

Chapitre 1

Cross validation entre les différentes plateformes de simulations

Dans ce chapitre, les simulateurs seront comparés selon les paramètres des simulations critiques (courant dans les électroaimants, tension aux bornes des électroaimants, courant d'entrée, tension du bus CC, etc.). Les différences seront analysées selon les sous-modèles implantés, qui seront détaillés plus loin dans cet ouvrage. Les sous-modèles se séparent en plusieurs catégories, soit les simulations représentant l'AFE, celles représentant le convertisseur CC-CC et celles représentant un montage avec un AFE et un convertisseur CC-CC. Il est à noté que le temps de simulation qui est employé pour fin d'analyse est de $1\mu\text{s}$.

1.1 Comparaison entre PSIM et SPS

Cette section va décrire quelques comparaisons faites sur des éléments au sein de deux systèmes de simulations utilisés pour simuler les différents modèles implantés lors de ce projet, soit PSIM et SPS.

1.1.1 Les algorithmes de simulation sur PSIM et SPS

Les deux systèmes de simulations embarqués qui ont été utilisés utilisent des algorithmes différents. Pour augmenter la vitesse de simulation de l'électronique de puissance, SPS utilise un algorithme à commutation idéaux, tandis que PSIM utilise un algorithme fait pour l'électronique de puissance soit la méthode piecewise, des modèles génériques et un pas de calcul fixe. Pour être plus précis, sur SPS, on a le choix entre trois méthodes (continue, discret ou phasor)¹ tandis que PSIM utilise l'analyse nodal et une intégration par méthode trapézoïdale.²

1.1.2 IGBT

Les IGBT sont des interrupteurs que nous utilisons dans chacun des sous-modèles que nous avons monté en simulation pour ce projet. On remarque sur la figure 1.1 que le résultat de courant aux bornes de l'IGBT sont identique dans le cas d'un IGBT sur charge résistive de $50\text{k}\Omega$. Pour les deux plateformes, ça prend 1 pas de calcul comme temps de commutation soit $5\mu\text{s}$ pour ce cas.

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

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

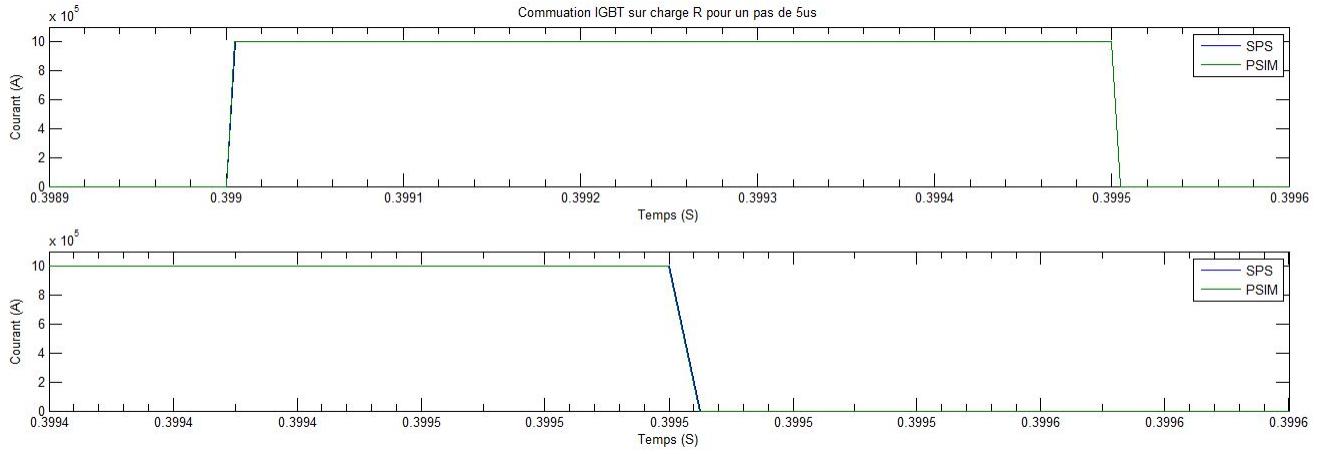


FIGURE 1.1 – Commutation IGBT à un pas de calcul de $5\mu\text{s}$

L'IGBT est actionné 50% du temps à une fréquence de 1KHz, est alimenté par une tension continu de 1000V et a une résistance interne de 0.01Ω .

Étant donné que les IGBT de SPS ont un snubber intégré RC tandis que sur PSIM ils en ont pas. Nous avons rajouté une charge RC en parallèle à chaque IGBT sur PSIM. Le snubber utilisé est un snubber résistif de $100\text{k}\Omega$.

1.1.3 PI

Le bloc PI est un proportionnel intégrateur que nous utilisons dans les boucles de régulation de nos simulations. Sur SPS nous utilisons des PI en configuration parallèle, par contre dans PSIM les blocs PI sont en configuration idéal. De sorte que, nous avons décidé de monter notre propre proportionnel intégrale en parallèle sur PSIM. On remarque sur la figure 1.2 que les résultats sont identiques. Le PI a un intégrateur à 50 et son proportionnel à 0.071.

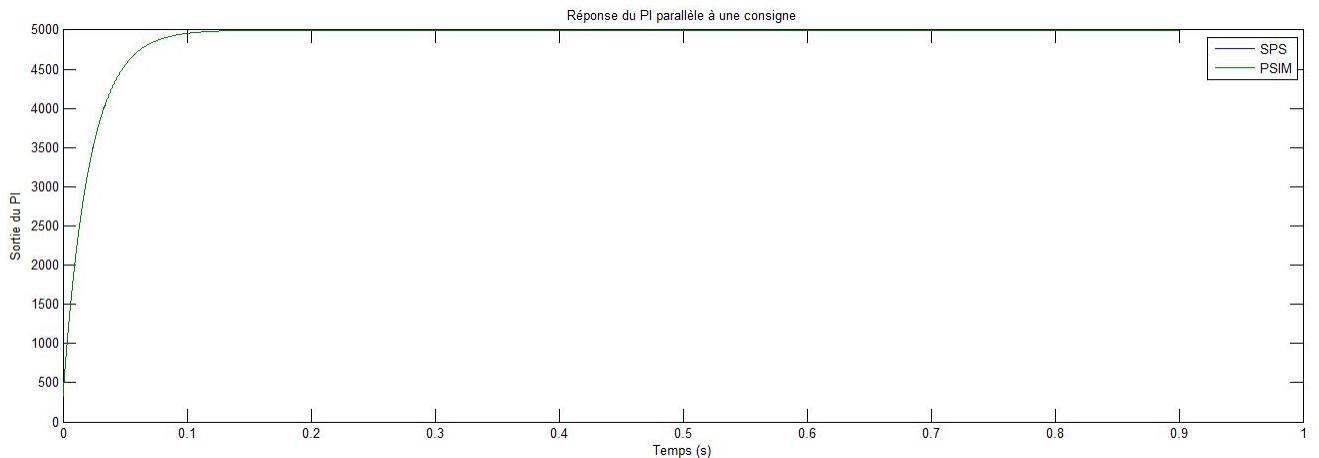


FIGURE 1.2 – Réponse d'un PI suite à une consigne d'erreur

1.2 Pont DCP/DCN : Validation PSIM/SPS

1.2.1 Hacheur 4 quadrants

Le hacheur 4 quadrants, à proprement parlé, est constitué de 4 interrupteurs IGBT commandés au moyen d'une régulation MLI. La figure 1.3 présente une représentation schématique d'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 afin d'établir la méthodologie de comparaison des simulations. Le tableau 1.1 représente les paramètres utilisés pour le hacheur 4 quadrants.

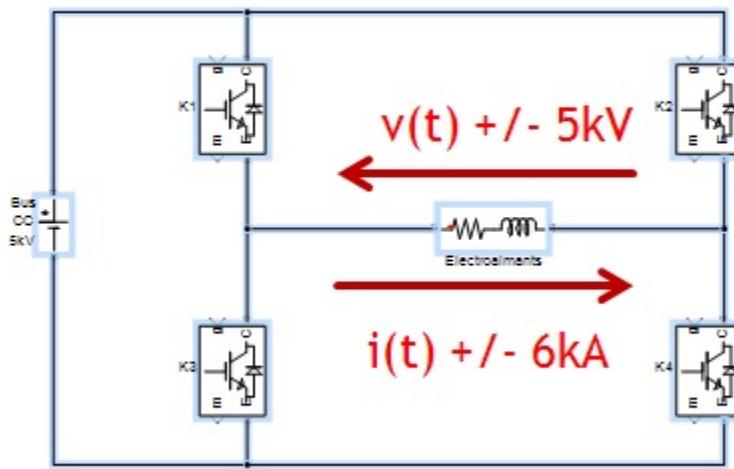


FIGURE 1.3 – Pont en H à 4 intérupteurs

Paramètre	Valeur
Tension CC	5000 V
Fréquence de modulation	1000 Hz
Saturation	0.95
IGBT	
Résistance interne	0.001 Ω
Snubber résistance	100k Ω
PI	
Proportionnel	0.071
Intégrateur	50
Charge	
Résistance	0.28 Ω
Inductance	0.1 H

TABLE 1.1 – Paramètres de simulation pour le pont en H à 4 intérupteurs

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

Cette section présente les courbes d'intérêt pour un pas de calcul discret de $1\mu\text{s}$.

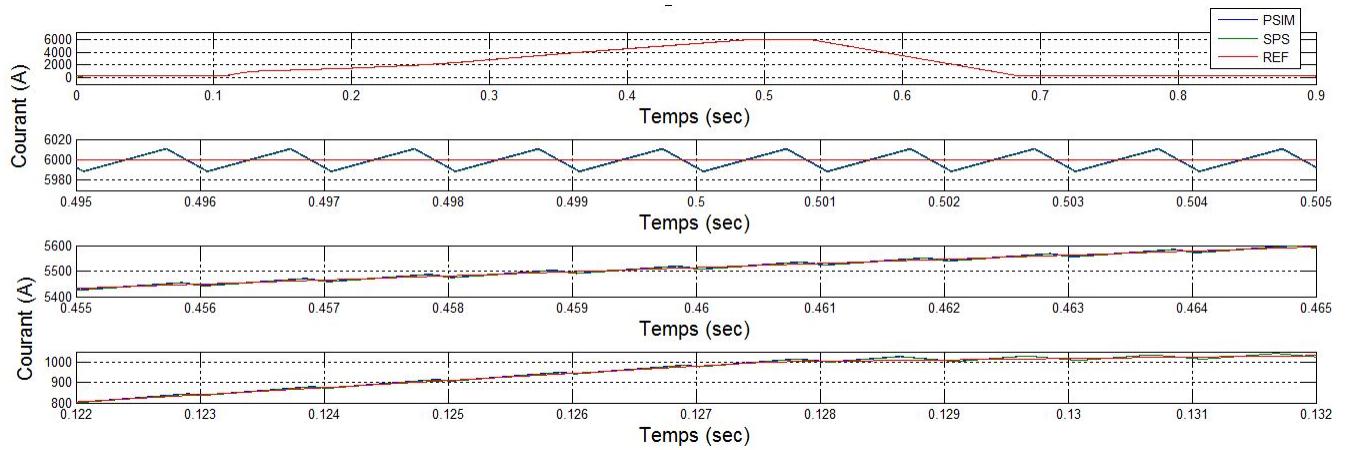


FIGURE 1.4 – Courant traversant la charge sur PSIM et SPS pour un pas de calcul de $1\mu\text{s}$ pour le hacheur 4 quadrants

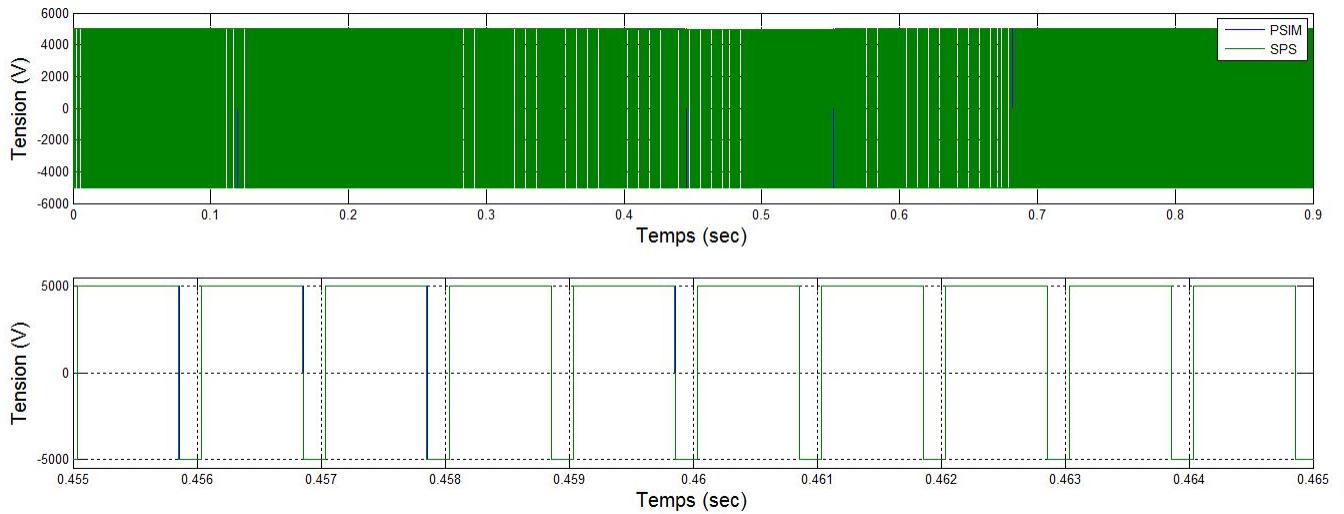


FIGURE 1.5 – Tension aux bornes de la charge sur PSIM et SPS pour un pas de calcul de $1\mu\text{s}$ pour le hacheur 4 quadrants

