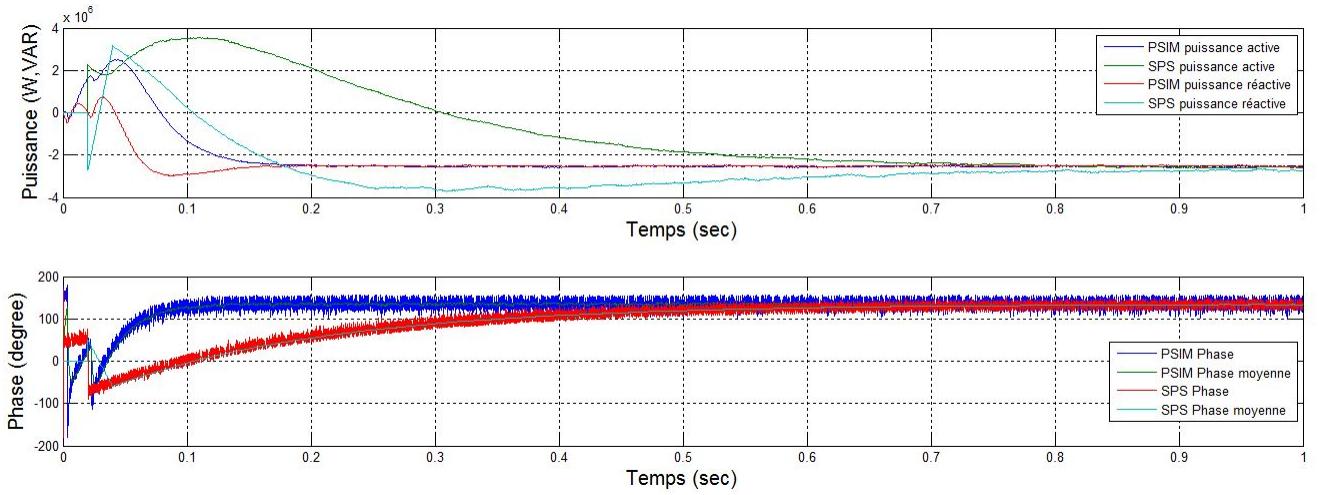


FIGURE 1.17 – Puissances active et réactive pour une courant déphasé de 135 degré pour un pas de calcul  $1\mu\text{s}$

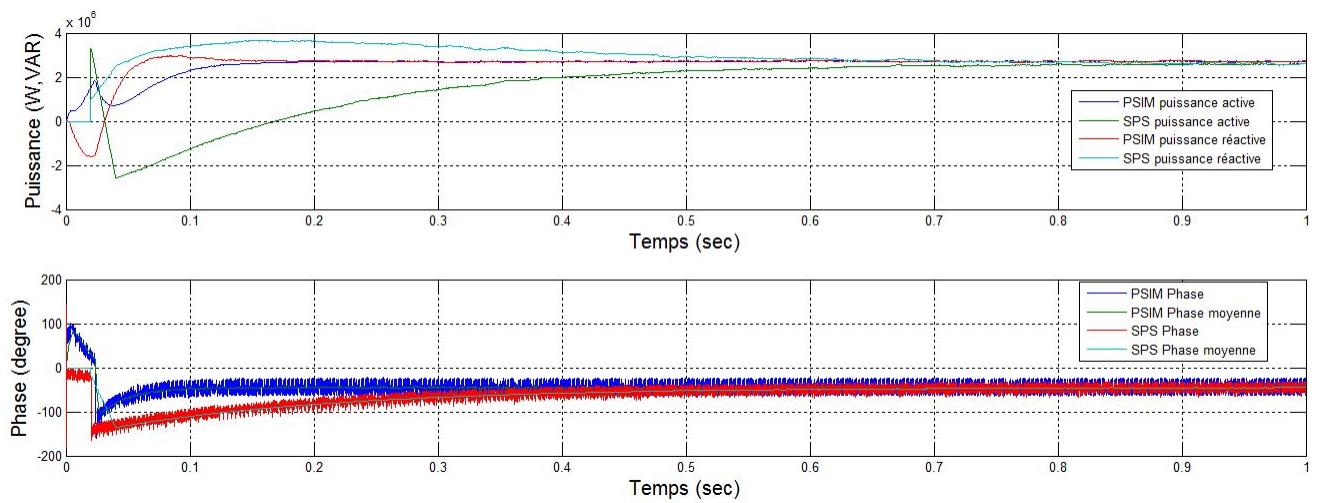


FIGURE 1.18 – Puissances active et réactive pour une courant déphasé de -45 degré pour un pas de calcul  $1\mu\text{s}$

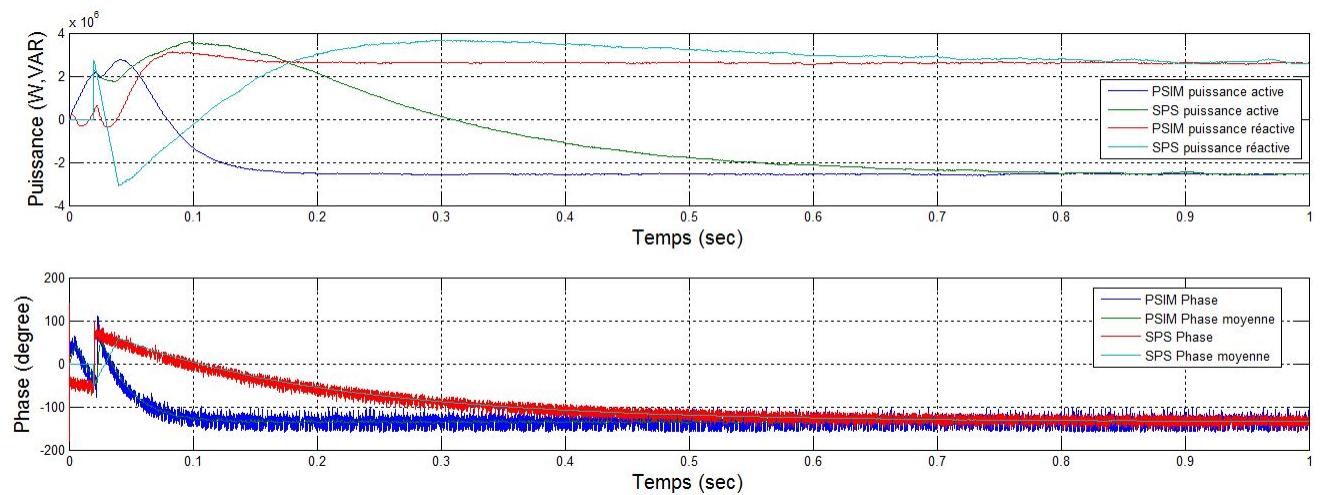


FIGURE 1.19 – Puissances active et réactive pour une courant déphasé de -135 degré pour un pas de calcul  $1\mu\text{s}$

## 1.5 AFE 2 niveaux avec contrôle par hystérésis débitant sur une charge RC

Le modèle de redresseur 2 niveaux AFE avec contrôle par hystérésis débitant sur une charge RC est le même que celui présenté dans la figure ???. Le circuit du convertisseur est présenté à la figure 1.20. La source idéale du montage précédent est remplacée par une charge RC, composée d'une résistance de  $9.26\Omega$  et d'un condensateur initialement chargé à  $5000V$ , d'une capacité de  $330mF$ . De plus, contrairement au montage précédent, il n'y a plus de rétroaction sur l'angle du courant. L'angle de la référence de courant est en phase avec la tension du réseau (pour un fonctionnement à facteur unitaire). La figure 1.21 représente le calcul de transformée de Fourier discrète (fft) d'une phase du courant d'entrée. Les paramètres de l'hystérésis ont été ajustés afin que la fréquence de commutation (qui glisse avec cette méthode de commande), soit proche de  $1kHz$ . Le tableau 1.4 présente les paramètres utilisés pour l'AFE 2 niveaux débitant sur une charge RC.

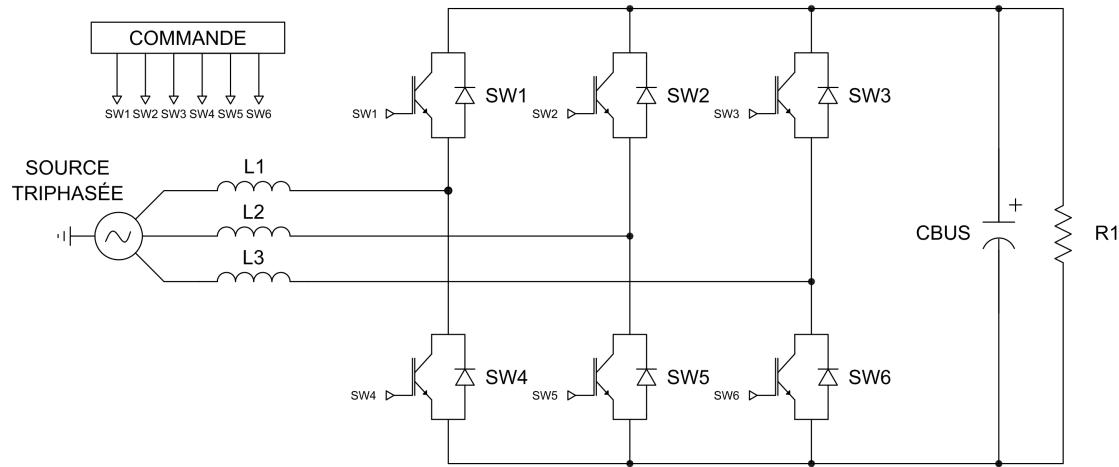


FIGURE 1.20 – Circuit électrique de l'AFE 2 niveaux sur une charge RC

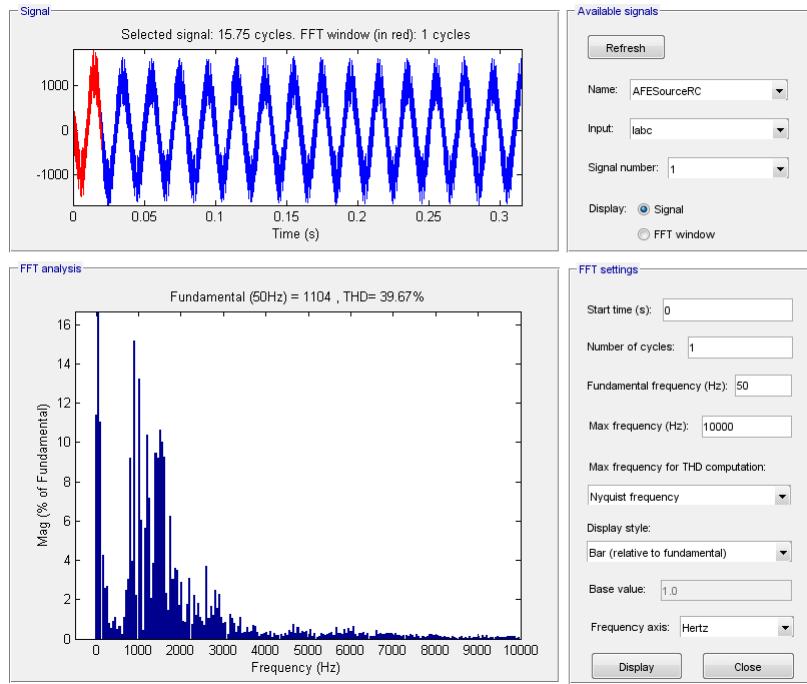


FIGURE 1.21 – La transformée de Fourier discrète (fft) du courant d’entrée à  $1\mu\text{s}$

