



Simulation d'une alimentation des électroaimants d'un accélérateur de particules

Design IV - GEL-3005

présenté à

M. Robert Bergevin et M. Jérôme Cros

<i>matricule</i>	<i>nom</i>
910 010 418	Gabriel Boivin-Desjardins
910 055 897	Daniel Thibodeau
910 097 879	Francis Valois

Université Laval - Québec

28 avril 2014

TABLE DES MATIÈRES

1	Introduction	3
2	Contexte et problématique	5
3	Besoins et objectifs	10
4	Diagramme des propriétés fonctionnelles	12
5	Méthodologie	14
6	Validation croisée des simulations	15
6.1	Convertisseur CC-CC 4 quadrants formé de 2 convertisseurs 3 niveaux NPC	15
6.2	AFE 3 niveaux NPC avec contrôle par MLI	15
6.3	AFE 3 niveaux NPC avec contrôle par MLI avec convertisseur CC-CC formé de 2 cellules NPC 3 niveaux	15
7	Conclusion	20

TABLE DES FIGURES

1.1	Représentation schématique de l'implantation du complexe d'accélérateurs du CERN	4
2.1	Schéma de l'implantation du PSB au CERN	6
2.2	Allure de la tension ligne-ligne d'un convertisseur CA/CC 3 niveaux à 3 bras NPC	7
2.3	Forme de courant et de tension à fournir précisément à la charge ainsi que la tension du bus CC en fonction du temps	7
2.4	Formes d'ondes type d'une commande entrelacée à k phases pour un convertisseur électronique	8
2.5	Schéma du circuit complet simplifié équivalent	8
2.6	Schéma électrique complet du système à implanter.	9
6.1	Courant traversant la charge sur PSIM et SPS pour un pas de calcul de $1\mu s$ pour le DCP/DCN	15
6.2	Tension aux bornes d'un IGBT sur PSIM et SPS pour un pas de calcul de $1\mu s$ pour le DCP/DCN	16
6.3	Le courant d'entrée à $1\mu s$ pour l'AFE sur charge RC	16
6.4	La tension à la charge à $1\mu s$ pour l'AFE sur charge RC	17
6.5	La tension et le courant au bornes d'un IGBT à $1\mu s$ pour l'AFE sur charge RC	17
6.6	Le courant d'entrée de l'AFE pour un pas de calcul de $1\mu s$	18
6.7	La tension du bus CC pour un pas de calcul de $1\mu s$	18
6.8	Le courant aux bornes des électroaimants pour un pas de calcul de $1\mu s$. . .	19
6.9	La puissance délivrée par le réseau alternatif pour un pas de calcul de $1\mu s$. .	19

INTRODUCTION

Les recherches sur la physique fondamentale requièrent des installations hors normes, défiant les limites de ce que l'on considère comme possible. Les installations du CERN, laboratoire européen situé en Suisse qui pratique des expériences à la fine pointe de la technologie est un laboratoire dont le financement est de nature publique et dont la connaissance est diffusée. Une représentation de l'ensemble de l'installation est présentée à la figure 1.1 Ce laboratoire utilise des techniques existantes, mais repousse les limites de précision et de fiabilité. Le sujet d'étude de ce projet de fin d'études porte sur une alimentation électronique visant à remplacer une alimentation existante. Le remplacement doit permettre une augmentation substantielle de l'énergie des faisceaux de protons. Le rôle de l'équipe Électrosim consiste à reproduire l'alimentation en développement au CERN sur trois simulateurs : SimPowerSystems (SPS), PSIM ainsi que sur un simulateur temps réel, fourni par la compagnie Opal-RT. Le client direct du projet est le laboratoire LEEPCI, de l'Université Laval, qui désire d'une part, étudier la méthode d'implantation de l'alimentation électronique du CERN en la reproduisant sur trois plateformes de simulation et d'autres part, valider l'implantation des modèles de simulations en comparant les résultats sur les différentes plateformes. Le projet vise à obtenir une compréhension théorique des choix techniques effectués par les ingénieurs du CERN en étudiant les résultats de simulation. Le rapport de détail en plusieurs sections : soit une explication détaillée du contexte et de la problématique entourant l'alimentation électronique, une énumération des besoins et des objectifs rattachés au projet, une présentation du cahier des charges sous le format d'un diagramme des propriétés fonctionnelles, l'explication de la méthodologie employée, une analyse simplifiée des sous-systèmes implantés et une analyse détaillée du système intégré