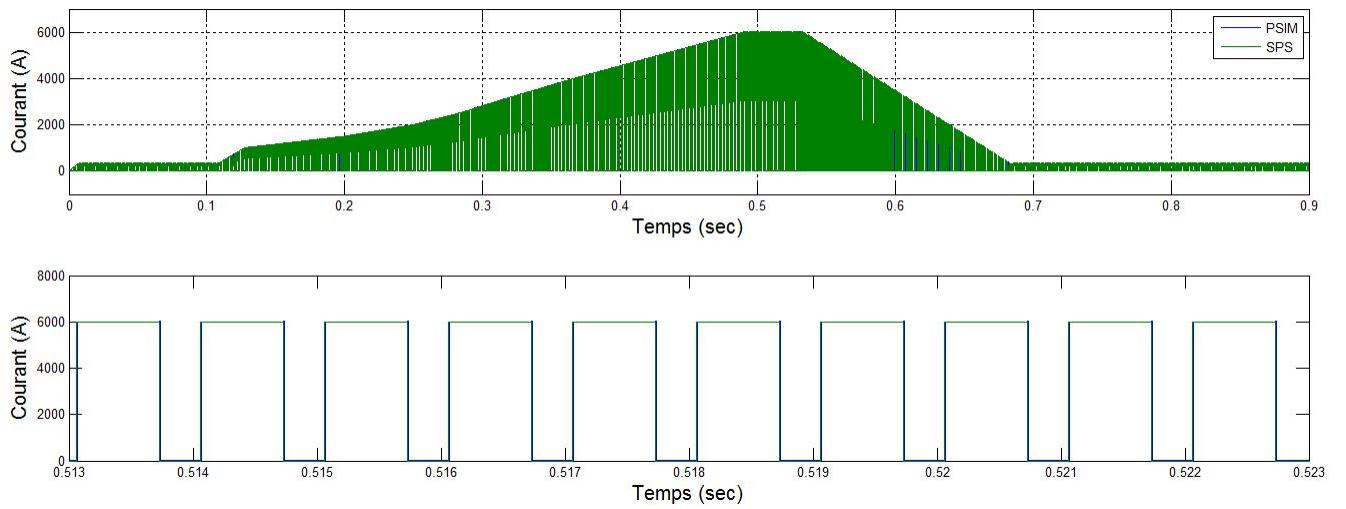


FIGURE 1.6 – Courant traversant un IGBT sur PSIM et SPS pour un pas de calcul de $1\mu\text{s}$ pour le hacheur 4 quadrants

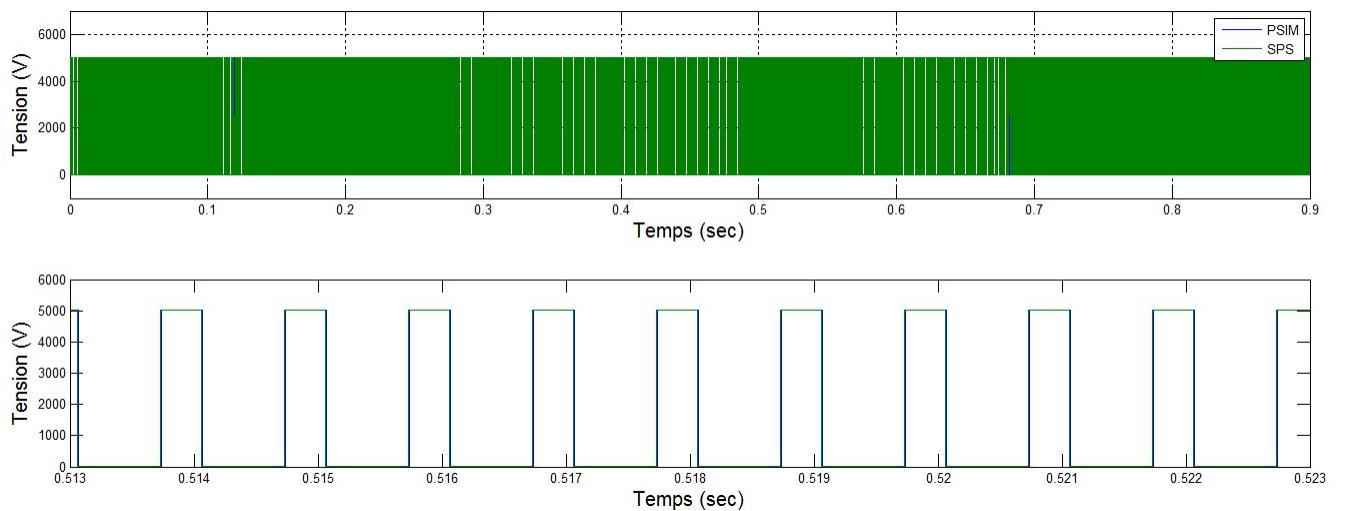


FIGURE 1.7 – Tension aux bornes d'un IGBT sur PSIM et SPS pour un pas de calcul de $1\mu\text{s}$ pour le hacheur 4 quadrants

1.2.2 DCP/DCN

Le DCP/DCN est un convertisseur CC-CC, qui représente un système plus complexe du fonctionnement du hacheur 4 quadrants. Il est composé de 24 interrupteurs IGBT/DIODE commandé avec une commande MLI ainsi que de 12 diodes de retour. La figure 1.8 représente une configuration schématique simple d'un tel système. Le tableau 1.2 représente les données utilisées pour ce sous-système.

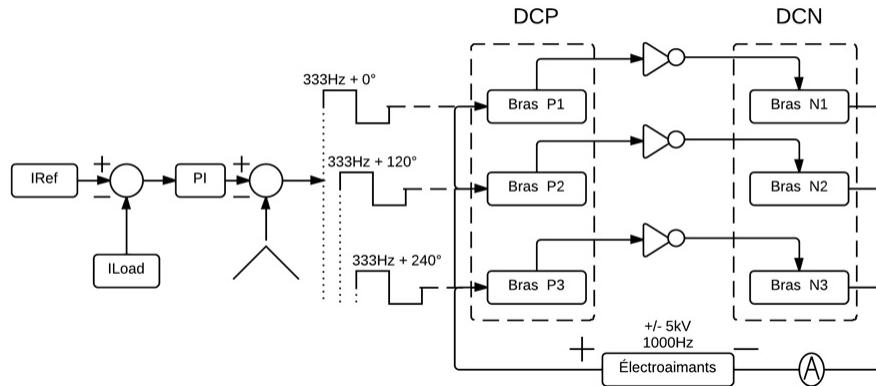


FIGURE 1.8 – Schéma bloc du DCP/DCN avec une commande MLI à la charge

Paramètre	Valeur
Tension CC	5000 V
Fréquence de modulation	1000 Hz
Saturation	1
Inductance de couplage	10e-6 H
IGBT	
Résistance interne	0.001 Ω
Snubber résistance	100k Ω
PI	
Proportionnel	1.5611
Intégrateur	24.6
Charge	
Résistance	0.28 Ω
Inductance	0.1 H

TABLE 1.2 – Paramètres de simulation pour le DCP/DCN

Vérification à un pas de calcul de 1μs

Cette section présente les courbes d'intérêt pour un pas de calcul discret de $1\mu\text{s}$.

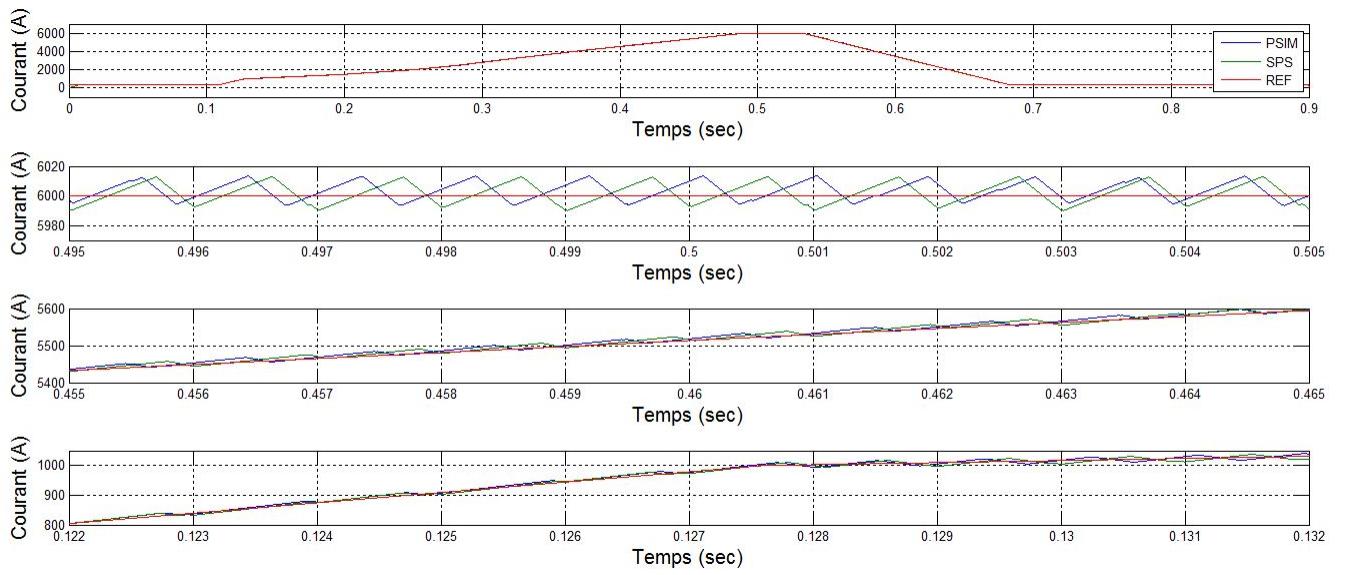


FIGURE 1.9 – Courant traversant la charge sur PSIM et SPS pour un pas de calcul de $1\mu\text{s}$ pour le DCP/DCN

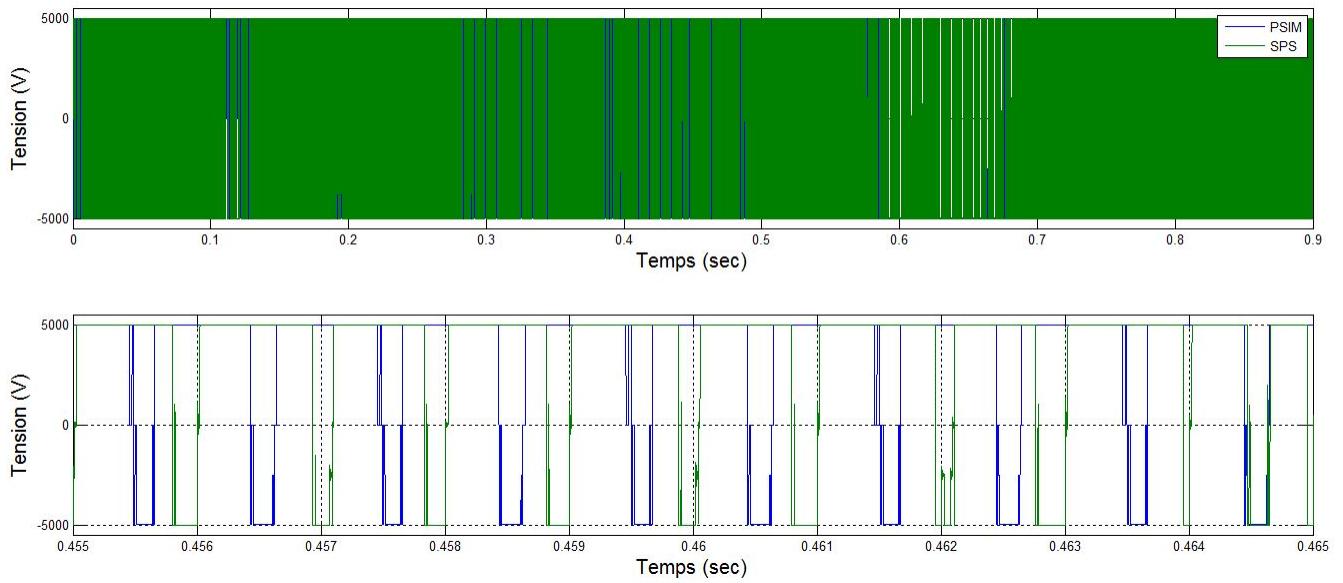


FIGURE 1.10 – Tension aux bornes de la charge sur PSIM et SPS pour un pas de calcul de $1\mu\text{s}$ pour le DCP/DCN

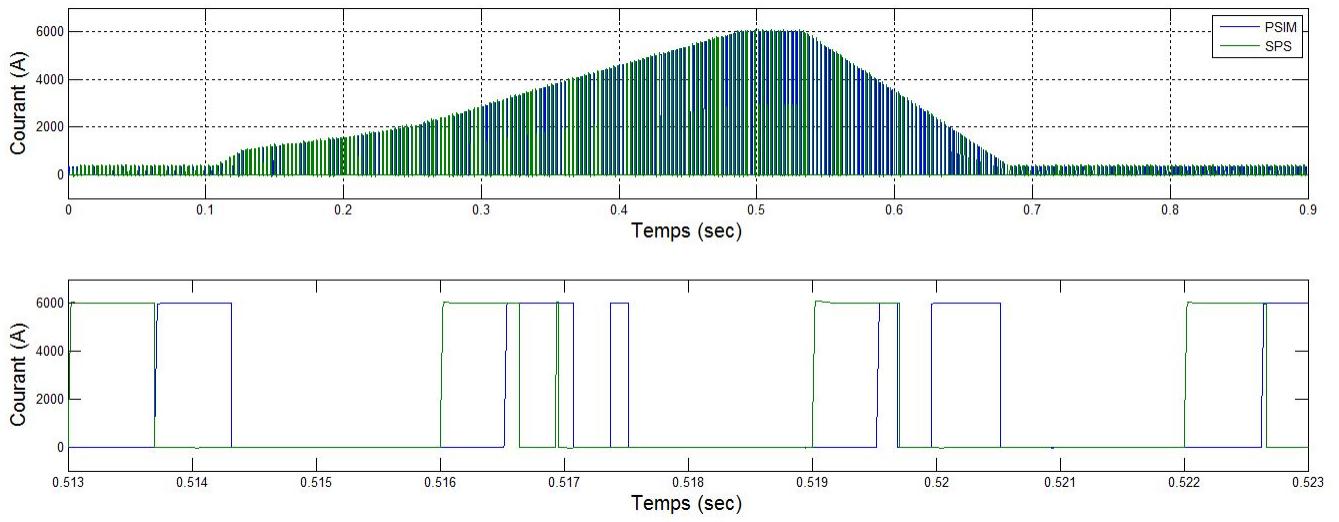


FIGURE 1.11 – Courant traversant un IGBT sur PSIM et SPS pour un pas de calcul de $1\mu\text{s}$ pour le DCP/DCN