Paramètre	Valeur
Tension de référence CC	5000 V
Seuil hystérésis	450 A
Courant maximal à l’entrée	1500 A
<b>IGBT</b>	
Résistance interne	0.001 $\Omega$
Résistance du snubber	100k $\Omega$
<b>PI courant</b>	
Gain proportionnel	5
Gain intégrateur	20
<b>Charge</b>	
Résistance	9.26 $\Omega$
Capacité d’entrée	330 mF

TABLE 1.4 – Paramètres de simulation pour l’AFE 2 niveaux avec contrôle par hystérésis débitant sur charge RC

### 1.5.1 Vérification pour un pas de calcul de $1\mu\text{s}$

Cette section présente les résultats de simulation de l'AFE 2 niveaux avec contrôle pas hystérésis sur charge RC, pour un pas de calcul discret de  $1\mu\text{s}$ .

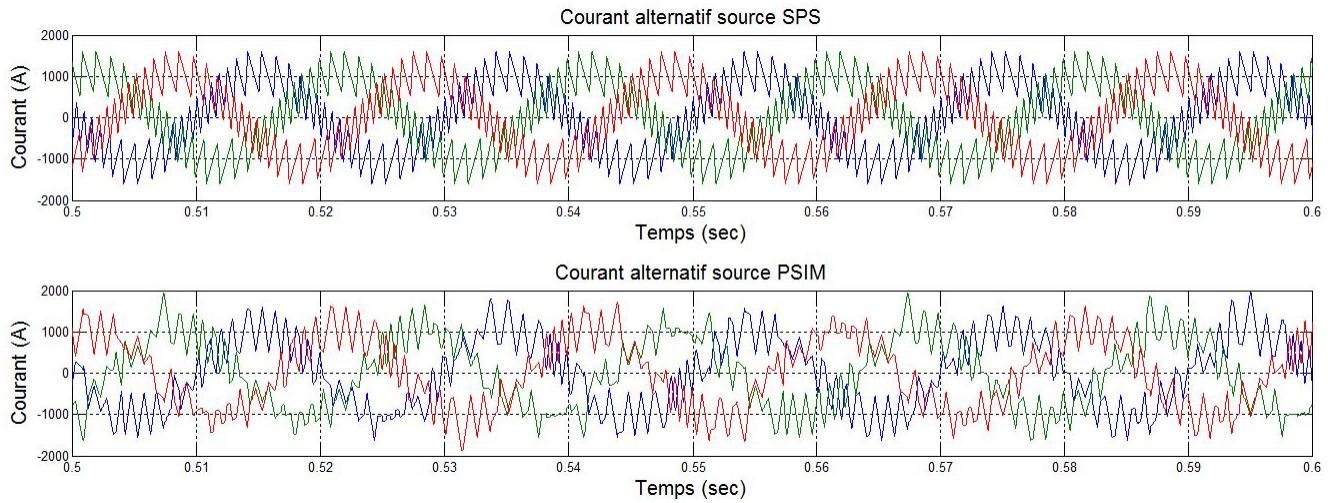


FIGURE 1.22 – Le courant d’entrée à  $1\mu\text{s}$  pour l’AFE sur charge RC

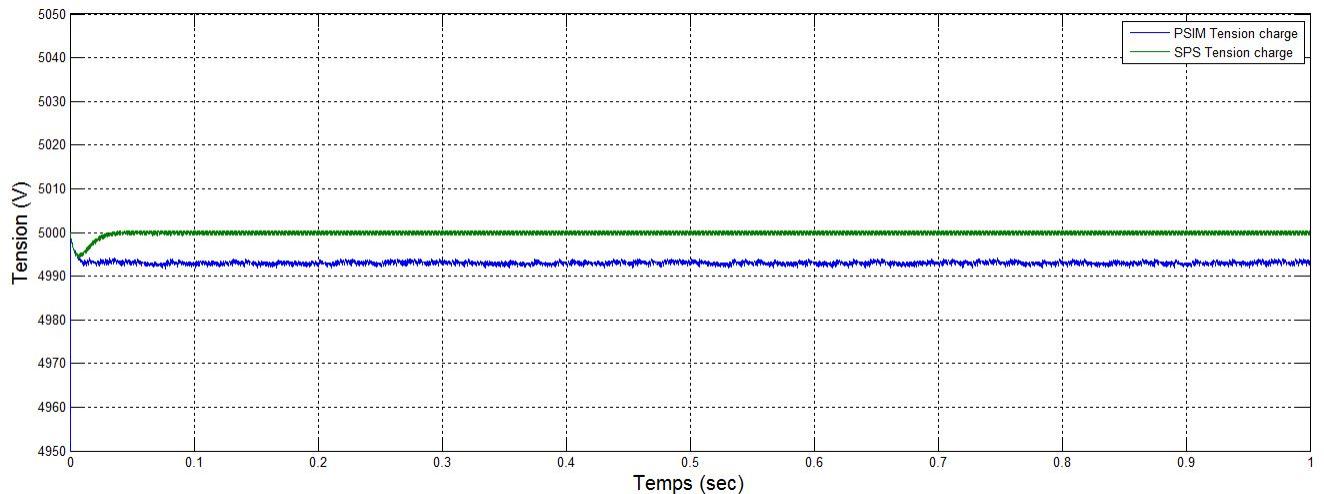


FIGURE 1.23 – La tension à la charge à  $1\mu\text{s}$  pour l’AFE sur charge RC

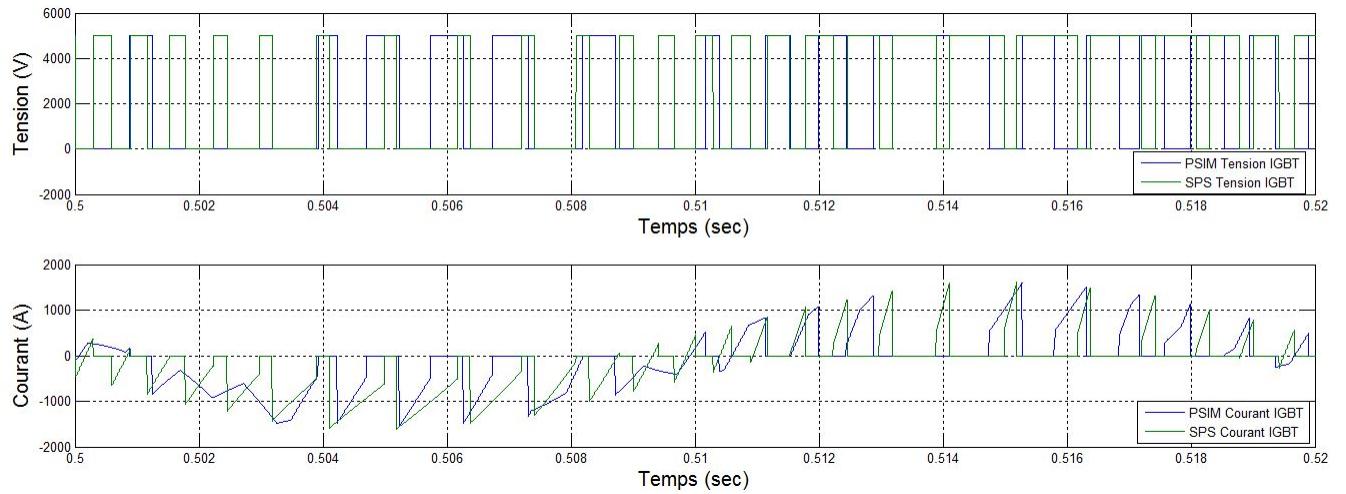


FIGURE 1.24 – La tension et le courant au bornes d'un IGBT à  $1\mu\text{s}$  pour l'AFE sur charge RC

## 1.6 AFE 3 niveaux NPC avec contrôle par MLI

L'AFE 3 niveaux NPC avec contrôle par MLI est composé de 12 interrupteurs IGBT ainsi que de 6 diodes de point milieu. Il représente la version finale du sous-système de l'AFE. La méthode de commande implantée diffère de celle implantée au CERN qui utilise une transformation de Park afin de simplifier le contrôle. Le circuit électrique de l'AFE 3 niveaux sur charge RC est présenté à la figure 1.25. Le tableau 1.5 présente les paramètres utilisés avec l'AFE 3 niveaux NPC.