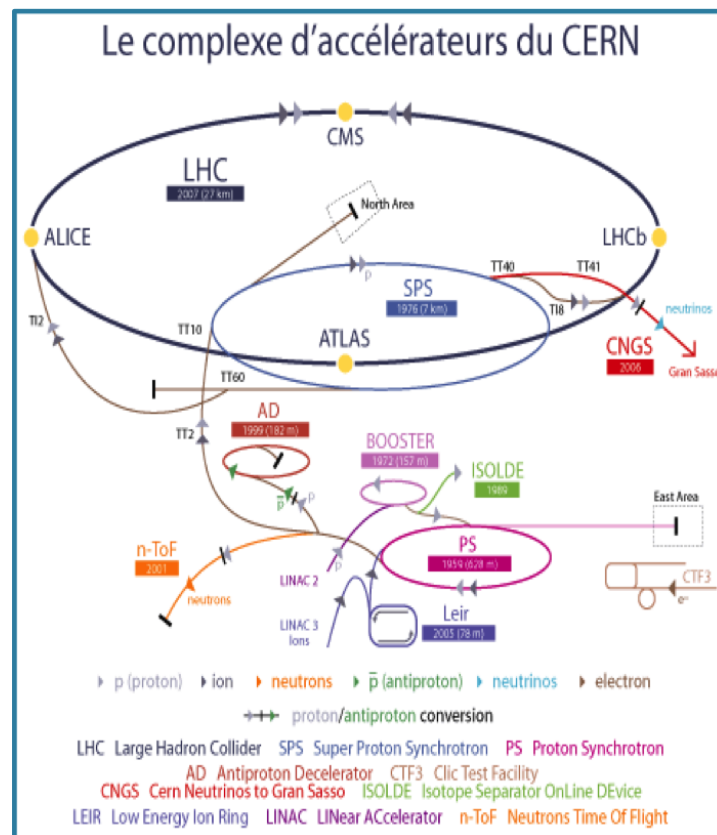


Figure 1.1 – Représentation schématique de l'implantation du complexe d'accélérateurs du CERN

CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE

Le complexe d'accélérateurs du CERN est formé de plusieurs accélérateurs de particules. Chacun d'eux accélère un faisceau de protons issus d'une bonbonne d'hydrogène à une énergie supérieure. Le premier accélérateur de la chaîne est le Linac 2. Il permet d'accélérer les protons jusqu'à une énergie de 50MeV. Le faisceau résultant est par la suite injecté dans le *Proton Synchrotron Booster* (PSB), qui élève l'énergie des protons jusqu'à 1.4GeV. Le *Proton Synchrotron* (PS) augmente l'énergie du faisceau jusqu'à 25GeV, suivi sur *Super Proton Synchrotron*(SPS) qui augmente l'énergie jusqu'à 450GeV. Le dernier étage d'accélération est le LHC, lequel augmente l'énergie des faisceaux jusqu'à 4TeV.

L'accélérateur étudié dans ce projet est le PSB, dans lequel on désire augmenter l'énergie des protons jusqu'à 2GeV. La figure 2.1 présente un schéma de l'implantation du PSB. Le principe d'accélération d'une particules électriquement chargé repose sur les lois fondamentales de la physique. Une équation générale résumant le phénomène étudié est présentée à l'équation 2.1.

$$\vec{F} = q\vec{E}(r,t) + q\vec{v} \times \vec{B}(r,t) \quad (2.1)$$

L'alimentation concernée par l'étude n'agit que sur le champ magnétique (B), le champ électrique (E) étant un champ magnétique pulsé fournit par un autre système. Le champ magnétique est généré en utilisant des électroaimants, soit un noyau possédant une perméabilité relative (μ_R) élevée dans lequel on injecte un champ magnétique au moyen d'un enroulement le fil avec un nombre de tours précis. On sait que le champ magnétique peut s'écrire comme une fonction linéaire du courant et de l'inductance des électroaimants, soit $B \approx \frac{N_{tour} I \mu_R \mu_0}{L}$. Si l'on désire fournir un champ magnétique variable au faisceau d'électrons, il est donc nécessaire d'alimenter les électroaimants avec une forme de courant variable.