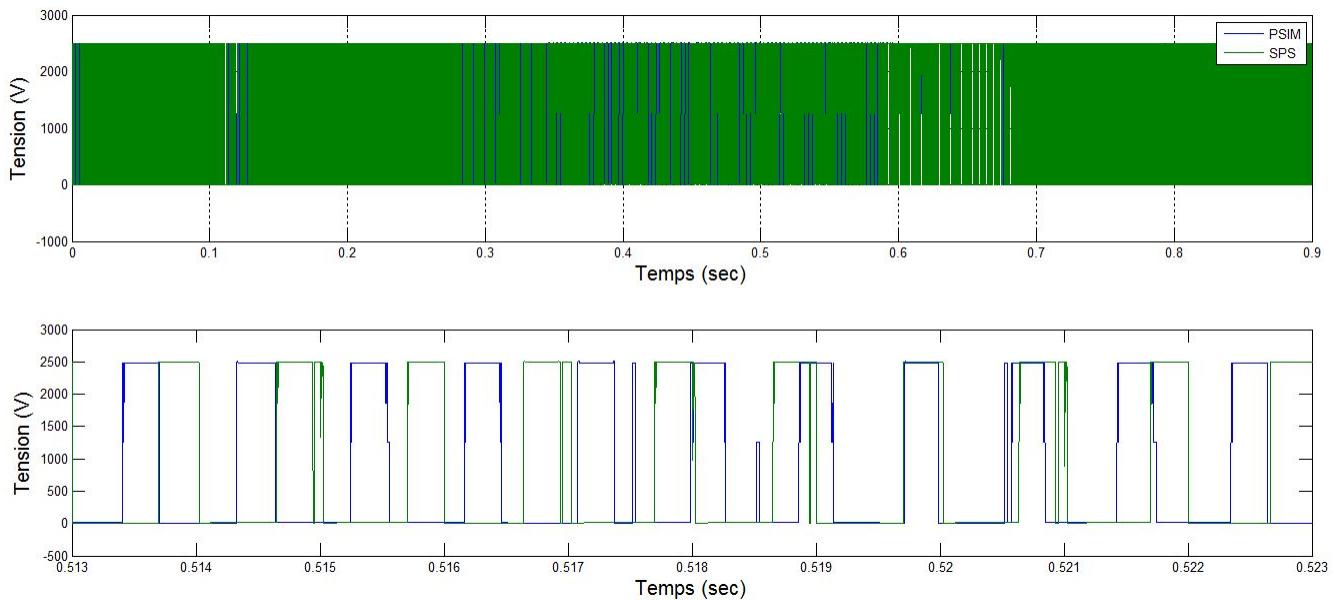


FIGURE 1.12 – Tension aux bornes d'un IGBT sur PSIM et SPS pour un pas de calcul de $1\mu\text{s}$ pour le DCP/DCN

1.3 AFE : Validation PSIM/SPS

1.3.1 AFE source idéal

L'AFE source idéal est constitué de 6 interrupteurs, soit deux par phase de tension. Ce système sert comme onduleur et sa tache est d'alimenter un bus CC pour qu'il ait une tension de 5000V. Ce sous-système sert à vérifier le fonctionnement 4 quadrant de l'AFE au niveau de l'échange de puissance. Il est composé d'une source AC d'un côté et DC parfaite de l'autre. Il est régulé en courant (Amplitude et phase) grâce à une régulation par hystérésis. La figure 1.13 est une représentation schématique de l'AFE source idéal. Le tableau 1.3 représente les paramètres utilisés pour la simulation de l'AFE source idéal.

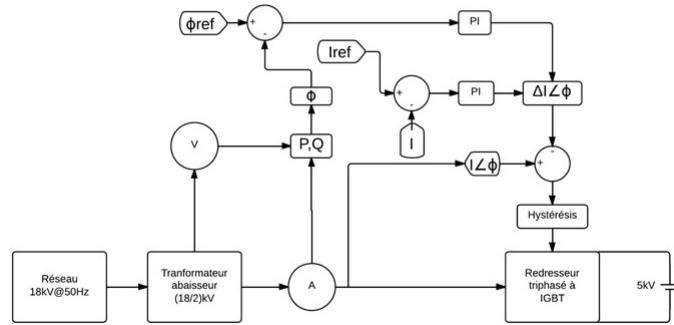


FIGURE 1.13 – Schéma bloc de l'AFE 2 level source parfaite avec régulation par hystérésis

Paramètre	Valeur
Tension bus CC	5000
Courant référence	1000A
Seuil hystérésis	450
Saturation de courant	1500
IGBT	
Résistance interne	0.001
Snubber résistance	100k
PI courant	
Proportionnel	5
Intégrateur	20
PI phase	
Proportionnel	0.48
Intégrateur	8

TABLE 1.3 – Paramètres de simulation pour l'AFE source idéal

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

Cette section présente les courbes d'intérêt pour un pas de calcul discret de $1\mu\text{s}$.

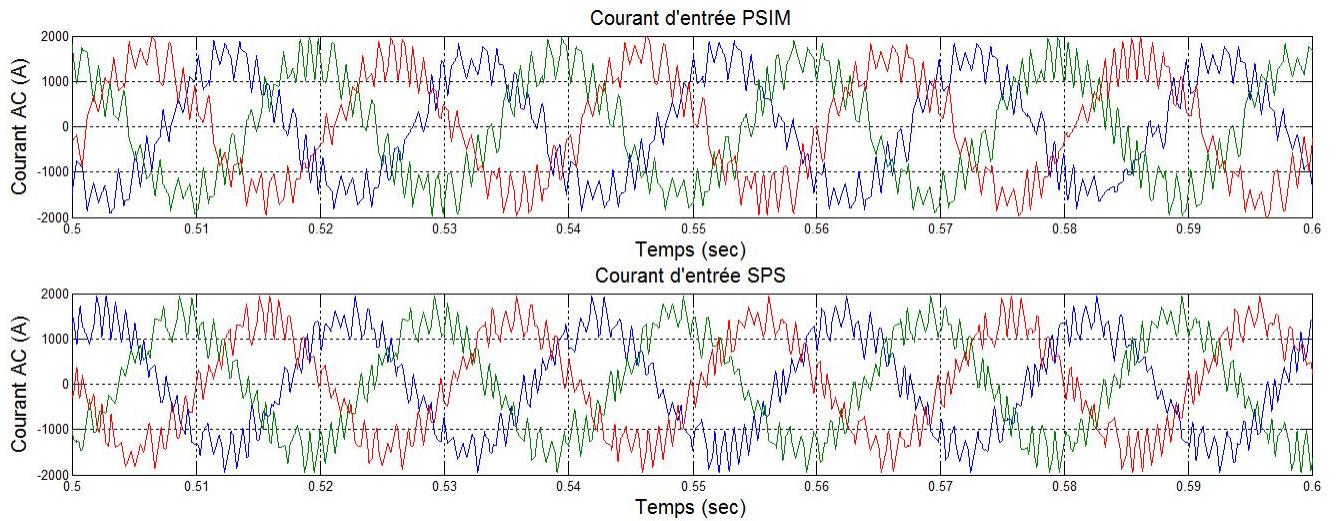


FIGURE 1.14 – Le courant d’entré à $1\mu\text{s}$ pour l’AFE source idéal

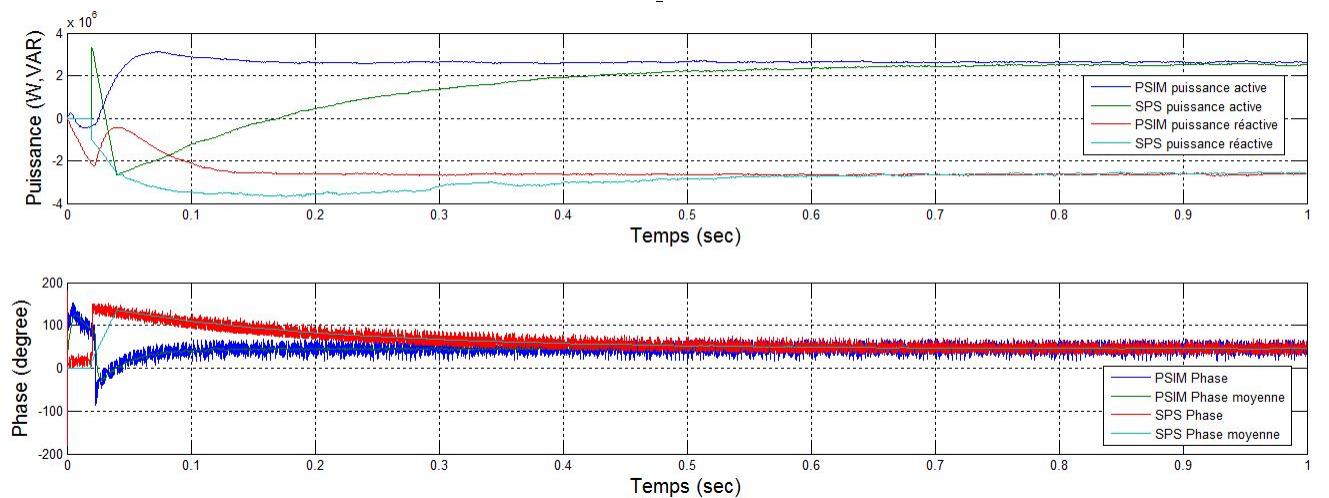


FIGURE 1.15 – La puissance à une phase de 45 degré à $1\mu\text{s}$ pour l’AFE source idéal

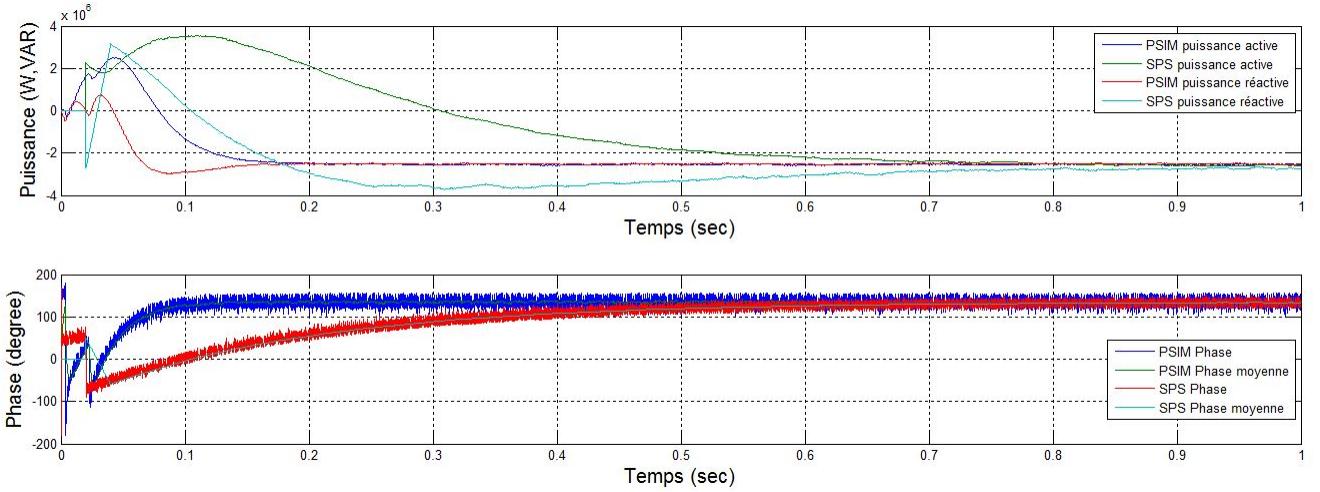


FIGURE 1.16 – La puissance à une phase de 135 degré à $1\mu\text{s}$ pour l'AFE source idéal

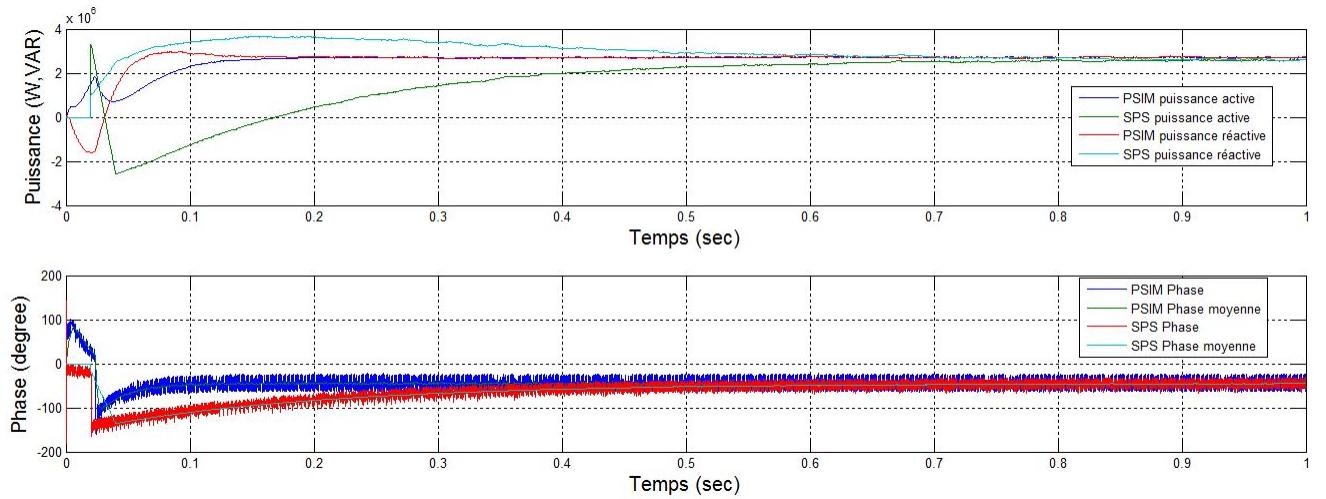


FIGURE 1.17 – La puissance à une phase de -45 degré à $1\mu\text{s}$ pour l'AFE source idéal