Paramètre	Valeur
Tension référence CC	5000 V
Fréquence de modulation	1000 Hz
Courant maximal à l'entrée	1500 A
<b>IGBT</b>	
Résistance interne	0.001 $\Omega$
Résistance du snubber	100k $\Omega$
<b>PI courant</b>	
Gain proportionnel	5
Gain intégrateur	20
<b>PI commande</b>	
Rapport cyclique maximal	0.95
Gain proportionnel	1.5611
Gain intégrateur	24.6
<b>Charge</b>	
Résistance	9.26 $\Omega$
Capacité d'entrée	330 mF

TABLE 1.5 – Paramètres de simulation pour l'AFE 3 niveaux NPC avec contrôle par MLI

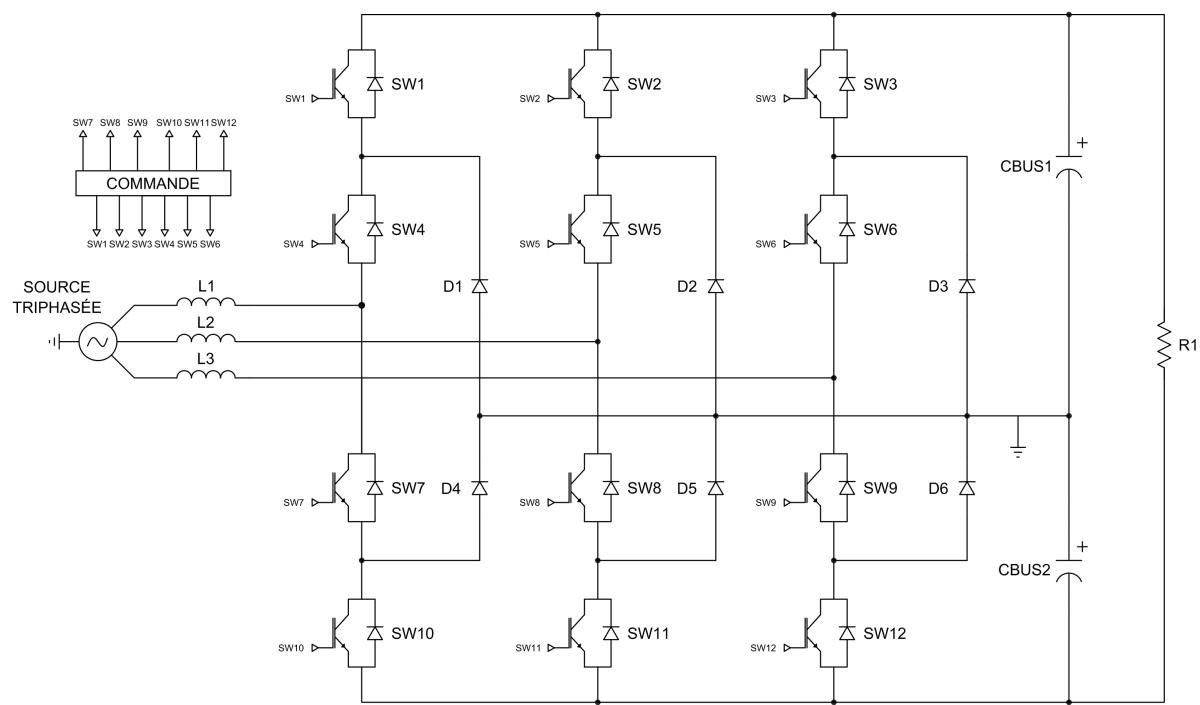


FIGURE 1.25 – Circuit électrique de l'AFE 3 niveaux sur charge RC

### 1.6.1 Vérification pour un pas de calcul de $1\mu\text{s}$

Cette section présente les courbes d'intérêt pour la simulation de l'AFE 3 niveaux NPC avec contrôle par MLI, pour un pas de  $1\mu\text{s}$ .

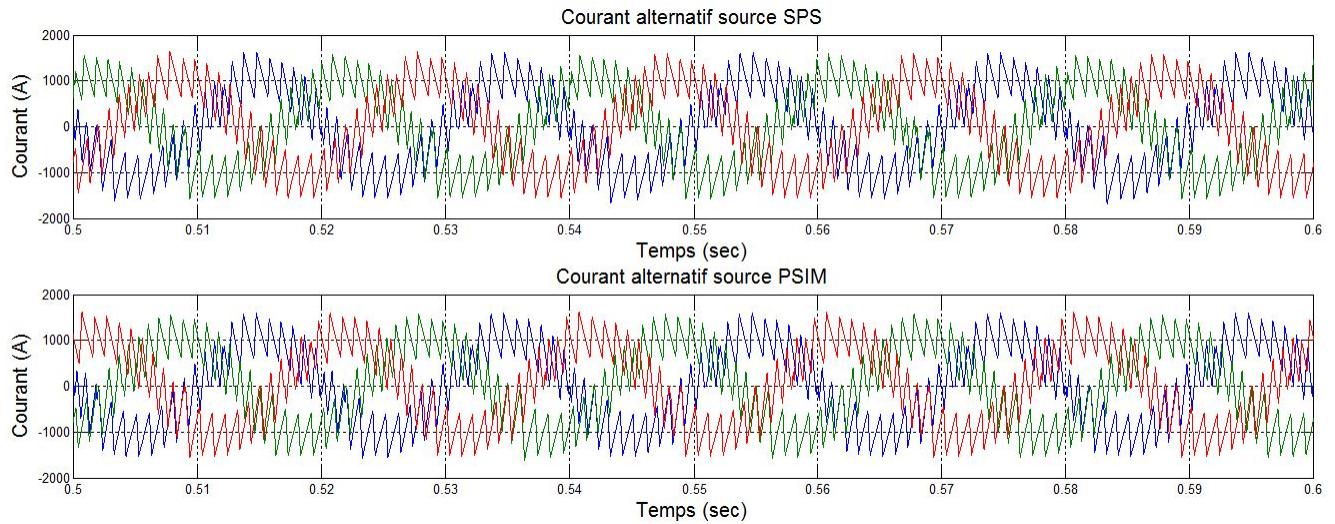


FIGURE 1.26 – Le courant d’entrée pour un pas de calcul de  $1\mu\text{s}$ , pour l’AFE 3 niveaux

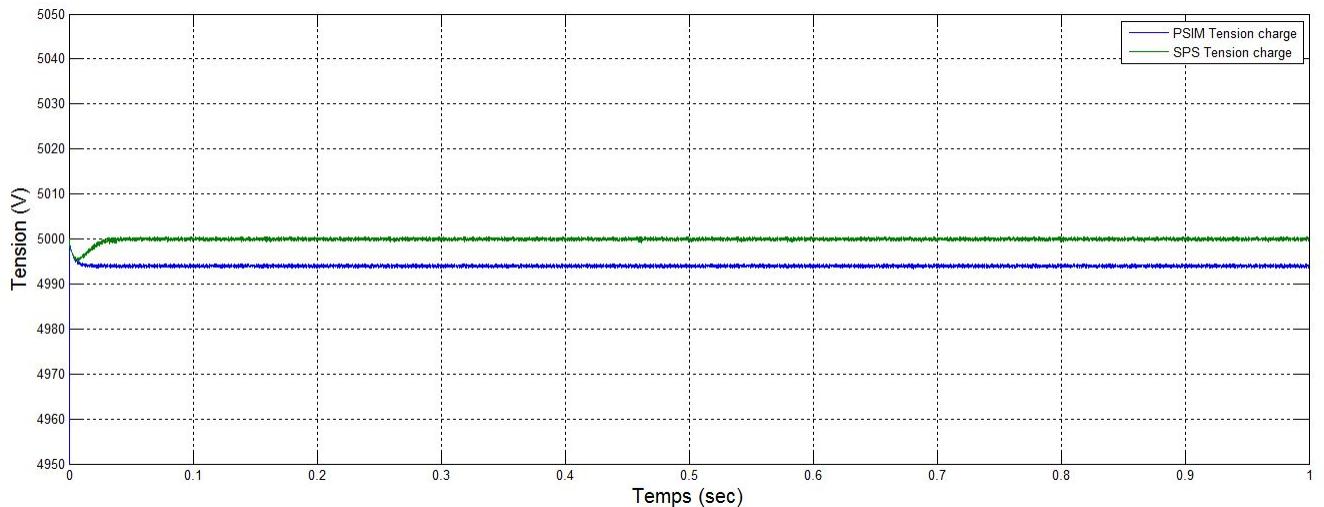


FIGURE 1.27 – La tension à la charge pour un pas de calcul de  $1\mu\text{s}$ , pour l’AFE 3 niveaux

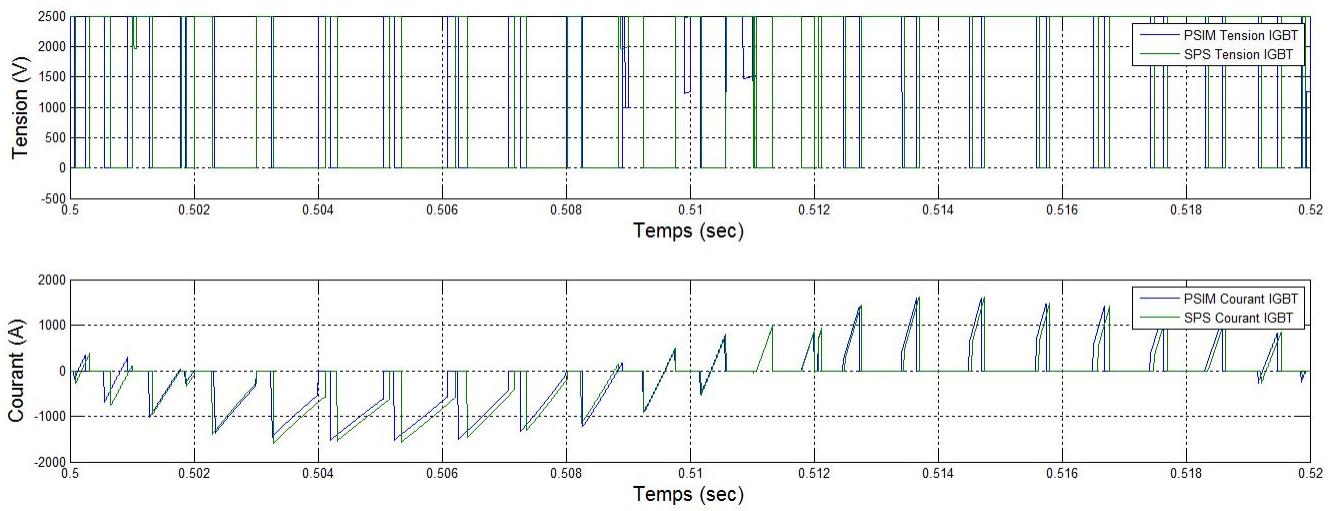


FIGURE 1.28 – La tension et le courant au niveau d'un IGBT pour un pas de calcul de  $1\mu\text{s}$ , pour l'AFE 3 niveaux