AFE 3 niveaux NPC à 3 bras Alimenter un faisceau d'électrons à des énergies élevées requiert beaucoup de puissance, sur un court laps de temps. De plus, au CERN, les cycles d'alimentation sont répétés de manière continue. Ce qui signifie que le réseau alimentant les électroaimants voit des impulsions de puissance élevée pendant de courte période, ce qui est relativement éprouvant pour un réseau électrique. Le CERN a opté pour un système comprenant un transformateur abaisseur, suivi d'inductances de lissage et d'un convertisseur

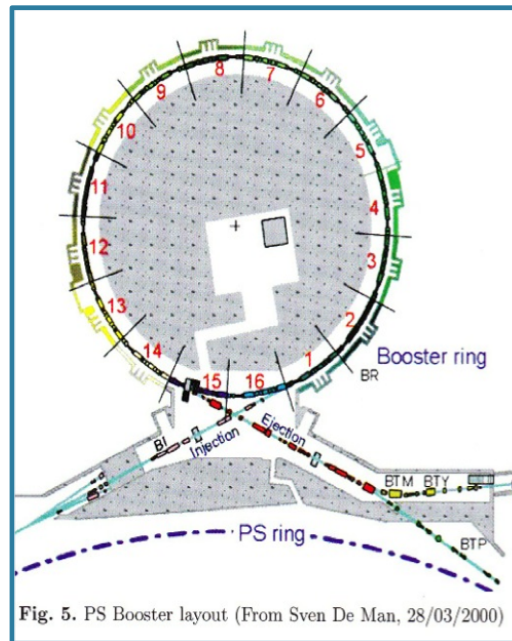


Figure 2.1 – Schéma de l'implantation du PSB au CERN

CA/CC actif (AFE) , permettant de contrôler l'échange de puissance active et réactive. L'AFE est un redresseur 3 niveaux *Neutral Point Clamped* (NPC) à 3 bras, formé avec des IGBT de haute puissance. L'objectif de l'AFE est de maintenir la tension d'un bus CC, formé avec un banc de condensateurs d'une capacité de 0.3F, à 5kV avec une puissance moyenne de 2.7MW pendant un cycle. Le rôle du banc de condensateurs est de limiter la perturbation vue du réseau, causée par l'appel de puissance des électroaimants. L'AFE possède une fréquence de commutation de 1kHz, de manière à maximiser la durée de vie des interrupteurs. La méthode de commande employée pour les interrupteurs est une modulation de largeur d'impulsion (MLI), les formes d'ondes de tension, côté réseau, ont l'allure présentée à la figure 2.2. On remarque qu'il existe un total de 5 niveaux de tensions distincts pour la tension ligne-ligne, soit $+V_{DC}$, $V_{DC}/2$, 0 , $-V_{DC}/2$ et $-V_{DC}$. Le nombre plus élevé de niveaux est avantageux sur le plan de la qualité de l'onde. Aussi, les interrupteurs voient une tension maximale de $V_{DC}/2$, ce qui est très avantageux sur le plan du dimensionnement.

DCP/DCN 3 niveaux NPC à 3 bras L'alimentation des électroaimants est faite à partir du bus CC, sur lequel est rattaché un convertisseur CC-CC (onduleur) actif, ayant la capacité de contrôler l'échange de puissance active et réactive. L'onduleur est formé de 2 cellules, dénotées DCP et DCN, qui sont en soit des onduleurs 3 niveaux NPC à 3 bras, lesquelles sont rattachées aux électroaimants par le biais d'inductances de couplage. L'agencement des

cellules permet de fournir une tension de $\pm 5\text{kV}$ aux électroaimants, ainsi qu'un courant allant jusqu'à 6kA . La forme de courant à fournir aux électroaimants est présentée à la figure 2.3. Les électroaimants sont modélisés par une inductance de 0.1H en série avec une résistance de 0.28Ω . Les bras du convertisseur CC-CC ont une commande d'une fréquence de 333Hz , décalée d'un tiers de période. La figure 2.4 montre une représentation des formes d'ondes associées à une commande entrelacée d'un onduleur à k phases. Ce qui signifie que la tension vue à la charge est d'une fréquence de 1kHz . Cela est réalisé de manière à maximiser la durée de vie des interrupteurs et de minimiser les écarts de la température de jonctions. La tension moyenne maximale étant de 3kV , la puissance maximale consommée par les électroaimants pendant un cycle est de 18MW . La puissance moyenne pendant un cycle est de 5.4MW . L'excédent de puissance est fourni par le biais du banc de condensateurs, lequel subit une chute de tension pendant le cycle, de manière à limiter la puissance vue du réseau. Un schéma complet et simplifié du système est présenté à la figure 2.5.