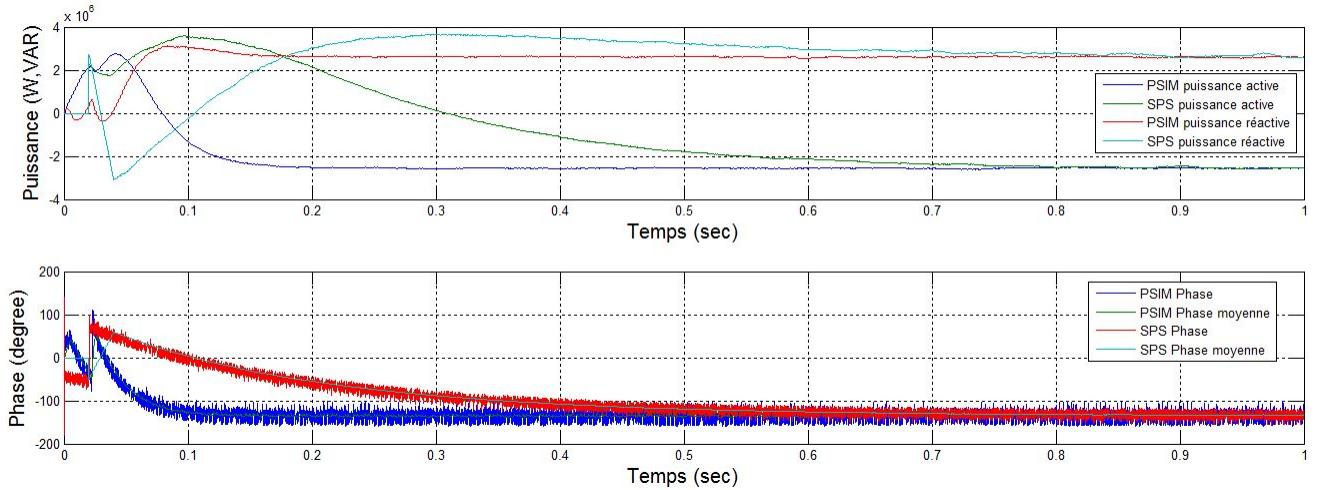


FIGURE 1.18 – La puissance à une phase de -135 degré à $1\mu\text{s}$ pour l'AFE source idéal

1.3.2 AFE avec charge RC

L'AFE avec charge RC est le même système que présenté dans la figure 1.13. Les différences sont, qu'à la place d'une charge parfaite à 5000V, il est constitué d'une charge RC de 9.26Ω et 300mF . De plus, le courant du réseau est mis en phase avec la tension du réseau. La figure 1.19 représente le calcul de fft d'une phase du courant d'entrée. Les paramètres de l'hystérésis ont été calibré pour que sa fréquence secondaire soit d'environ 1000Hz. Le tableau 1.4 représente les paramètres utilisés pour l'AFE avec charge RC.

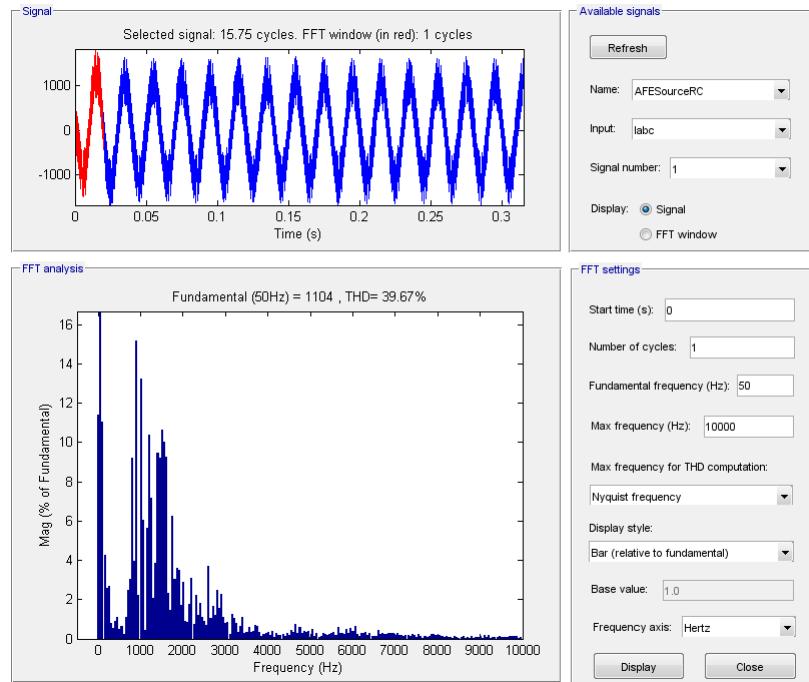


FIGURE 1.19 – La FFT du courant d'entrée à $1\mu\text{s}$

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

Cette section présente les courbes d'intérêt pour un pas de calcul discret de $1\mu\text{s}$.

Paramètre	Valeur
Tension référence CC	5000 V
Seuil hystérésis	450
Saturation de courant	1500
IGBT	
Résistance interne	0.001 Ω
Snubber résistance	100k Ω
PI courant	
Proportionnel	5
Intégrateur	20
Charge	
Résistance	9.26 Ω
Condensateur	300 mF

TABLE 1.4 – Paramètres de simulation pour l'AFE charge RC

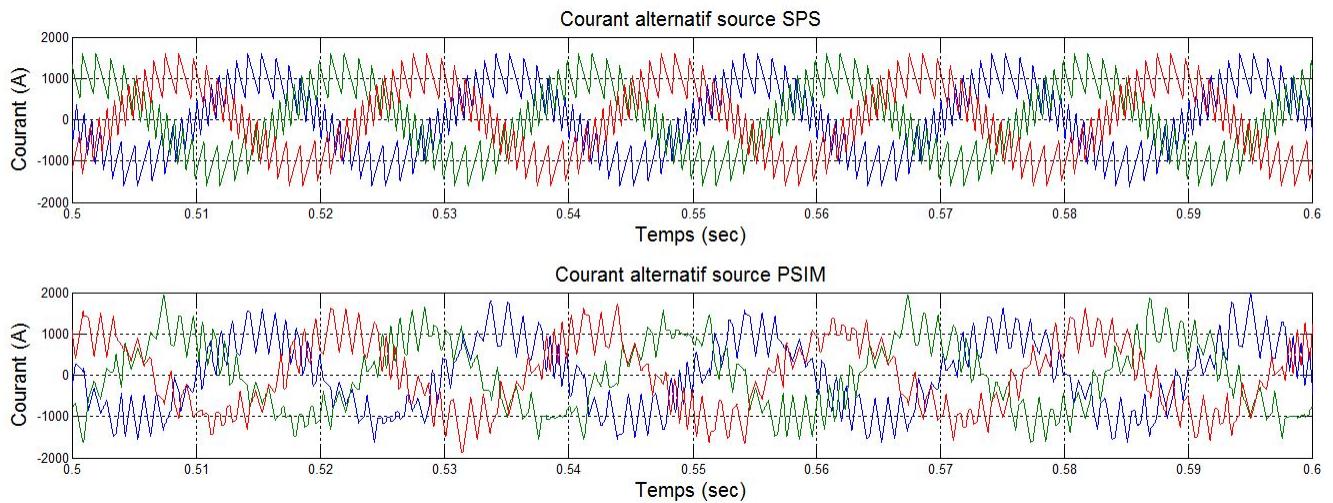


FIGURE 1.20 – Le courant d'entrée à $1\mu\text{s}$ pour l'AFE sur charge RC

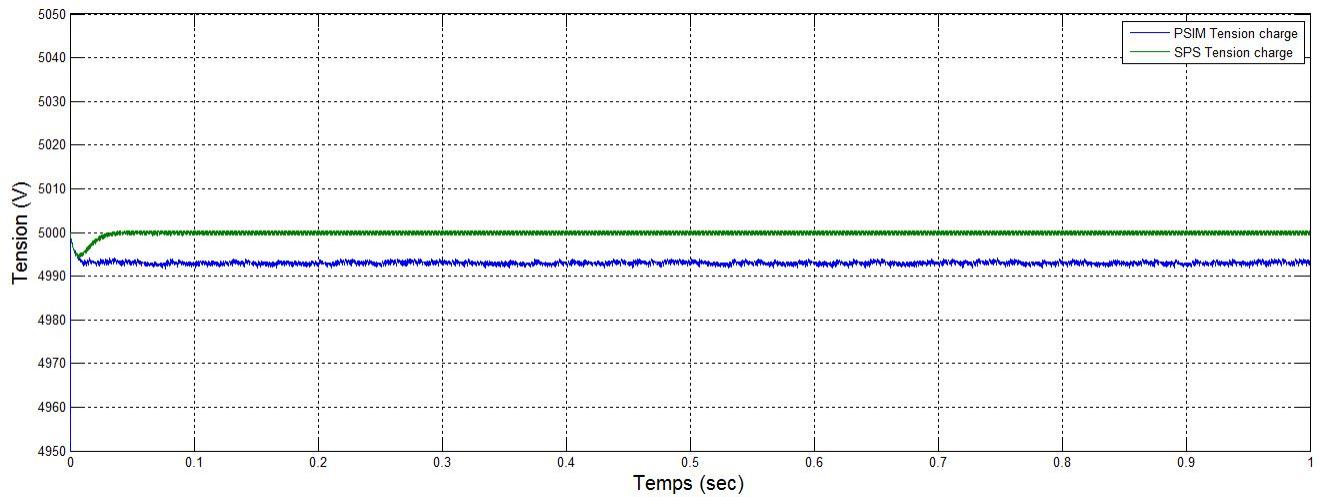


FIGURE 1.21 – La tension à la charge à $1\mu\text{s}$ pour l'AFE sur charge RC

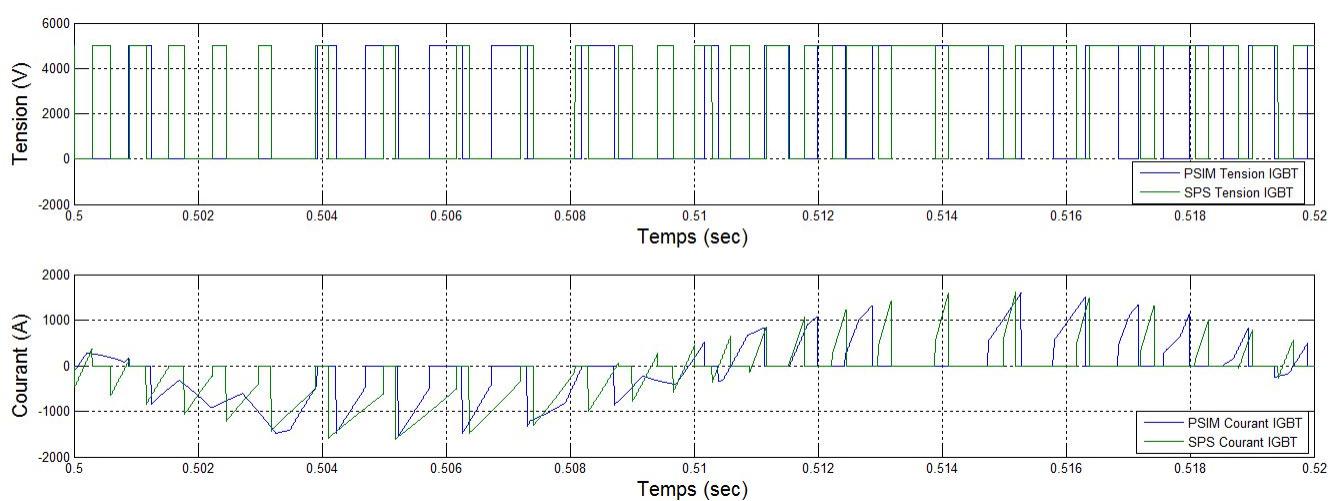


FIGURE 1.22 – La tension et le courant au bornes d'un IGBT à $1\mu\text{s}$ pour l'AFE sur charge RC

1.3.3 AFE 3 niveaux

L'AFE 3 niveaux est composé de 12 interrupteurs IGBT ainsi que de 6 diodes de retour. Il est régulé grâce à une régulation par MLI. Il représente la version finale du sous-système de l'AFE. Le tableau 1.5 représente les paramètres utilisés avec l'AFE 3 niveaux.

Paramètre	Valeur
Tension référence CC	5000 V
Fréquence de modulation	1000 Hz
Saturation de courant	1500
IGBT	
Résistance interne	0.001 Ω
Snubber résistance	100k Ω
PI courant	
Proportionnel	5
Intégrateur	20
PI commande	
Saturation	0.95
Proportionnel	1.5611
Intégrateur	24.6
Charge	
Résistance	9.26 Ω
Condensateur	300 mF

TABLE 1.5 – Paramètres de simulation pour l'AFE 3 niveaux

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

Cette section présente les courbes d'intérêt pour un pas de calcul discret de $1\mu\text{s}$.