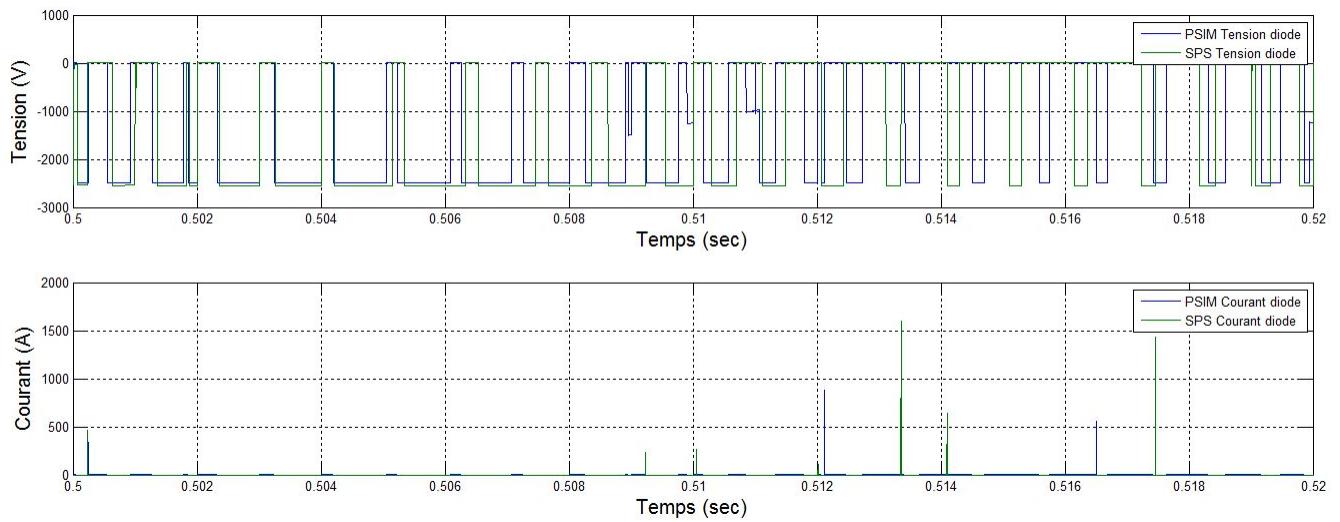


FIGURE 1.29 – La tension et le courant au niveau d'une diode pour un pas de calcul de  $1\mu\text{s}$ , pour l'AFE 3 niveaux

## 1.7 AFE 2 niveaux avec contrôle par hystérésis et hacheur 4 quadrants à 4 IGBT

Cette section présente les résultats de simulations obtenus sur PSIM et SPS pour l'AFE 2 niveaux avec contrôle par hystérésis et hacheur 4 quadrants à 4 IGBT. Le circuit électrique des 2 convertisseurs est présenté à la figure 1.30. Le tableau 1.6 présente les paramètres utilisés dans les simulations.

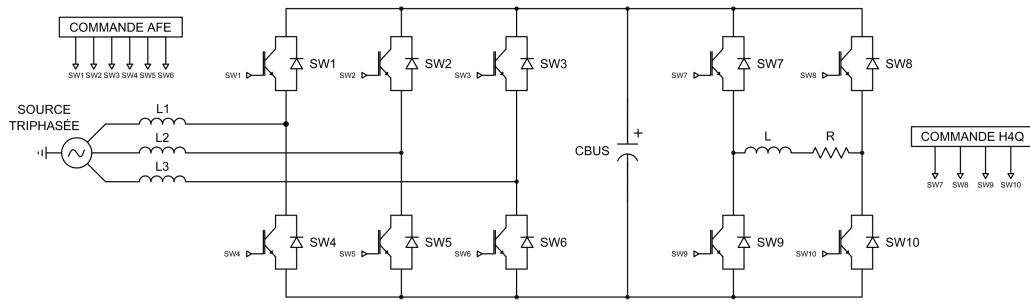


FIGURE 1.30 – Circuit électrique de l'AFE 2 niveaux avec contrôle par hystérésis et hacheur 4 quadrants à 4 IGBT

Paramètre	Valeur
<b>AFE 2 niveaux</b>	
Tension référence CC	5000 V
Seuil hystérésis	450A
Courant maximal à l'entrée	1500A
<b>IGBT AFE</b>	
Résistance interne	0.001 $\Omega$
Résistance du snubber	100k $\Omega$
<b>PI courant AFE</b>	
Gain proportionnel	5
Gain intégrateur	20
<b>Bus CC</b>	
Capacité d'entrée	330 mF
<b>Hacheur 4 quadrants</b>	
Fréquence de modulation	1000 Hz
Rapport cyclique maximal	0.95
<b>IGBT hacheur</b>	
Résistance interne	0.001 $\Omega$
Résistance du snubber	100k $\Omega$
<b>PI hacheur</b>	
Gain proportionnel	0.071
Gain intégrateur	50
<b>Charge</b>	
Résistance	0.28 $\Omega$
Inductance	0.1 H

TABLE 1.6 – Paramètres de simulation pour l'hacheur 4 quadrants à 4 interrupteurs avec l'AFE 2 niveaux

## Vérification pour un pas de calcul de $1\mu\text{s}$

Cette section présente les résultats de simulation pour l'hacheur 4 quadrants à 4 interrupteurs avec l'AFE 2 niveaux sur PSIM et sur SPS, pour un pas de calcul discret de  $1\mu\text{s}$ .