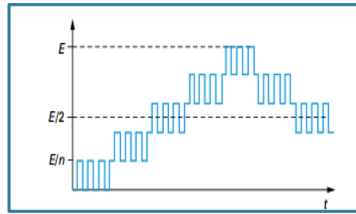


Figure 2.2 – Allure de la tension ligne-ligne d'un convertisseur CA/CC 3 niveaux à 3 bras NPC

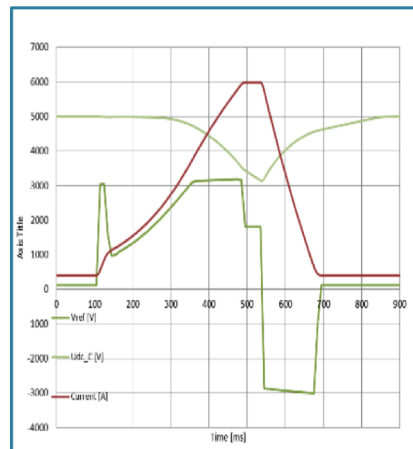


Figure 2.3 – Forme de courant et de tension à fournir précisément à la charge ainsi que la tension du bus CC en fonction du temps

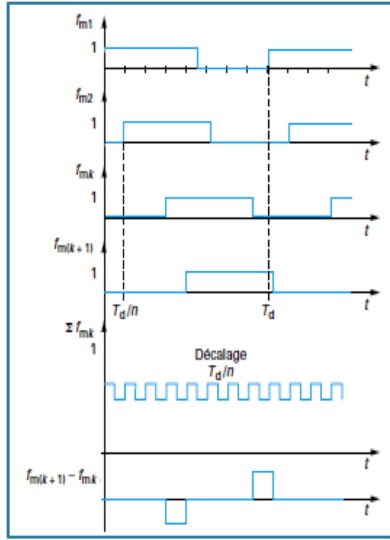


Figure 2.4 – Formes d’ondes type d’une commande entrelacée à k phases pour un convertisseur électronique

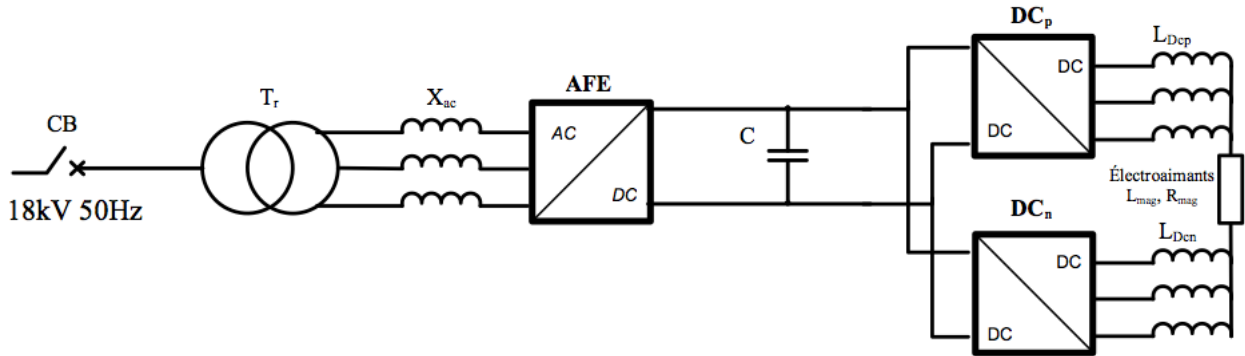


Figure 2.5 – Schéma du circuit complet simplifié équivalent

Le client principal de ce projet est le laboratoire LEEPCI de l’Université Laval, lequel vise à obtenir une implantation sur 3 plateformes du système employé au CERN, d’une part afin de valider le comportement du système sous différentes plateformes et d’autre parts, afin de comprendre de manière théorique les choix pratiques effectués par les ingénieurs du CERN. Opal-RT est une compagnie œuvrant dans le domaine des simulateurs temps réels. Comme client et partenaire du projet, Opal-RT fournit une plateforme de simulation temps réelle qui permet de mettre en œuvre une validation additionnelle des modèles implantés sur SPS et PSIM. Les résultats obtenus du présent projet d’études visent à monter un document de support de formation pédagogique. Le schéma électrique complet de la simulation est présenté à la figure 2.6.