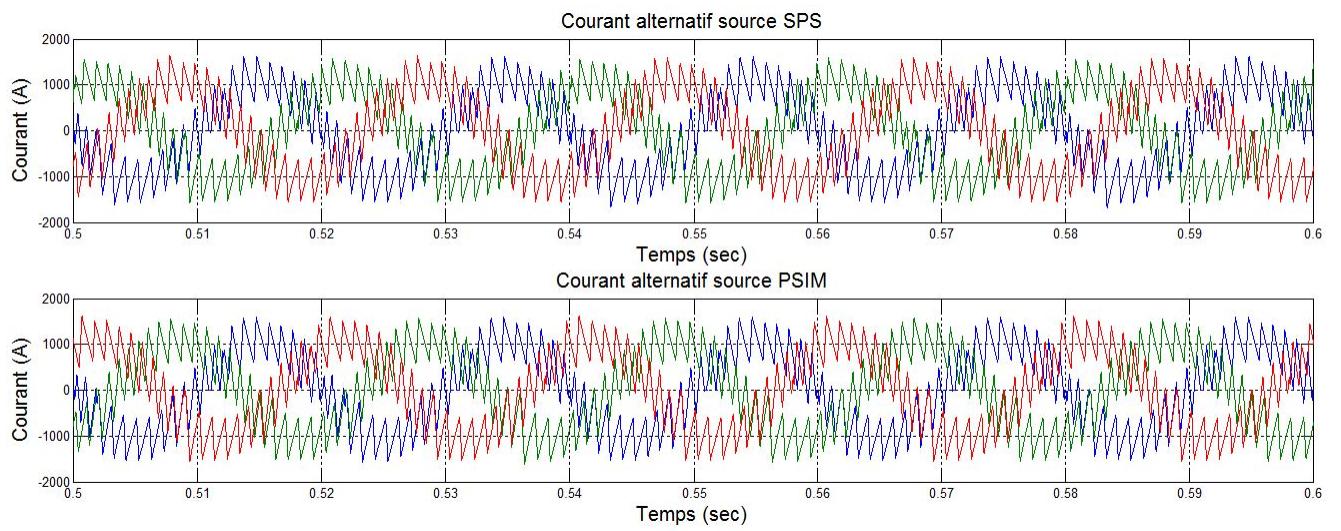


FIGURE 1.23 – Le courant d’entrée à $1\mu\text{s}$ pour l’AFE 3 niveaux

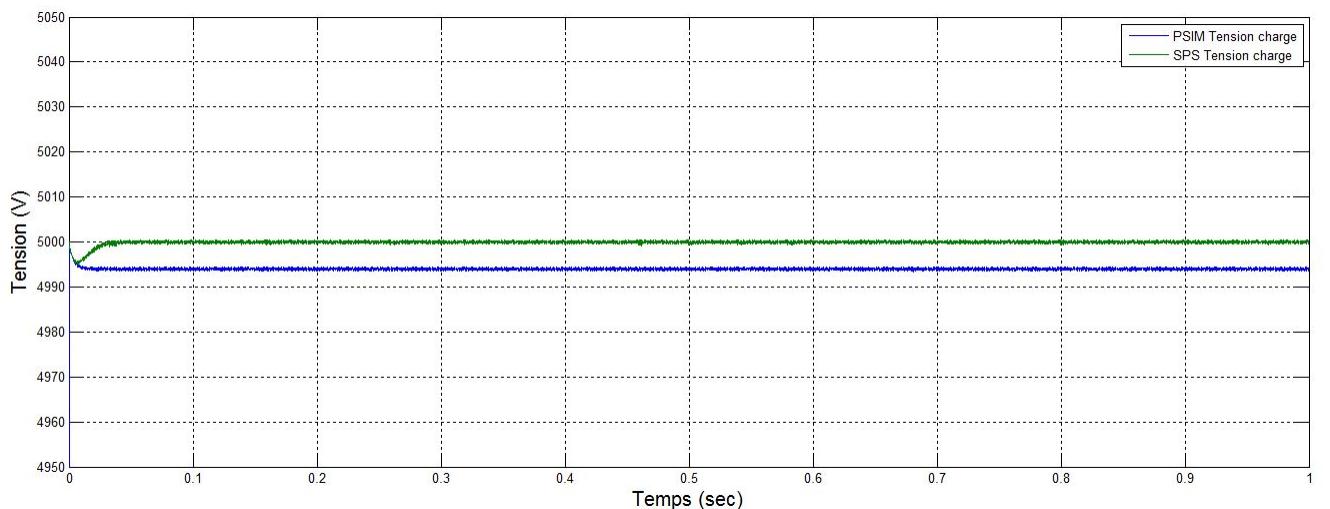


FIGURE 1.24 – La tension à la charge à $1\mu\text{s}$ pour l’AFE 3 niveaux

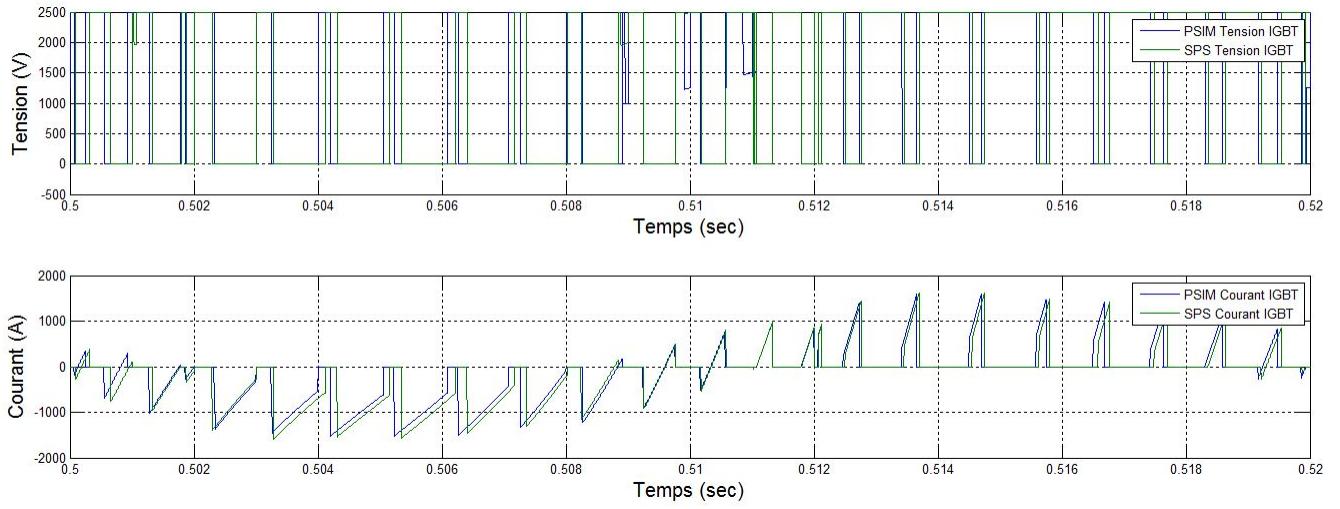


FIGURE 1.25 – La tension et le courant au niveau d'un IGBT à $1\mu\text{s}$ pour l'AFE 3 niveaux

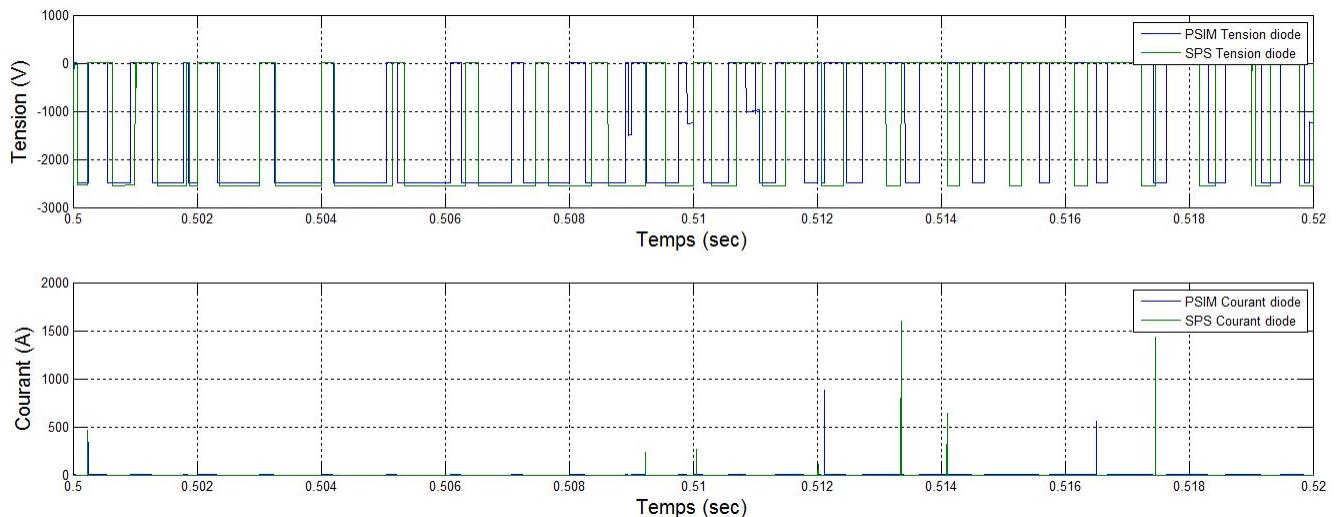


FIGURE 1.26 – La tension et le courant au niveau d'une diode à $1\mu\text{s}$ pour l'AFE 3 niveaux

1.4 Implémentation AFE avec DCP/DCN

1.4.1 AFE 2 level avec hacheur 4 quadrants

Cette section va discuter des différences entre les résultats de simulations pour l'implémentation finale entre l'AFE 2 niveaux et le hacheur 4 quadrants. La figure 1.27 représente l'implémentation des deux sous-systèmes d'une façon schématique. Le tableau 1.6 représente les paramètres utilisés pour ce système.

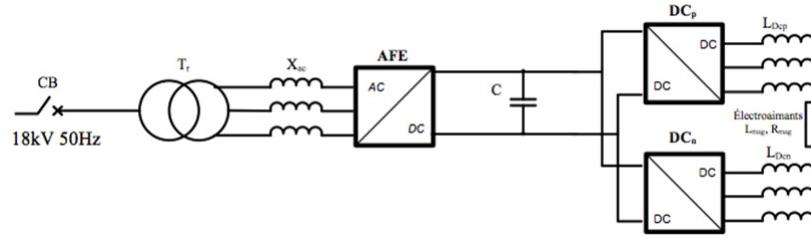


FIGURE 1.27 – Représentation schématique de l'implémentation de l'AFE et du DCP/DCN

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

Cette section présente les courbes d'intérêt pour un pas de calcul discret de $1\mu s$.

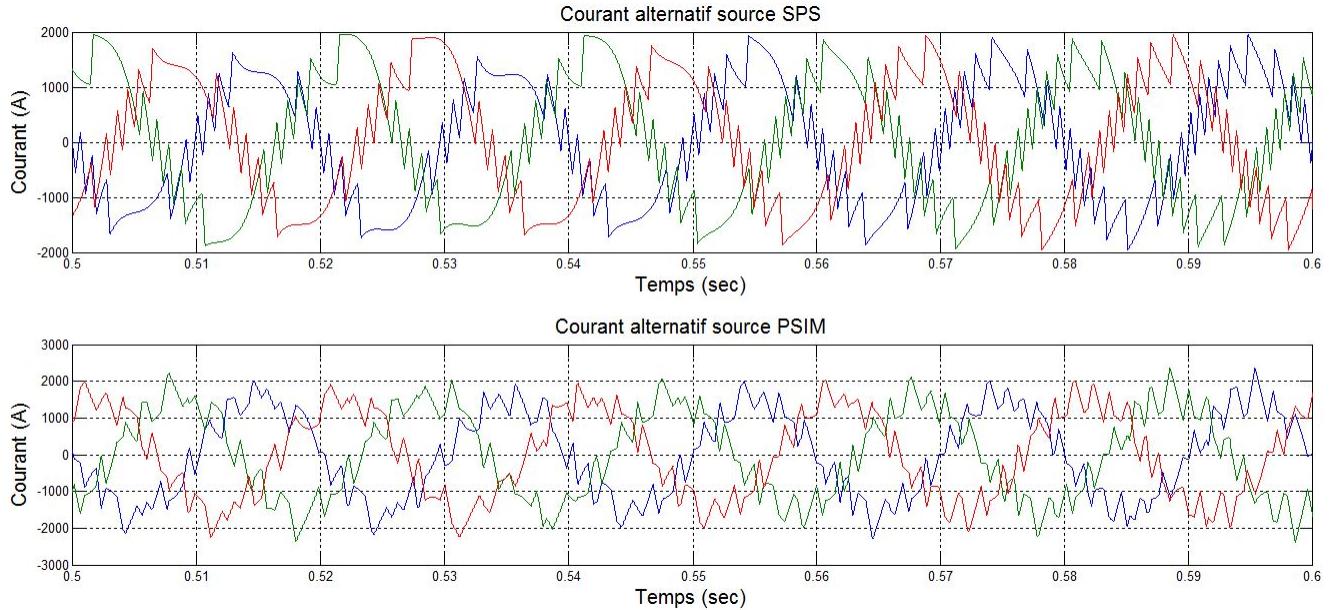


FIGURE 1.28 – Le courant d'entrée à $1\mu s$ section AFE

Paramètre	Valeur
AFE 2 niveaux	
Tension référence CC	5000 V
Seuil hystérésis	450
Saturation de courant	1500
IGBT AFE	
Résistance interne	0.001 Ω
Snubber résistance	100k Ω
PI courant AFE	
Proportionnel	5
Intégrateur	20
Bus CC	
Condensateur	300 mF
Hacheur 4 quadrants	
Fréquence de modulation	1000 Hz
Saturation	0.95
IGBT hacheur	
Résistance interne	0.001 Ω
Snubber résistance	100k Ω
PI hacheur	
Proportionnel	0.071
Intégrateur	50
Charge	
Résistance	0.28 Ω
Inductance	0.1 H