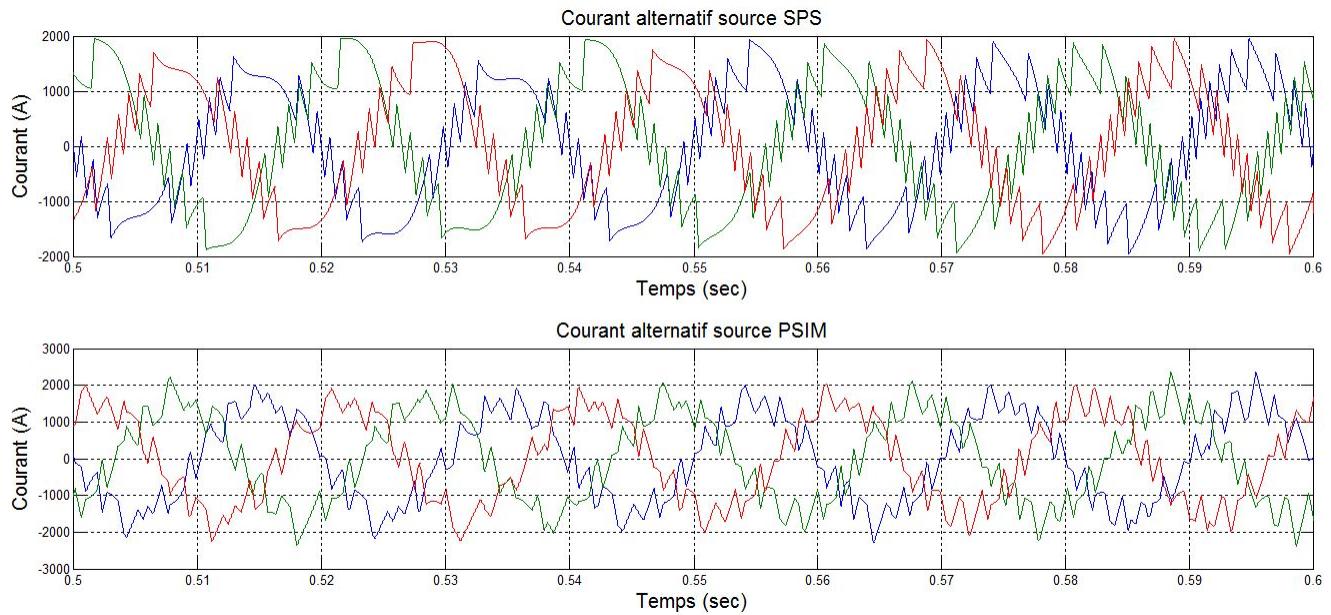


FIGURE 1.31 – Le courant d’entrée à  $1\mu\text{s}$  section AFE

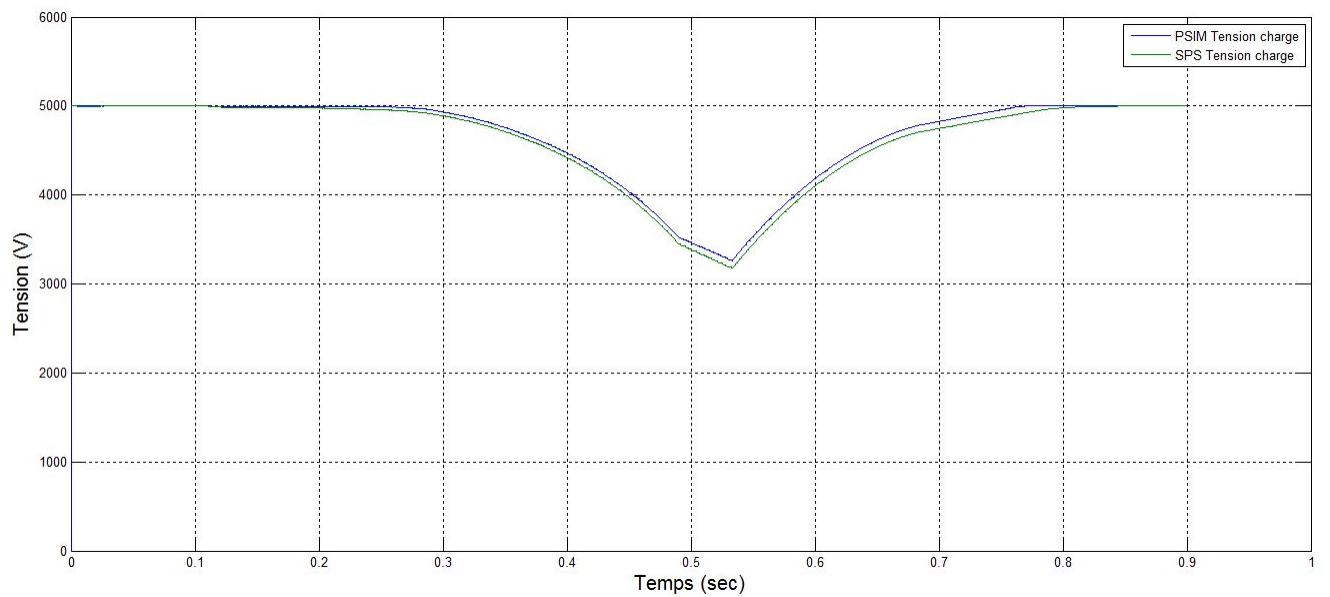


FIGURE 1.32 – La tension au bus CC à  $1\mu\text{s}$  section AFE

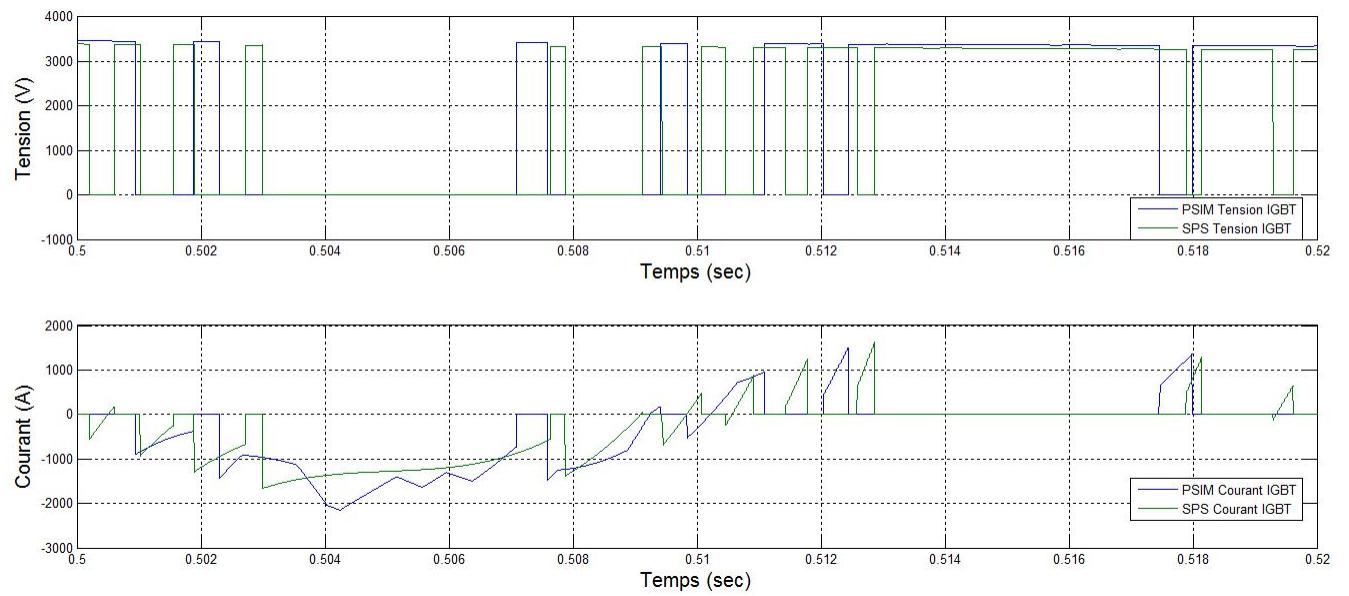


FIGURE 1.33 – La tension et le courant au niveau d'un IGBT à  $1\mu\text{s}$  au niveau de l'AFE

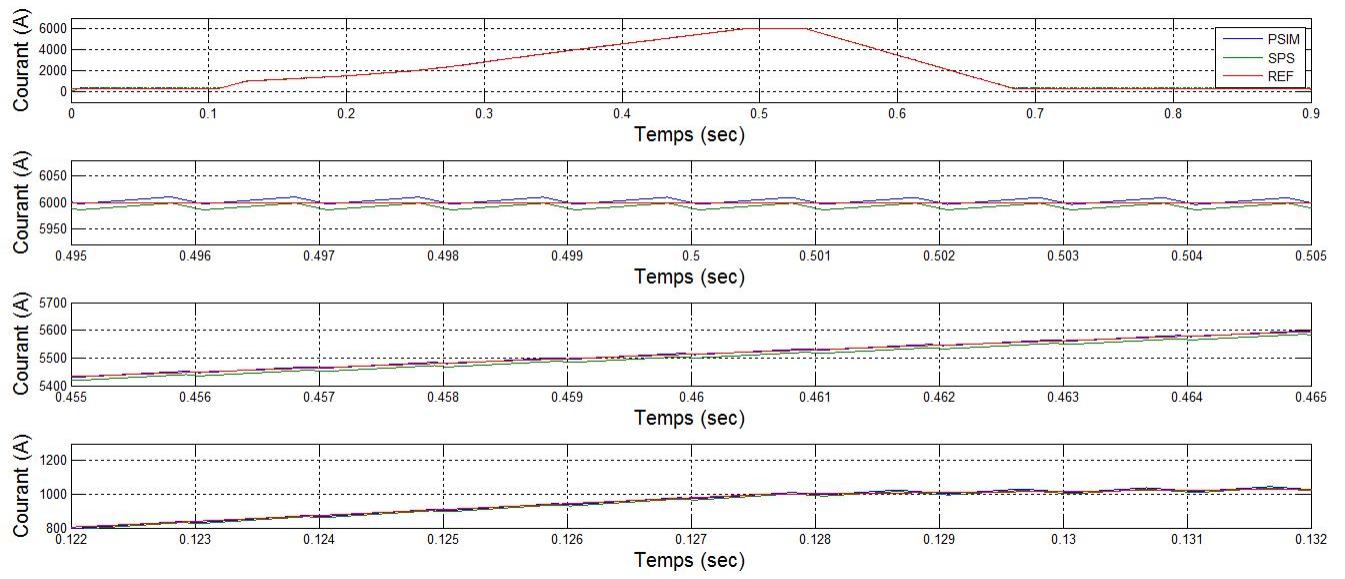


FIGURE 1.34 – Le courant au niveau de la charge à  $1\mu s$

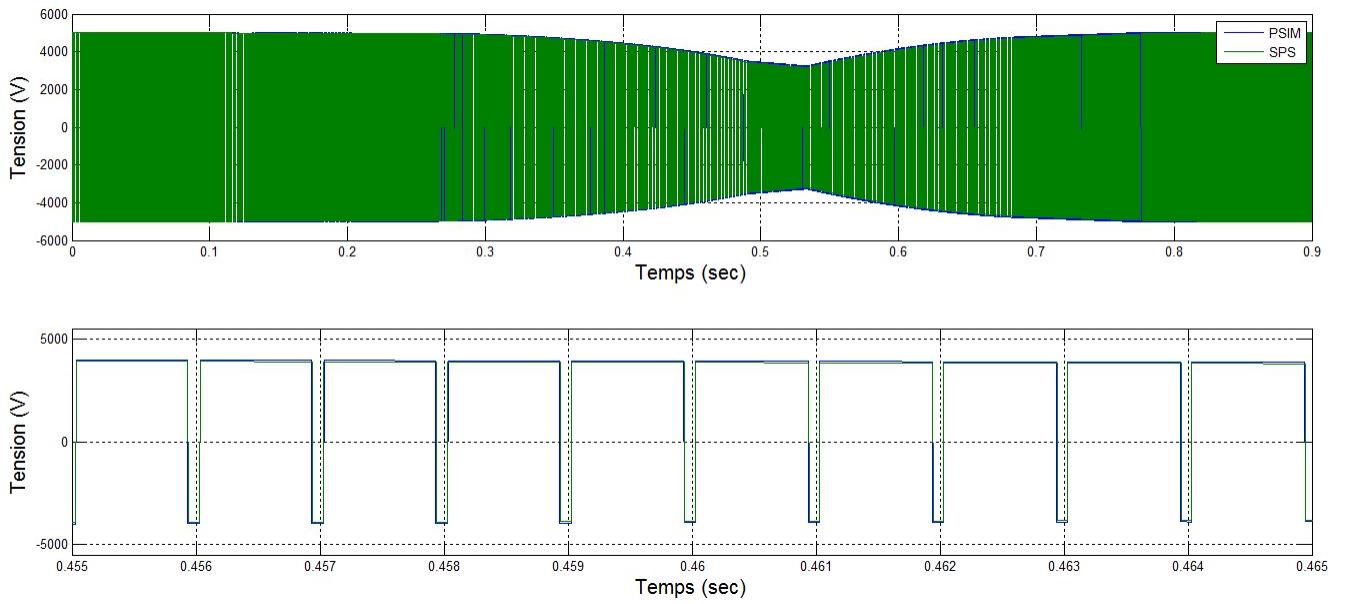


FIGURE 1.35 – La tension au niveau de la charge à  $1\mu s$

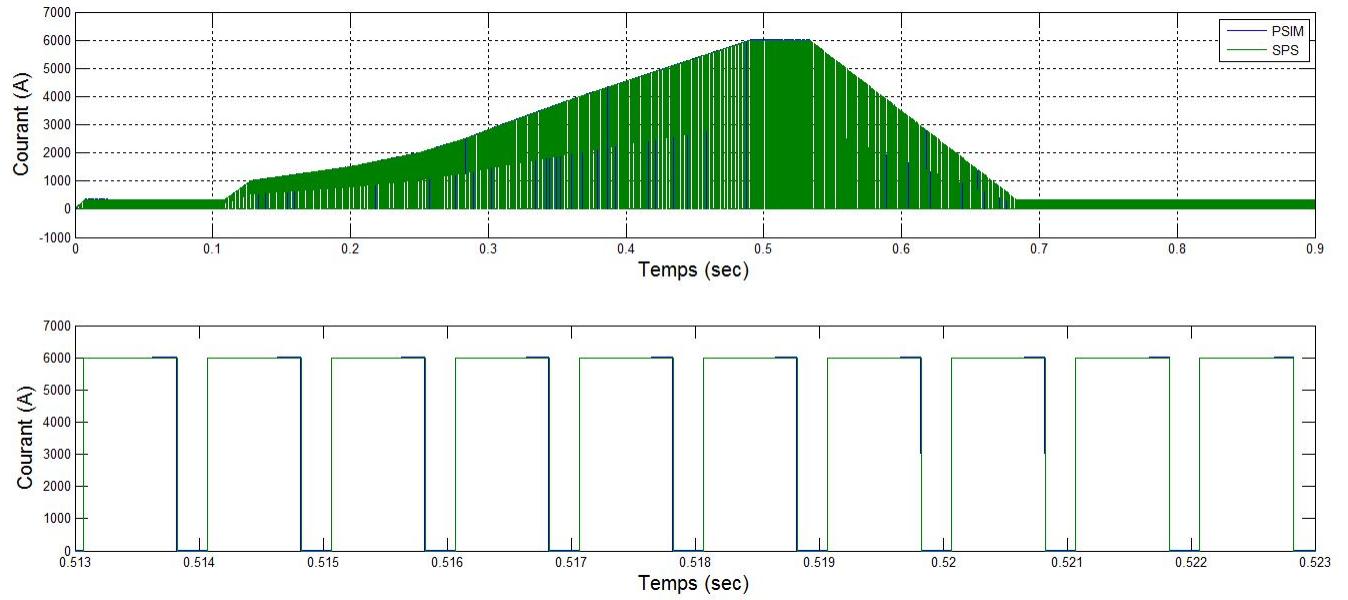


FIGURE 1.36 – Le courant aux bornes d'un IGBT à  $1\mu\text{s}$  pour le hacheur 4 quadrants