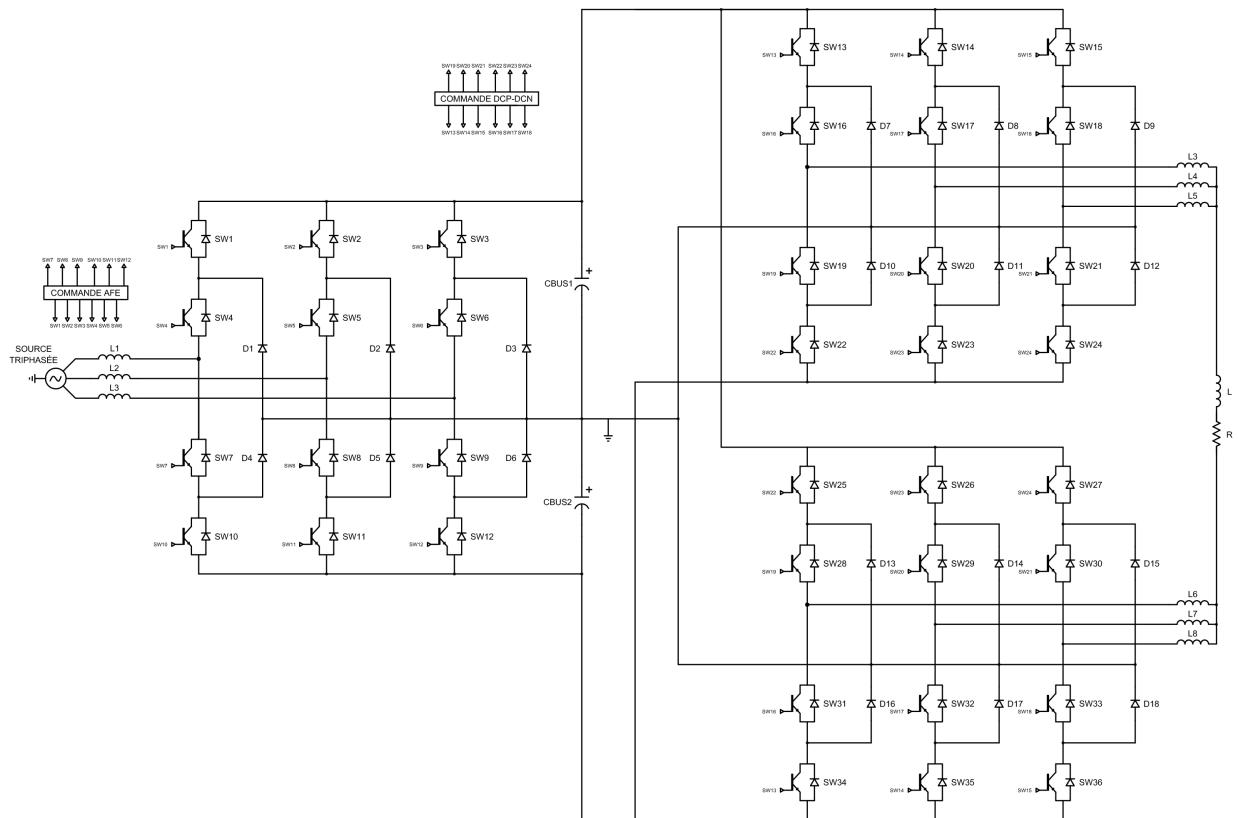


Figure 2.6 – Schéma électrique complet du système à implanter.

BESOINS ET OBJECTIFS

Les objectifs du projet portent sur plusieurs volets. Premièrement, il est nécessaire de considérer l'aspect de paramétrisation des simulations et de dimensionnement des composantes employées selon un cahier des charges précis. En ce qui attrait à l'outil de dimensionnement à proprement parler l'outil de paramétrisation et de contrôle, consiste à fournir un outil de contrôle vérifier le dimensionnement des composantes, qui devra être calculé de manière théorique et approximative. Les objectifs à cet endroit sont de :

- Fournir un outil de dimensionnement pour chaque plateforme qui soit convivial et facile d'utilisation ;
- Livrer un outil de dimensionnement pour chaque plateforme qui utilise les paramètres usuels de nomenclature utilisés dans les simulateurs.

Deuxièmement, pour ce qui est des simulateurs pour chacune des plateformes, il se doivent de :

- Valider que la conception choisie est fonctionnelle ;
- Permettre la comparaison des résultats de simulation pour différents paramètres de dimensionnement.

Les plateformes sur lesquelles les simulations doivent être livrées sont Simulink(SimPowerSystems), PSIM et Opal-RT. SPS est un outil de simulation générique qui permet de simuler tout type de circuits, toutefois ce côté générique cause des temps de simulation généralement plus longs pour une même précision comparé à des simulateurs spécifiques comme PSIM. L'usage de SPS est problématique au niveau des variations rapides. PSIM est spécialement conçu pour les circuits d'électronique de puissance et de contrôles de moteur, tandis que les simulateurs génériques sont conçus pour les circuits électriques de base. Cet outil permet une meilleure rapidité et une meilleure précision. Par ailleurs, il est plus robuste aux variations rapides. Le simulateur OPA-4500 de Opal-RT est un simulateur temps réel qui permet une comparaison directe des résultats avec SPS. Les pas de simulations sont généralement faible, compte tenu de l'optimisation effectuée et de la puissance des composantes. Cet outil permet de réaliser des simulations en temps réel à partir de SPS. Par ailleurs, l'utilisation d'un simulateur temps réel présente la possibilité de tests d'intégration en temps réel

Troisièmement, en ce qui attrait à la documentation technique, elle présente d'une part les résultats de calculs de dimensionnement théoriques, d'autres part un guide d'utilisation des simulations et de l'outil de contrôle. L'objectif de cette documentation est donc de :

- Présenter des exemples d'utilisation des simulations et de l'outil de contrôle et de dimensionnement.