TABLE 1.6 – Paramètres de simulation pour le pont en H à 4 intéerrupteurs avec l'AFE 2 level

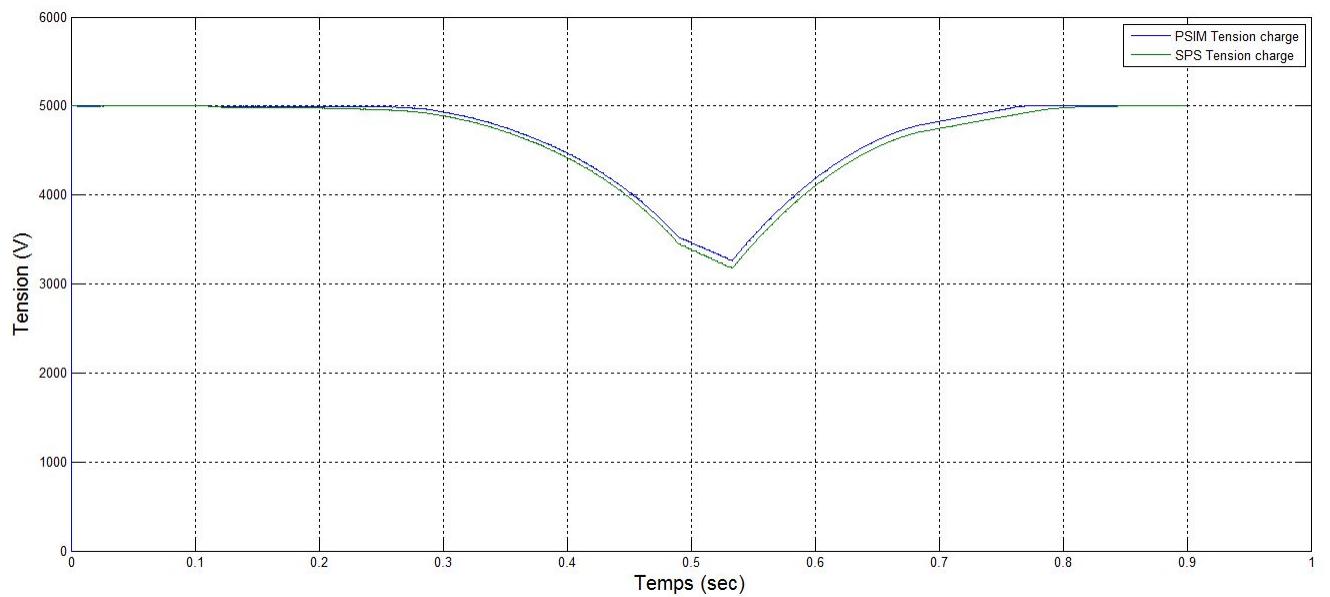


FIGURE 1.29 – La tension au bus CC à $1\mu\text{s}$ section AFE

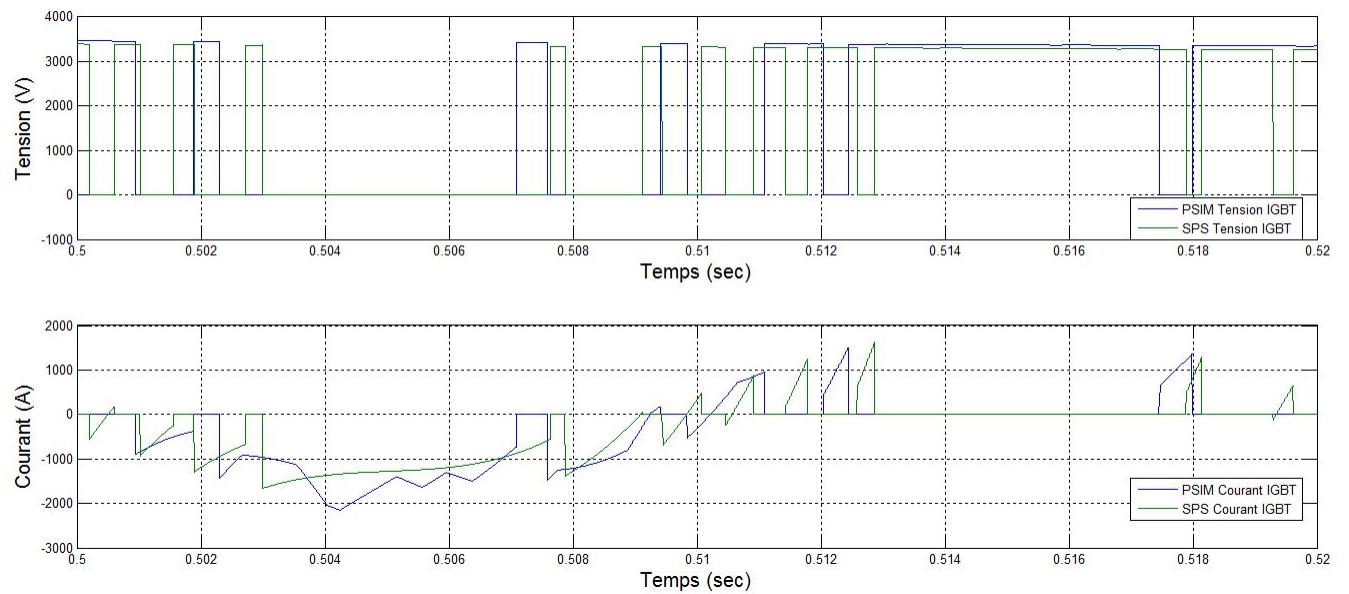


FIGURE 1.30 – La tension et le courant au niveau d'un IGBT à $1\mu\text{s}$ au niveau de l'AFE

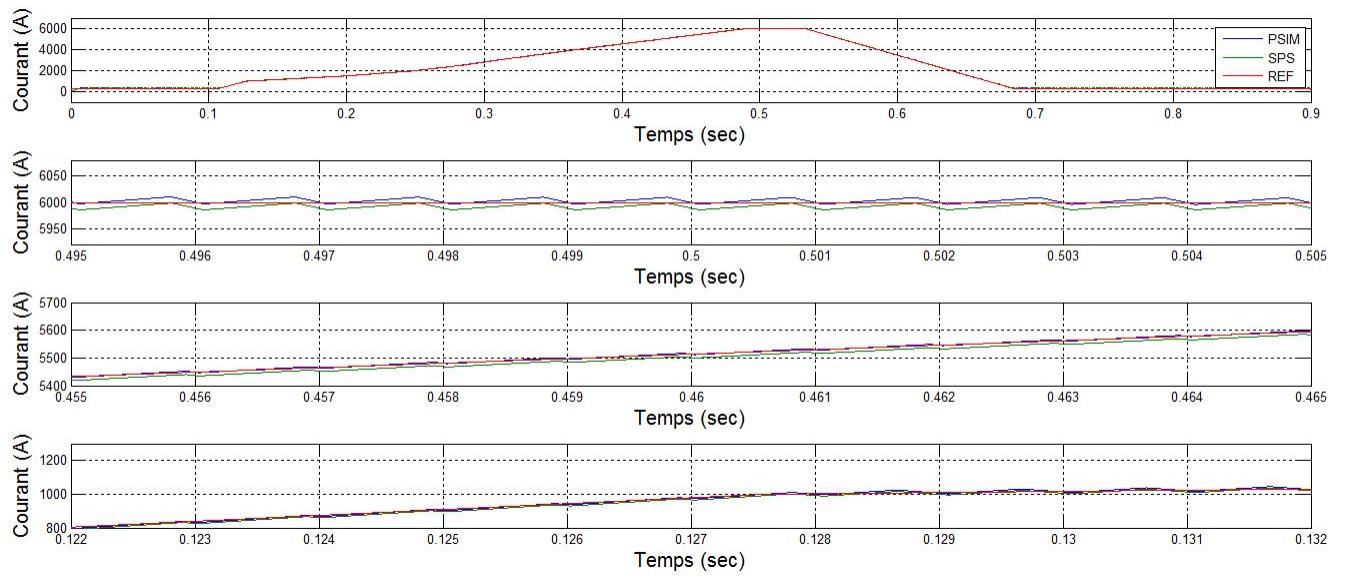


FIGURE 1.31 – Le courant au niveau de la charge à $1\mu s$

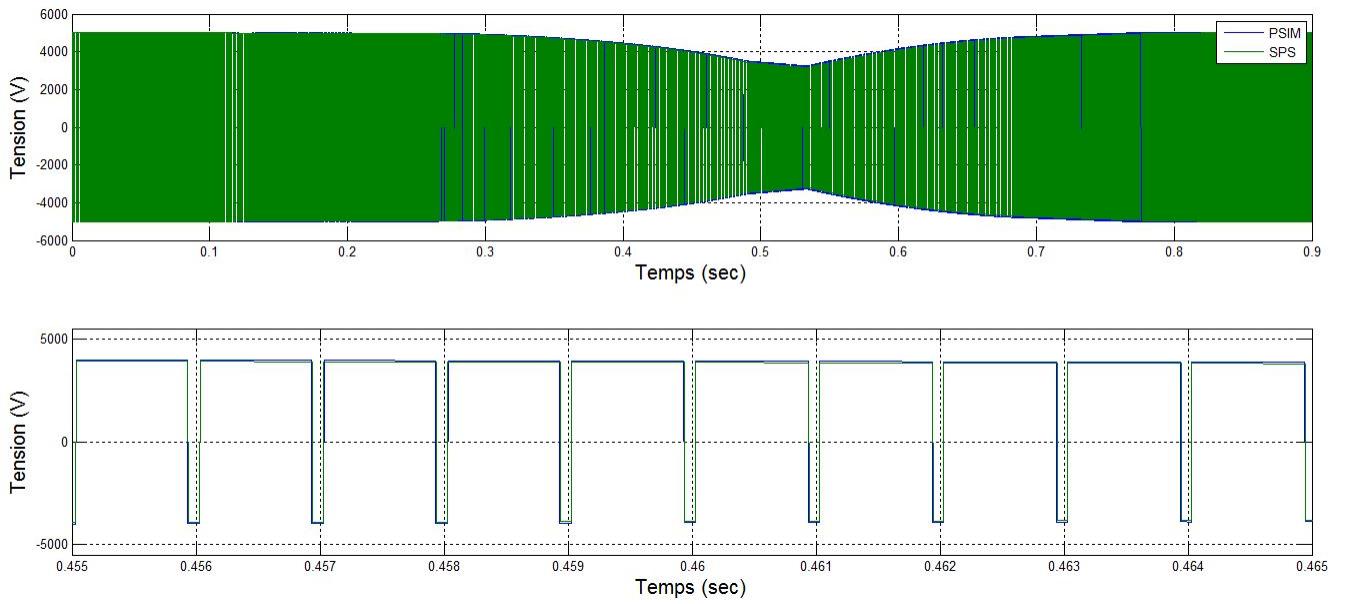


FIGURE 1.32 – La tension au niveau de la charge à $1\mu s$

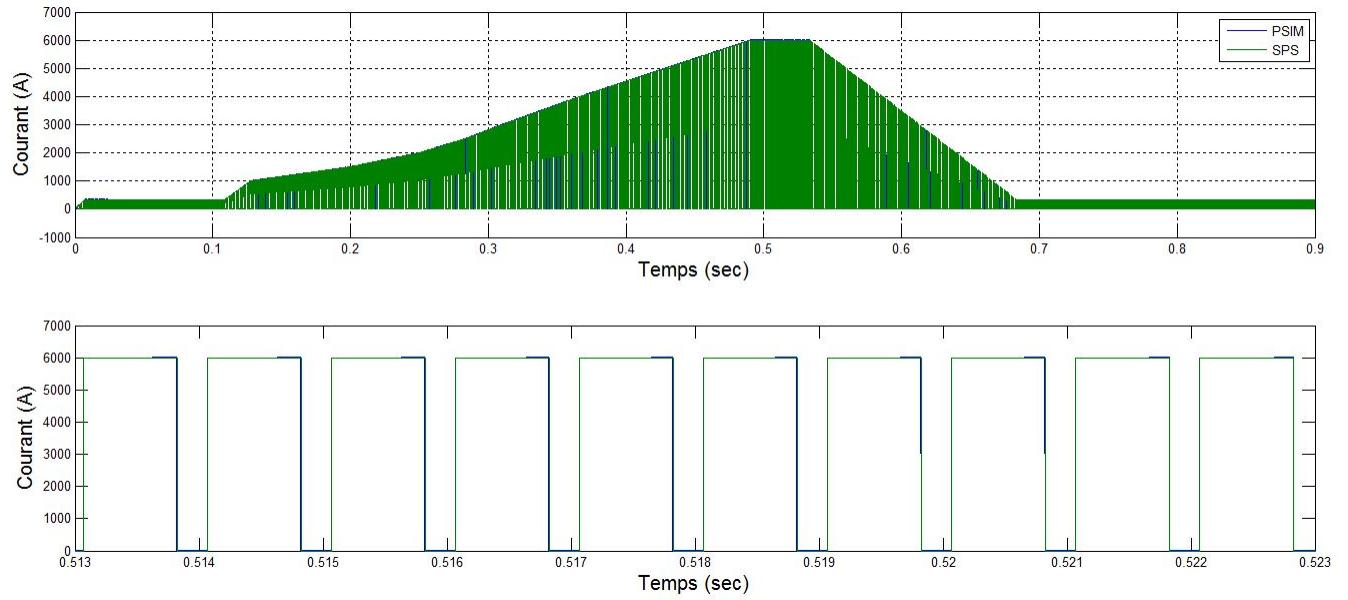


FIGURE 1.33 – Le courant aux bornes d'un IGBT à $1\mu\text{s}$ pour le hacheur 4 quadrants