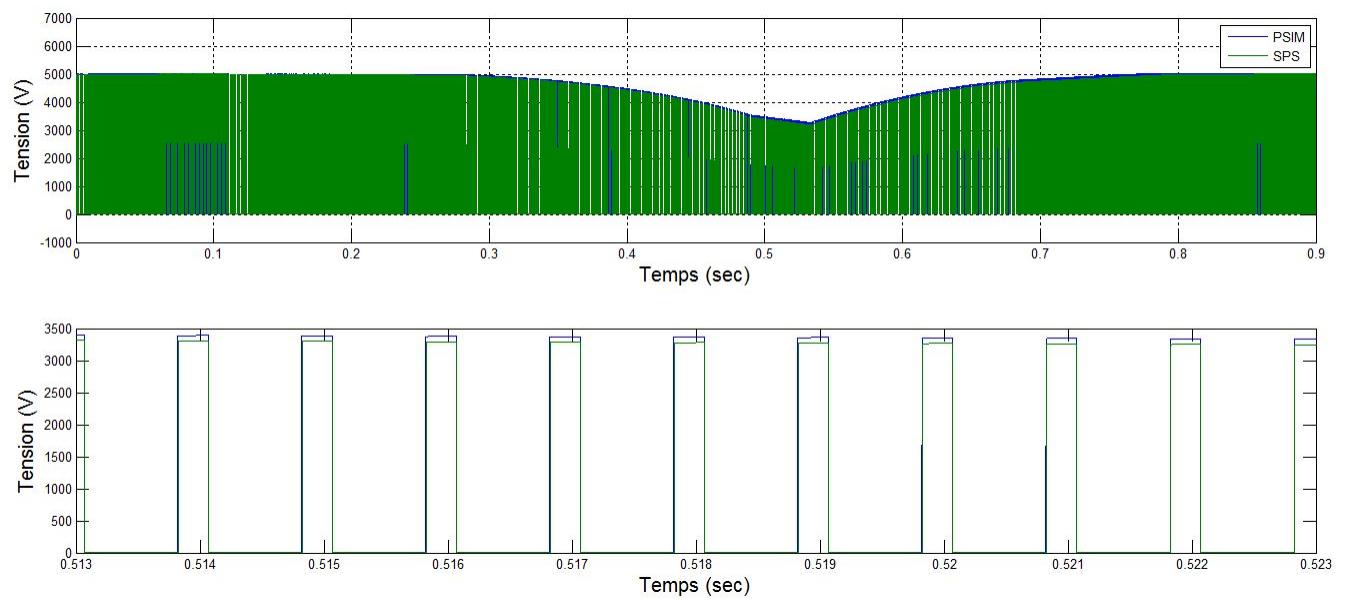


FIGURE 1.37 – La tension aux bornes d'un IGBT à  $1\mu\text{s}$  pour le hacheur 4 quadrants

## 1.8 AFE 3 niveaux NPC avec contrôle par MLI avec convertisseur CC-CC formé de 2 cellules NPC 3 niveaux

Cette section présente les résultats de simulations obtenus sur PSIM et sur SPS pour le système complet, formé d'un redresseur AFE 3 niveaux avec régulation MLI et d'un convertisseur CC-CC composé de 2 cellules NPC 3 niveaux. Le circuit électrique du système complet est présenté à la figure 1.38. Le tableau 1.7 présente les paramètres utilisés dans les sous-systèmes.

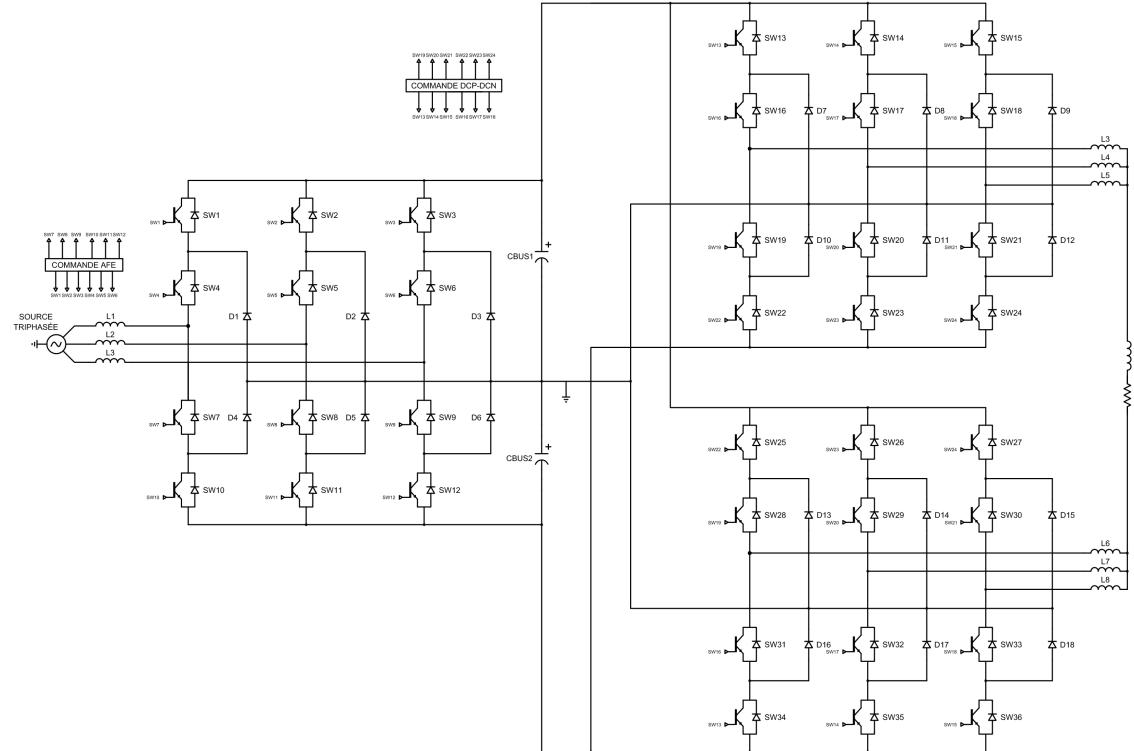


FIGURE 1.38 – Circuit électrique de l'AFE 3 niveaux avec contrôle par hystérésis avec le DCP/DCN

### 1.8.1 Vérification pour un pas de calcul de $1\mu\text{s}$

Cette section présente les résultats de simulations pour le système complet formé de l'AFE 3 niveaux avec régulation MLI et d'un convertisseur CC-CC composé de 2 cellules NPC 3 niveaux, pour un pas de calcul discret de  $1\mu\text{s}$ .

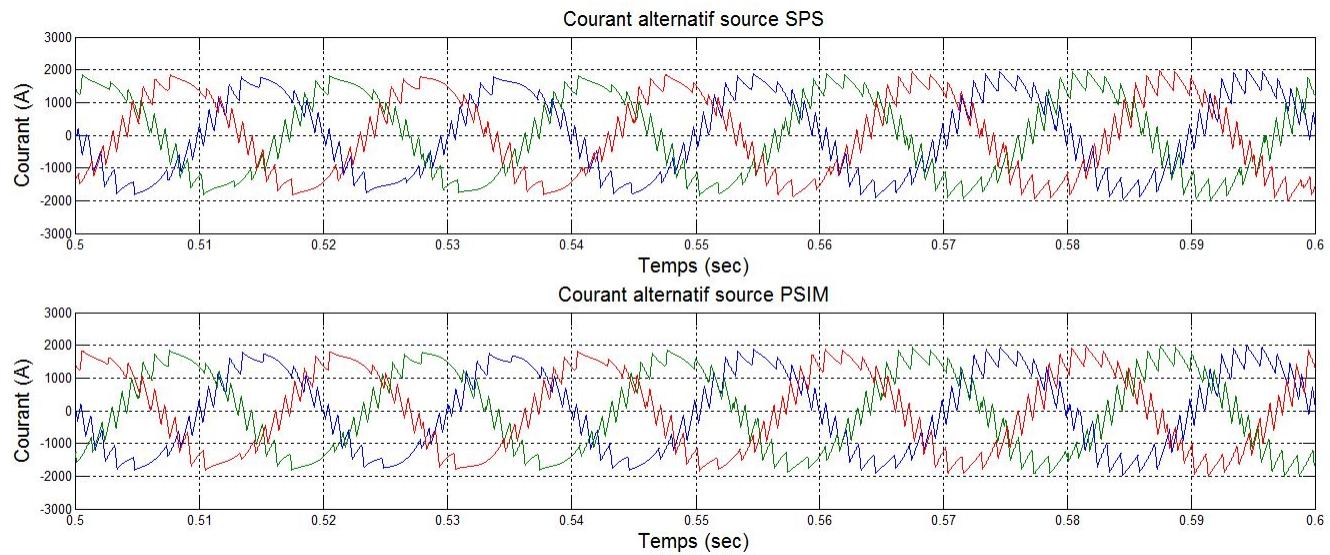


FIGURE 1.39 – Le courant d’entrée de l’AFE pour un pas de calcul de  $1\mu\text{s}$