La validation croisée des simulations est nécessaire afin de juger de la validité des résultats, à cet effet, il est donc nécessaire d' :

- Implanter une validation croisées des 3 simulateurs.

DIAGRAMME DES PROPRIÉTÉS FONCTIONNELLES

Exigences du client	Fonctionnalités												
	Simulateurs												
	Accepter des paramètres de modélisation	Abaissier la tension du réseau alternatif	Redresser le signal d'entrée à la sortie du transformateur				Commander un onduleur triphasé 3 niveaux de type NPC	Charger un banc de condensateur	Commander un convertisseur CC-CC à 4 quadrants multicellules	Alimenter les électroaimants de l'accélérateur de particules			Afficher des résultats de simulation personnalisés
		Ratio de transformation (%)	Ondulation de tension (%)	Déphasage du courant (°)	Puissance moyenne (MW)	Puissance crête (MW)	Fréquence tension ligne-ligne (Hz)	Temps de charge (s)	Fréquence tension à la charge (Hz)	Ondulation de courant (A)	Puissance moyenne (MW)	Puissance crête (MW)	Convivialité (1 à 5)
Modéliser une cellule de base d'un onduleur triphasé à 3 niveaux de type NPC	5		5	5	5	5	3		5	3	3	3	
Modéliser la commande dans le cas de l'onduleur de type AFE.	5		5	5	5	5	5		5	3	3	3	
Implanter le modèle de la configuration de base d'un onduleur triphasé à 3 niveaux NPC dans un simulateur	5		5	5	5	5	3		5	3	3	3	
Implanter le modèle de la commande dans le cas de l'onduleur de type AFE dans un simulateur	5		5	5	5	5	5		5	3	3	3	
Fournir un outil de dimensionnement pour l'onduleur de type AFE	2		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3
Modéliser un convertisseur CC-CC à 4 quadrants à l'aide de plusieurs cellules de type onduleur NPC	5								5	5	5	5	
Modéliser la commande d'un convertisseur CC-CC à 4 quadrants	5								5	5	5	5	
Implanter le modèle d'un convertisseur CC-CC à 4 quadrants à l'aide de plusieurs cellules de type onduleur NPC avec des inductances de découplage dans un simulateur	5								5	5	5	5	
Implanter le modèle de la commande d'un convertisseur CC-CC à 4 quadrants alimentant la charge spécifiée dans un simulateur	5								5	5	5	5	
Fournir un outil de dimensionnement pour le convertisseur CC-CC à 4 quadrants	2							2	2	2	2	2	3
Implanter le modèle complet de l'alimentation du Booster dans un simulateur	5	5						5	5	5	5	5	5
Effectuer la validation croisée des configurations implantées à l'aide de 3 simulateurs (PSIM, SimPowerSystems, Opal-RT)	5	3	5	5	5	5	5	3	5	5	5	5	5
Livrer une documentation pédagogique pour les divers outils de dimensionnement et de simulation	4												4

Tableau 4.1 – Première partie du diagramme des propriétés fonctionnelles (DPF)