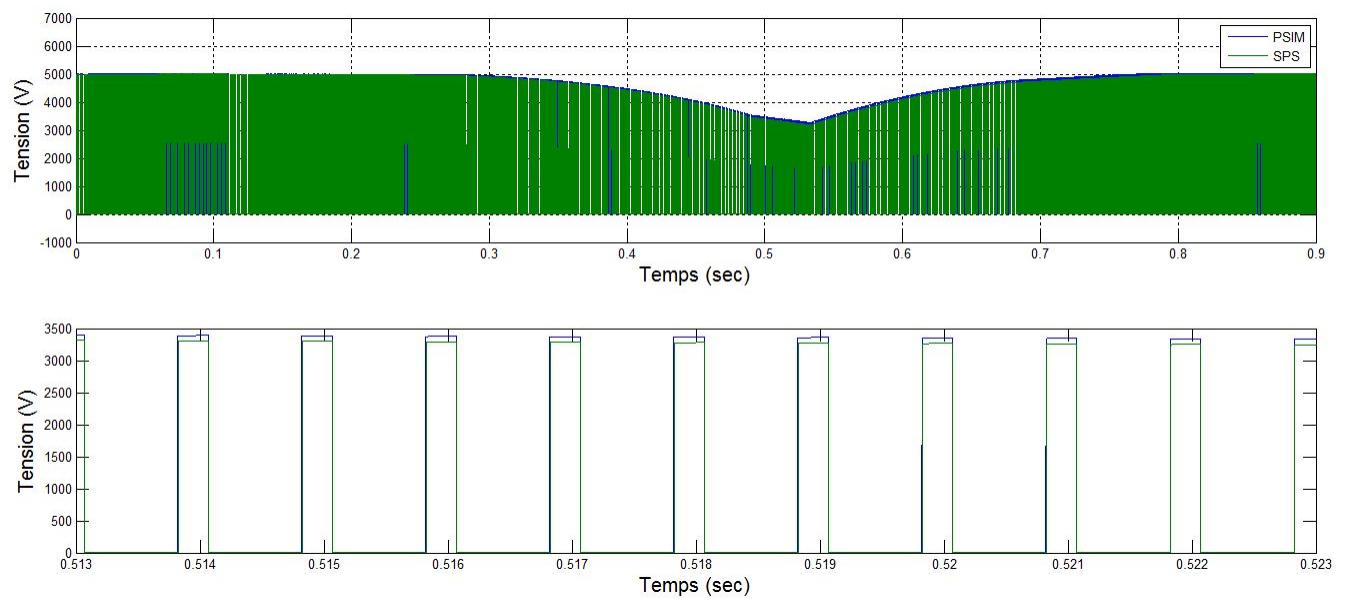


FIGURE 1.34 – La tension aux bornes d'un IGBT à $1\mu\text{s}$ pour le hacheur 4 quadrants

1.4.2 AFE 3 niveaux avec le DCP/DCN

Cette section va discuter des différences au niveau des résultats de simulation par rapport au système regroupant l'AFE 3 niveaux avec le DCP/DCN. La figure 1.27 représente un schéma de l'implémentation des deux systèmes. Le tableau 1.7 représente les paramètres utilisés dans ce système.

Paramètre	Valeur
AFE 3 niveaux	
Tension référence CC	5000 V
Fréquence de modulation	1000 Hz
Saturation de courant	1500
IGBT AFE	
Résistance interne	0.001 Ω
Snubber résistance	100k Ω
PI courant AFE	
Proportionnel	5
Intégrateur	20
PI commande AFE	
Saturation	0.95
Proportionnel	1.5611
Intégrateur	24.6
Bus CC	
Condensateur	300 mF
DCP/DCN	
Fréquence de modulation	1000 Hz
Saturation	1
Inductance de couplage	10e-6 H
IGBT DCP/DCN	
Résistance interne	0.001 Ω
Snubber résistance	100k Ω
PI DCP/DCN	
Proportionnel	1.5611
Intégrateur	24.6
Charge	
Résistance	0.28 Ω
Inductance	0.1 H

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

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

Cette section présente les courbes d'intérêt pour un pas de calcul discret de $1\mu\text{s}$.

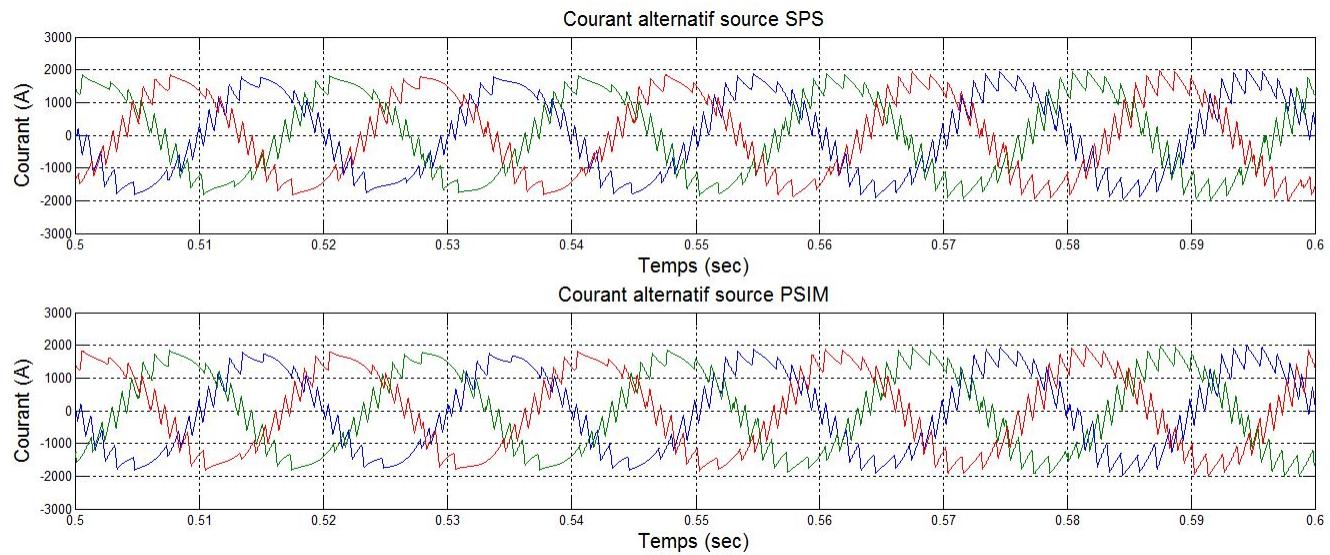


FIGURE 1.35 – Le courant d'entrée à $1\mu\text{s}$ section AFE

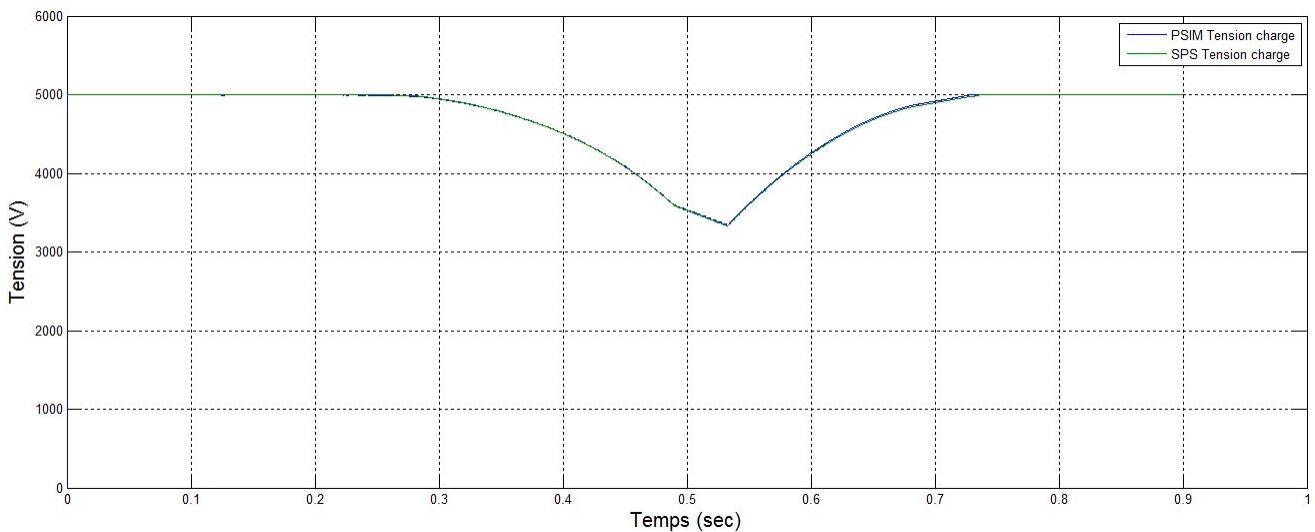


FIGURE 1.36 – La tension au bus CC à $1\mu\text{s}$ section AFE

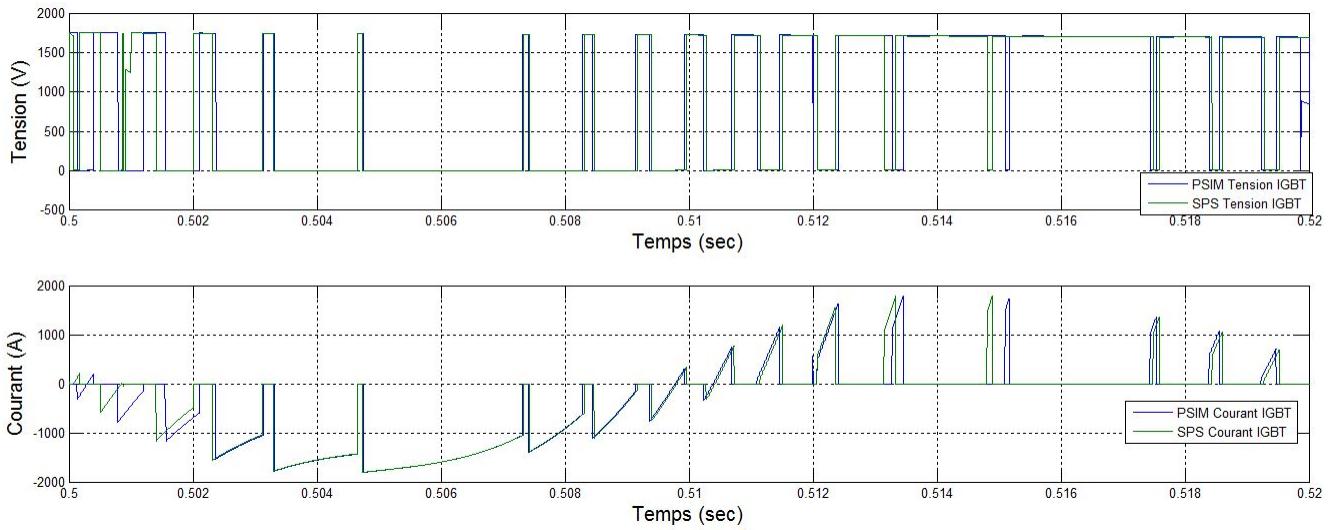


FIGURE 1.37 – La tension et le courant aux bornes d'un IGBT à $1\mu\text{s}$ au niveau de l'AFE

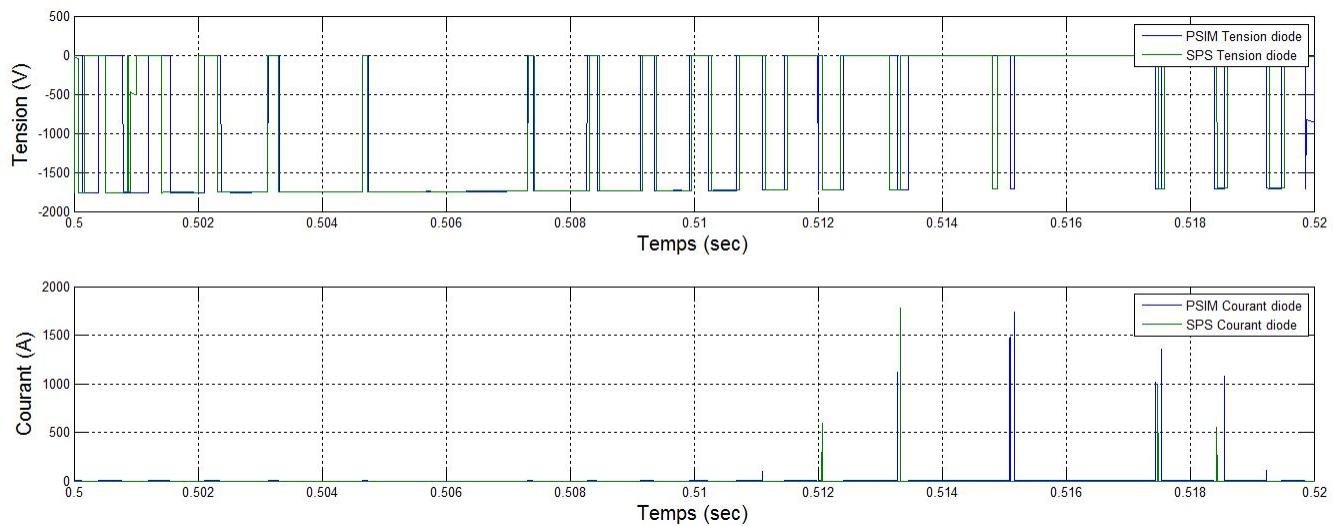


FIGURE 1.38 – La tension et le courant aux bornes d'une diode à $1\mu\text{s}$ au niveau de l'AFE