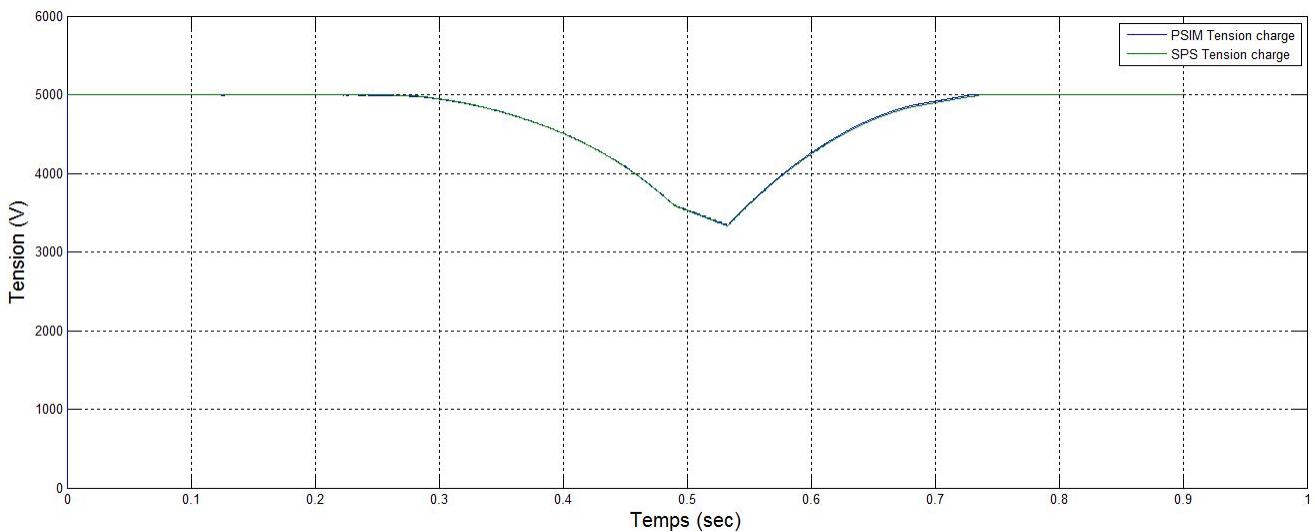


FIGURE 1.40 – La tension du bus CC pour un pas de calcul de  $1\mu\text{s}$

Paramètre	Valeur
<b>AFE 3 niveaux</b>	
Tension référence CC	5000 V
Fréquence de modulation	1000 Hz
Courant maximal à l'entrée	1500A
<b>IGBT AFE</b>	
Résistance interne	0.001 $\Omega$
Résistance du snubber	100k $\Omega$
<b>PI courant AFE</b>	
Gain proportionnel	5
Gain intégrateur	20
<b>PI commande AFE</b>	
Rapport cyclique maximal	0.95
Gain proportionnel	1.5611
Gain intégrateur	24.6
<b>Bus CC</b>	
Capacité	330 mF
<b>DCP/DCN</b>	
Fréquence de modulation	333 Hz
Rapport cyclique maximal	1
Inductance de couplage	10e-6 H
<b>IGBT DCP/DCN</b>	
Résistance interne	0.001 $\Omega$
Résistance du snubber	100k $\Omega$
<b>PI DCP/DCN</b>	
Gain proportionnel	1.5611
Gain intégrateur	24.6
<b>Charge</b>	
Résistance	0.28 $\Omega$
Inductance	0.1 H

TABLE 1.7 – Paramètres de simulation pour le DCP/DCN avec l'AFE 3 niveaux

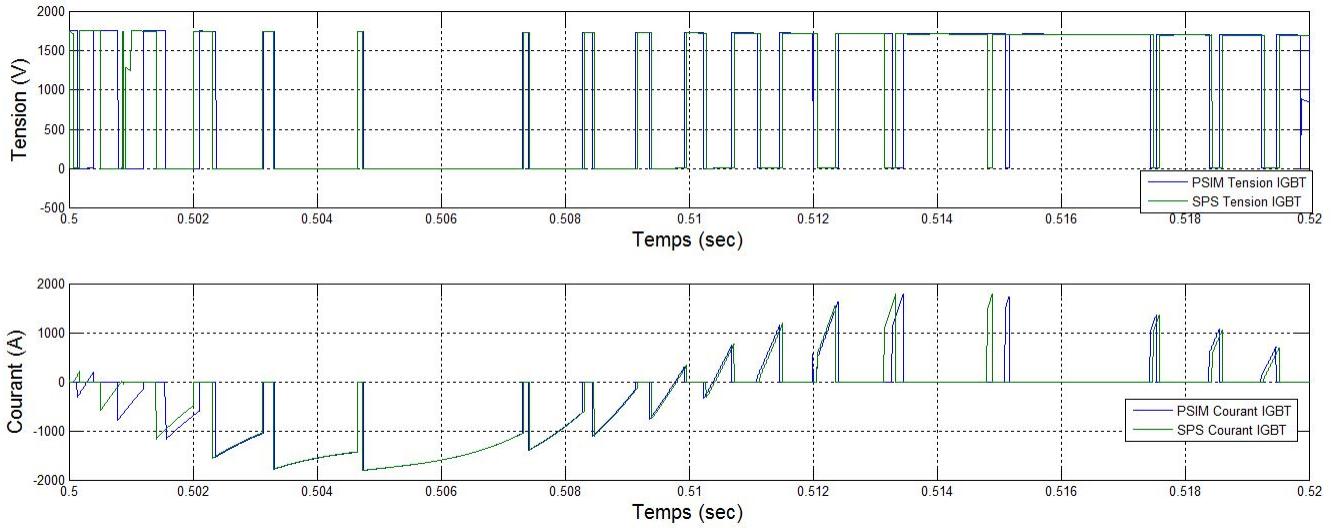


FIGURE 1.41 – La tension et le courant aux bornes d'un IGBT de l'AFE pour un pas de calcul de  $1\mu\text{s}$

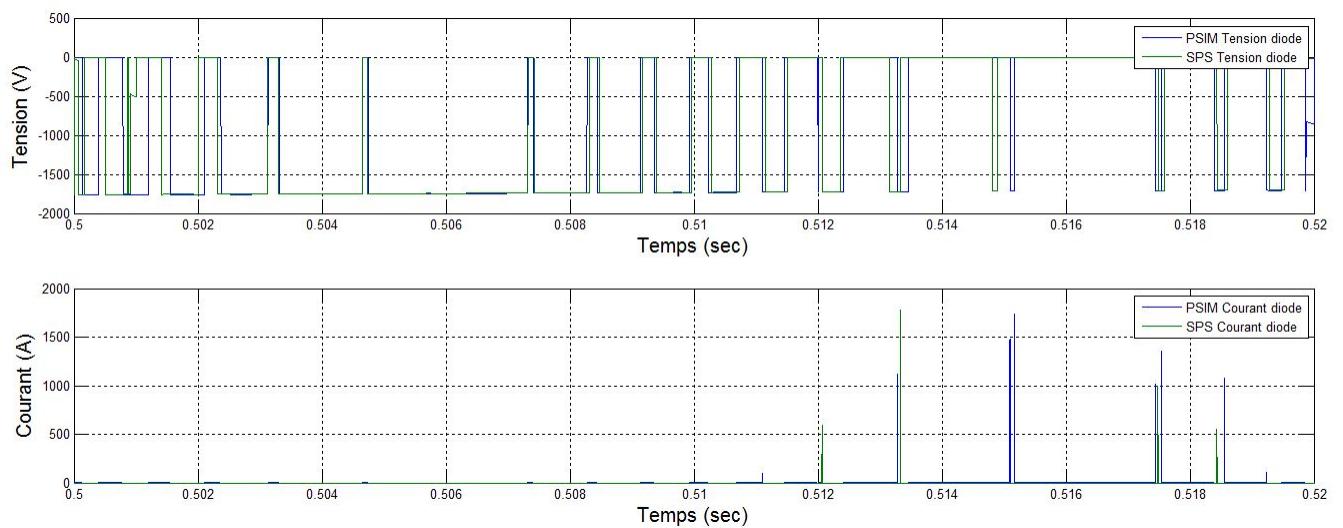


FIGURE 1.42 – La tension et le courant aux bornes d'une diode de point milieu de l'AFE à  $1\mu\text{s}$

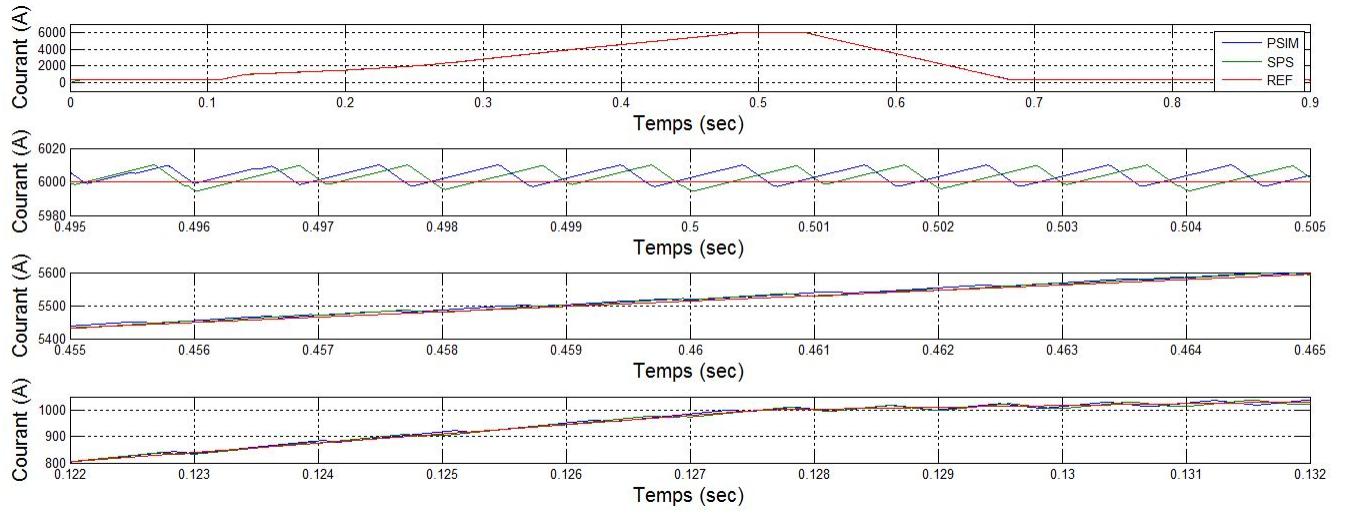


FIGURE 1.43 – Le courant aux bornes des électroaimants pour un pas de calcul de  $1\mu\text{s}$

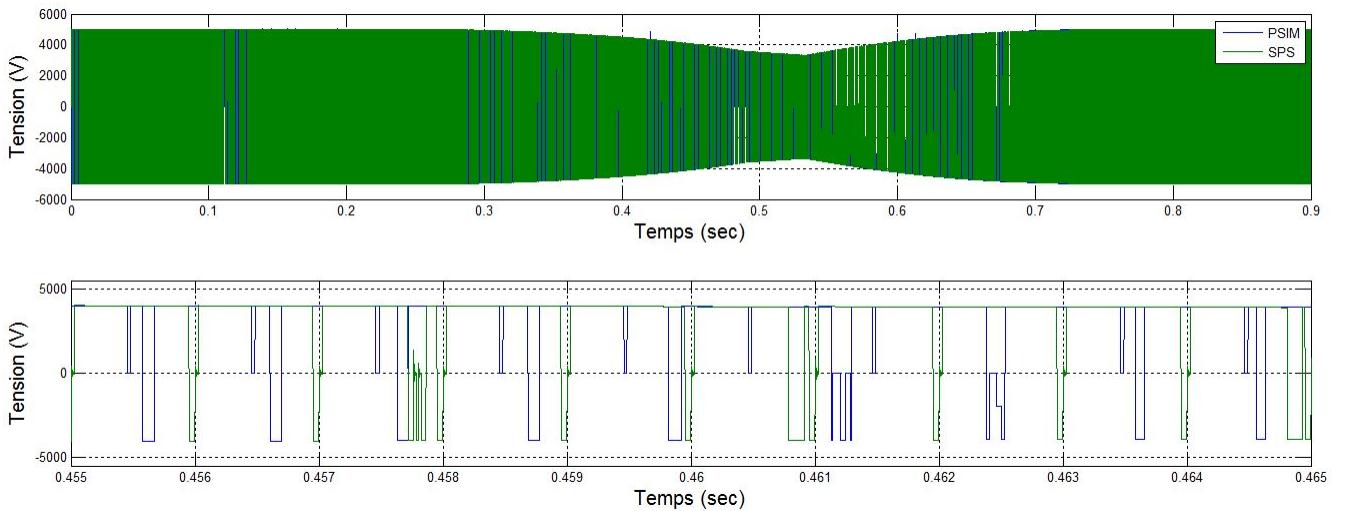


FIGURE 1.44 – La tension aux bornes des électroaimants pour un pas de calcul de  $1\mu\text{s}$