Exigences du client	Fonctionnalités								
	Outil de dimensionnement		Documentation						
	Accepter des paramètres de dimensionnement usuels	Fournir les paramètres de modélisation utilisés par le simulateur	Présenter le fonctionnement de l'outil de dimensionnement de chacun des simulateurs		Présenter les modèles mathématiques utilisés dans chacun des simulateurs	Présenter l'utilisation de chacun des simulateurs		Présenter les procédures de validation croisées de chacun des simulateurs	
	Choix disponibles (1 à 5)	Convivialité (1 à 5)	Précision de l'information (1 à 5)	Convivialité (1 à 5)		Précision de l'information (1 à 5)	Convivialité (1 à 5)	Précision de l'information (1 à 5)	Convivialité (1 à 5)
Modéliser une cellule de base d'un onduleur triphasé à 3 niveaux de type NPC	5	3			5				
Modéliser la commande dans le cas de l'onduleur de type AFE.	5	3			5				
Implanter le modèle de la configuration de base d'un onduleur triphasé à 3 niveaux NPC dans un simulateur	3	5	3	3		4	4	4	4
Implanter le modèle de la commande dans le cas de l'onduleur de type AFE dans un simulateur	3	5	3	3		4	4	4	4
Fournir un outil de dimensionnement pour l'onduleur de type AFE	5	5	5	5					
Modéliser un convertisseur CC-CC à 4 quadrants à l'aide de plusieurs cellules de type onduleur NPC	5	3			5				
Modéliser la commande d'un convertisseur CC-CC à 4 quadrants	5	3			5				
Implanter le modèle d'un convertisseur CC-CC à 4 quadrants à l'aide de plusieurs cellules de type onduleur NPC avec des inductances de découplage dans un simulateur	3	5	3	3		4	4	4	4
Implanter le modèle de la commande d'un convertisseur CC-CC à 4 quadrants alimentant la charge spécifiée dans un simulateur	3	5	3	3		4	4	4	4
Fournir un outil de dimensionnement pour le convertisseur CC-CC à 4 quadrants	5	5	5	5					
Implanter le modèle complet de l'alimentation du Booster dans un simulateur	3	5	3	3	5	5	5	5	5
Effectuer la validation croisée des configurations implantées à l'aide de 3 simulateurs (PSIM, SimPowerSystems, Opal-RT)								5	5
Livrer une documentation pédagogique pour les divers outils de dimensionnement et de simulation	4	4	5	5	5	5	5	5	5

Tableau 4.2 – Seconde partie du diagramme des propriétés fonctionnelles (DPF)

MÉTHODOLOGIE

La méthodologie employée pour ce projet est une approche qui vise à fragmenter le système en sous-systèmes simples, plus faciles à analyser et qui permet par la suite de construire une expertise servant à intégrer les notions propres au concept complet. Concrètement, il faut :

- Modéliser le redresseur NPC 3 niveaux à 3 bras par un redresseur actif triphasé (AFE) ;
- Modéliser le hacheur 4 quadrants simplifié à 4 interrupteurs (de manière préliminaire) ;
- Modéliser le hacheur 4 quadrants avec 2 cellules NPC 3 niveaux à commande entrelacée.

Les simulations résultantes sont premièrement modélisées par des systèmes indépendants en boucle ouverte et par la suite par des systèmes en boucle fermée avec des régulateurs. Les sous-systèmes du projet sont les suivants :

- Modélisation simplifiée de la régulation de tension de l'AFE par un redresseur 2 niveaux débitant sur une charge idéale avec régulation d'angle et de courant par hystérésis, permettant le fonctionnement 4 quadrants du redresseur actif ;
- Modélisation simplifiée de la régulation de tension de l'AFE par un redresseur 2 niveaux débitant sur une charge RC initialement chargée avec facteur de puissance unitaire imposé et régulation de courant par hystérésis ;
- Modélisation de l'AFE 3 niveaux NPC débitant sur une charge RC initialement chargée avec facteur de puissance unitaire imposé et régulation de courant par MLI ;
- Modélisation du convertisseur CC-CC 4 quadrants par un hacheur 4 quadrants simple formé de 4 interrupteurs, alimenté à partir d'une charge idéale et commandé par MLI à 1kHz ;
- Modélisation du convertisseur CC-CC 4 quadrants par un hacheur formé de 2 cellules onduleur NPC 3 niveaux triphasées avec inductances de couplage, alimenté avec une source idéale et commandée par MLI décalée à 333Hz.

Le reste de la méthodologie consiste à assembler les différents sous-systèmes sous 3 plateformes distinctes. Il est donc nécessaire de :

- Valider les fonctionnalités des systèmes reliés ;
- Valider la concordance des résultats de simulations sous 3 plateformes.

Ce qui résulte de cette méthodologie est une intégration graduelle de la complexité des modèles, d'une part avec un développement un boucle ouverte, puis un développement en boucle fermée. Les systèmes sont par la suite corrélés sur les différentes plateformes, puis intégrés en sous-systèmes de complexité supérieure. Le tout est par la suite validé sur les différentes plateformes de simulation.