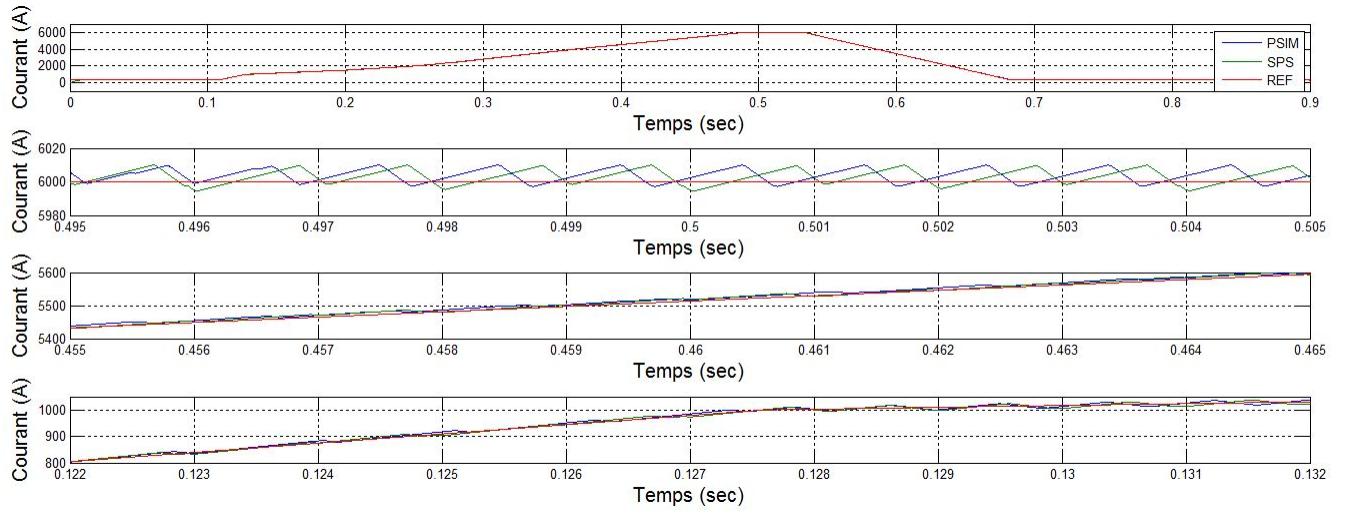


FIGURE 1.39 – Le courant aux bornes de la charge à $1\mu s$

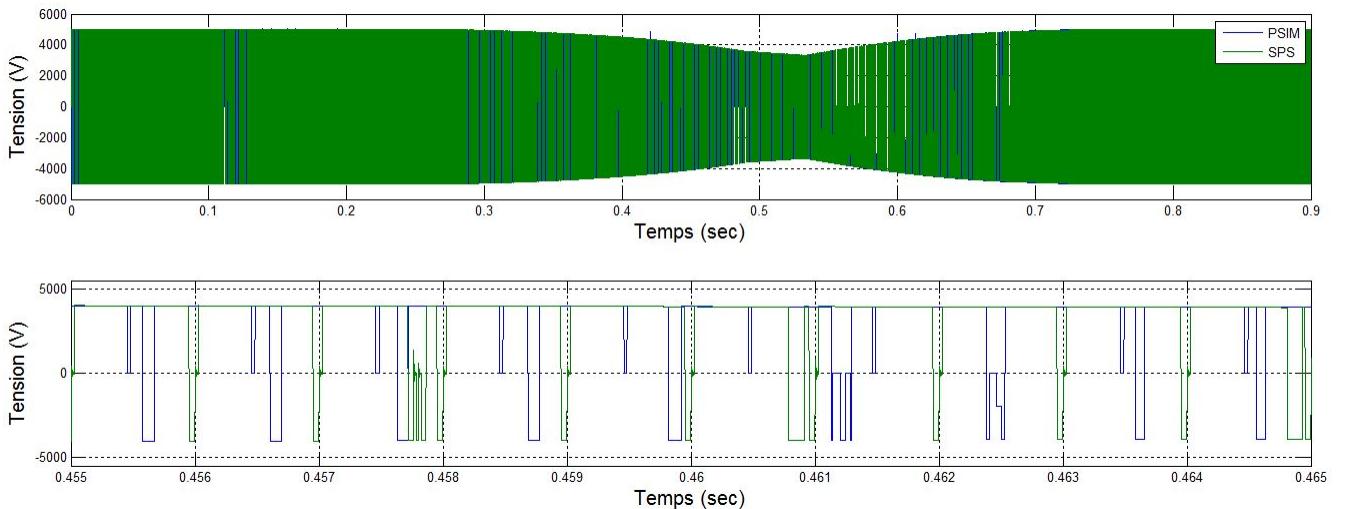


FIGURE 1.40 – La tension aux bornes de la charge à $1\mu s$

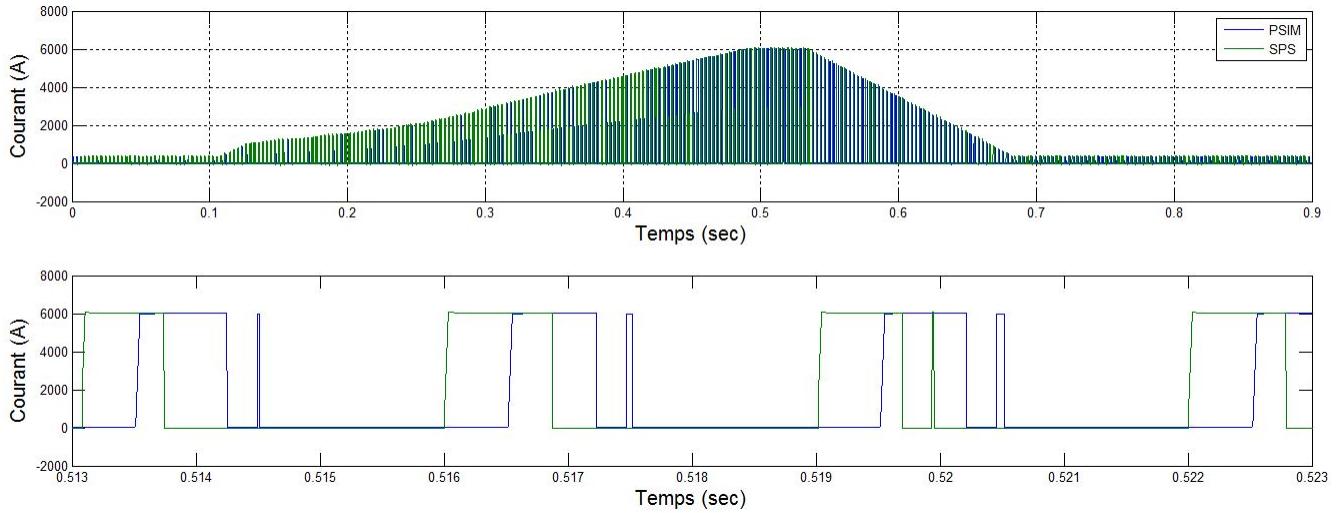


FIGURE 1.41 – Le courant aux bornes d'un IGBT à $1\mu\text{s}$ pour le DCP/DCN

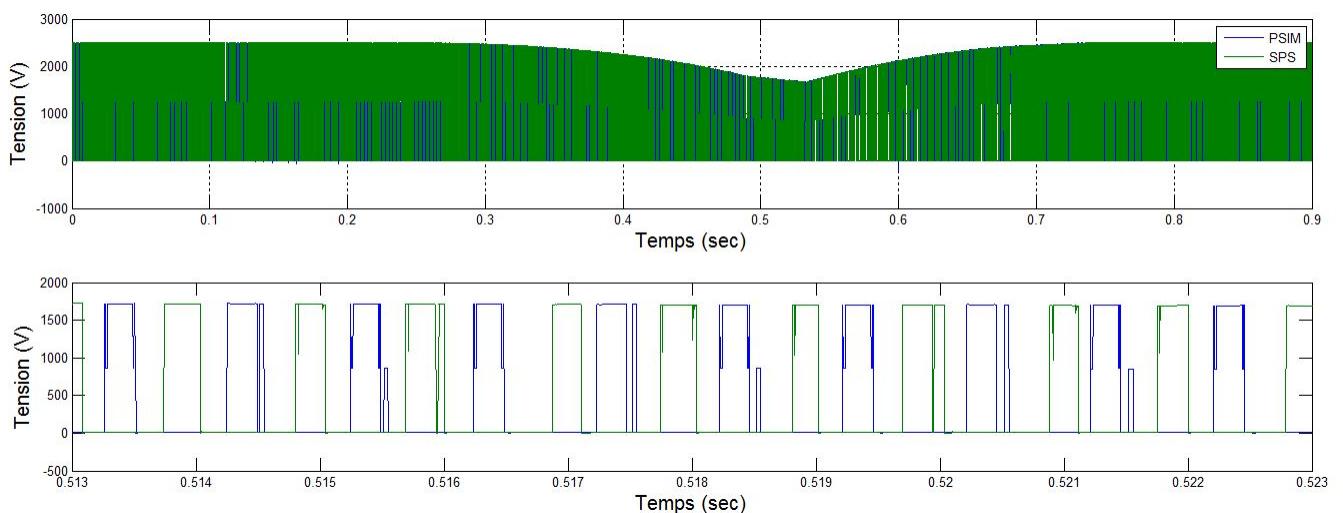


FIGURE 1.42 – La tension aux bornes d'un IGBT à $1\mu\text{s}$ pour le DCP/DCN

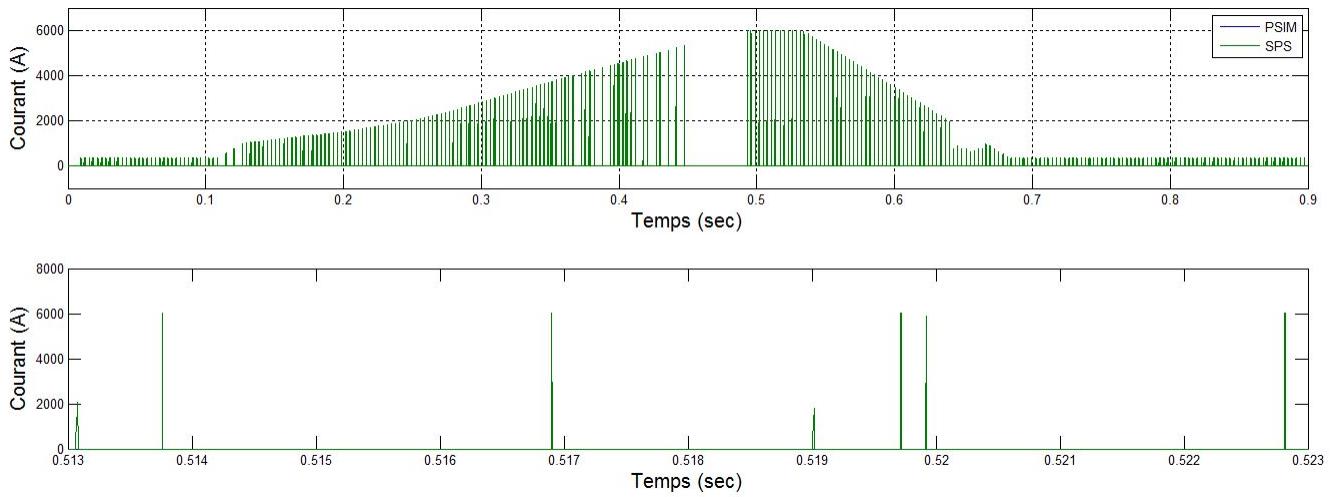


FIGURE 1.43 – Le courant aux bornes d'une diode à $1\mu\text{s}$ pour le DCP/DCN

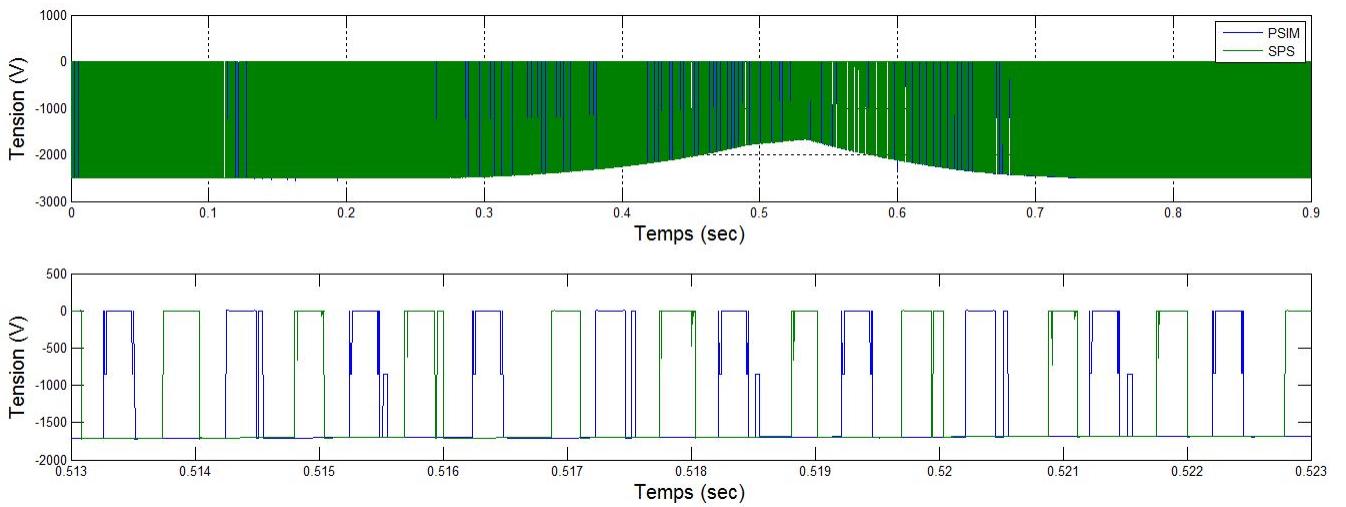


FIGURE 1.44 – La tension aux bornes d'une diode à $1\mu\text{s}$ pour le DCP/DCN