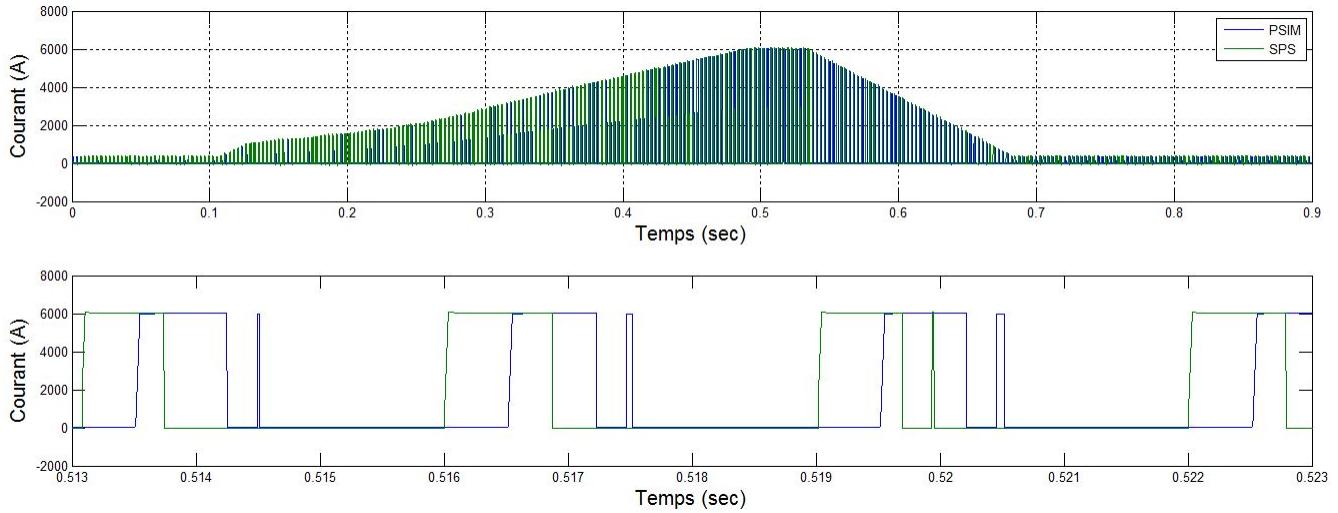


FIGURE 1.45 – Le courant traversant un IGBT du DCP/DCN pour un pas de calcul de à  $1\mu s$

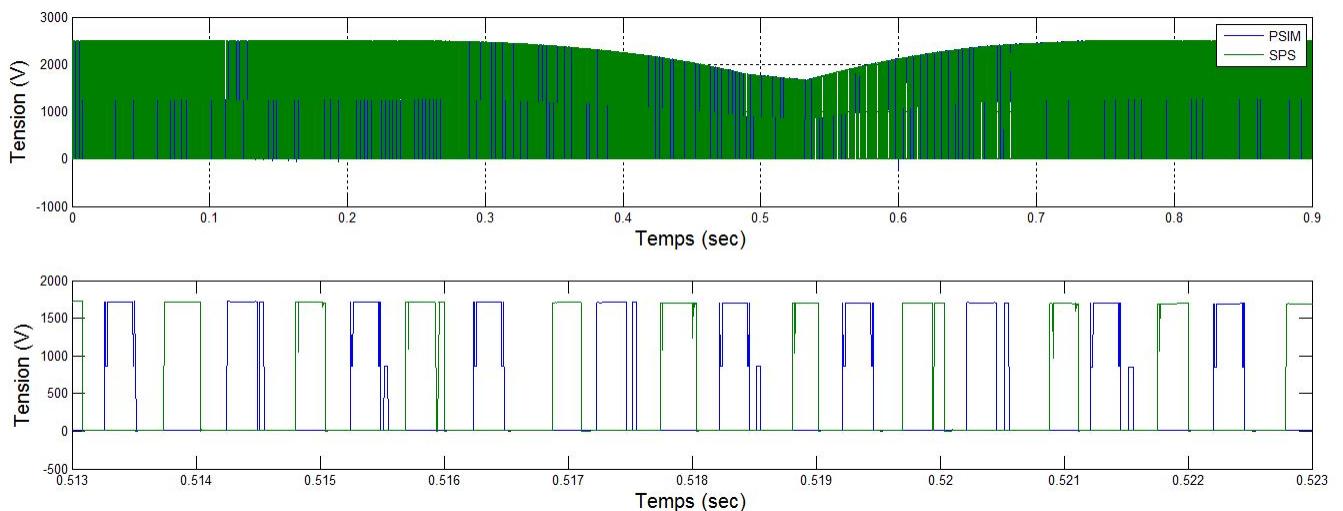


FIGURE 1.46 – La tension aux bornes d'un IGBT du DCP/DCN pour un pas de calcul de  $1\mu s$

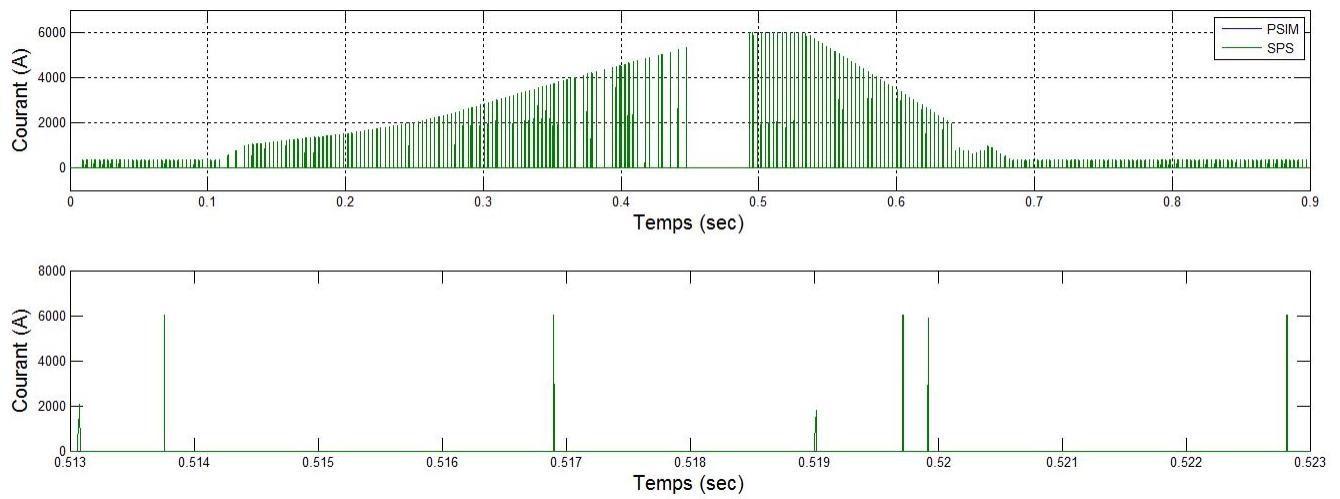


FIGURE 1.47 – Le courant traversant une diode de point milieu du DCP/DCN pour un pas de calcul d  $1\mu\text{s}$

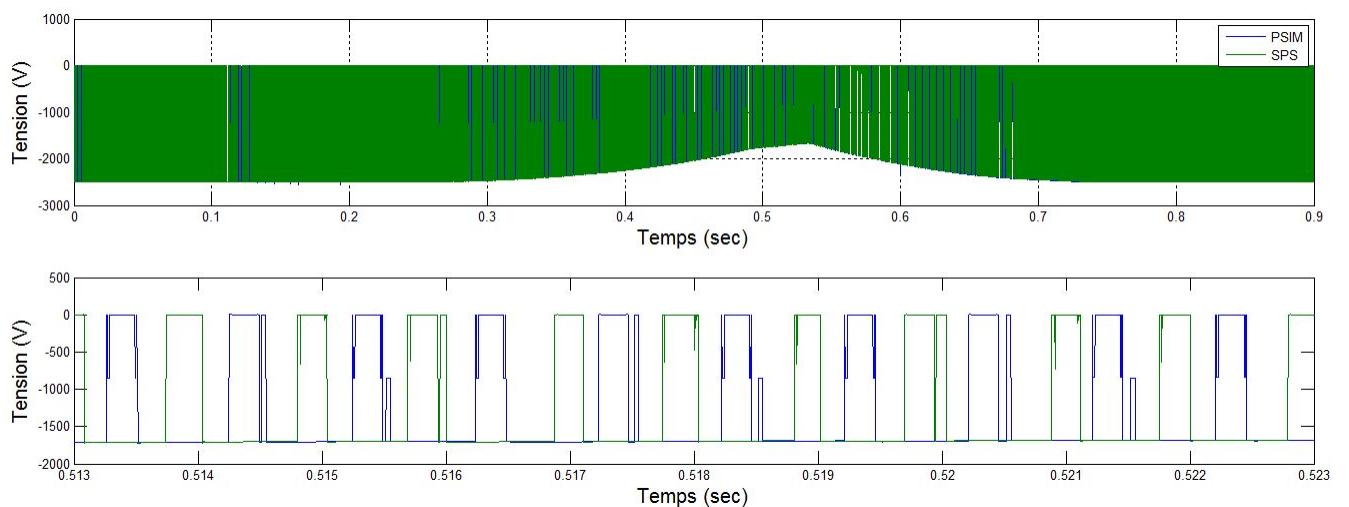


FIGURE 1.48 – La tension aux bornes d'une diode de point milieu du DCP/DCN pour un pas de calcul de  $1\mu\text{s}$