VALIDATION CROISÉE DES SIMULATIONS

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

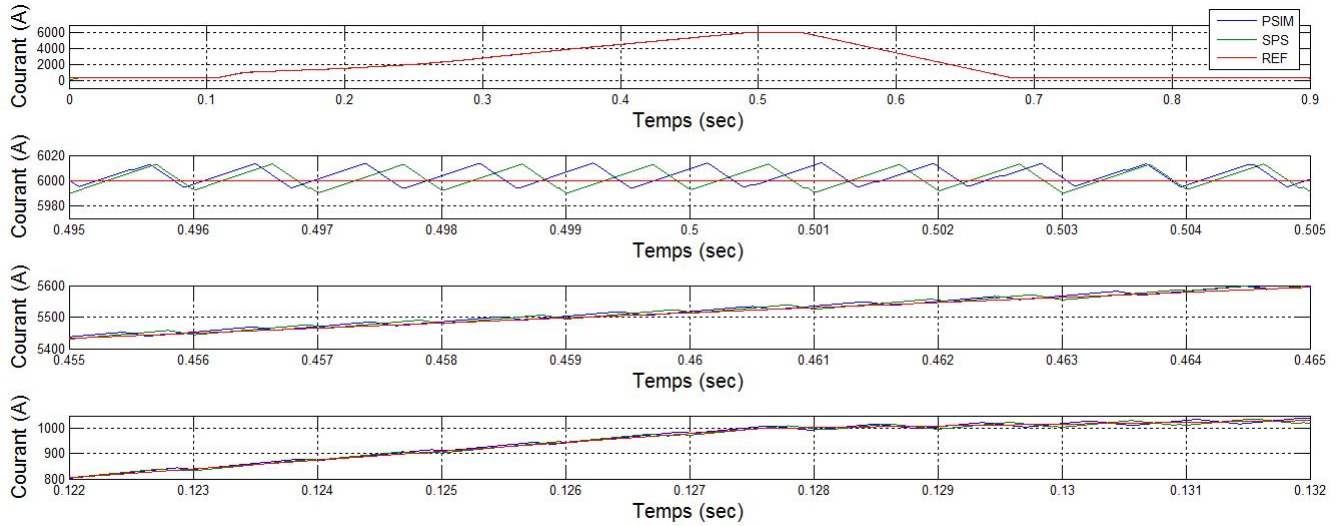


Figure 6.1 – Courant traversant la charge sur PSIM et SPS pour un pas de calcul de $1\mu s$ pour le DCP/DCN

6.2 AFE 3 niveaux NPC avec contrôle par MLI

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

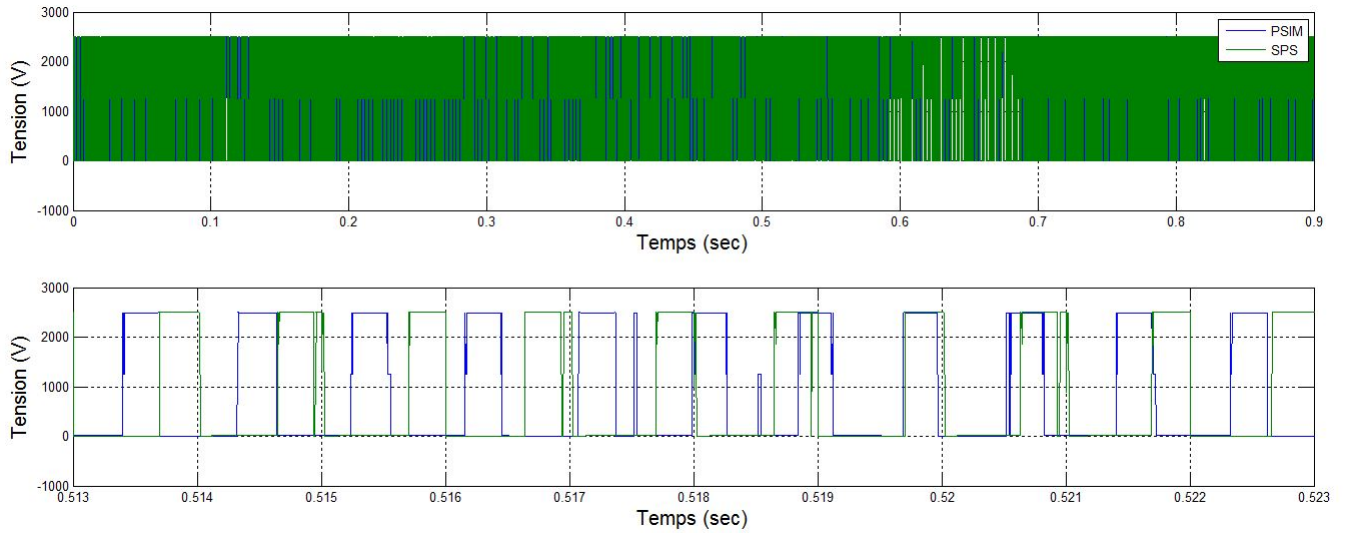


Figure 6.2 – Tension aux bornes d'un IGBT sur PSIM et SPS pour un pas de calcul de $1\mu s$ pour le DCP/DCN

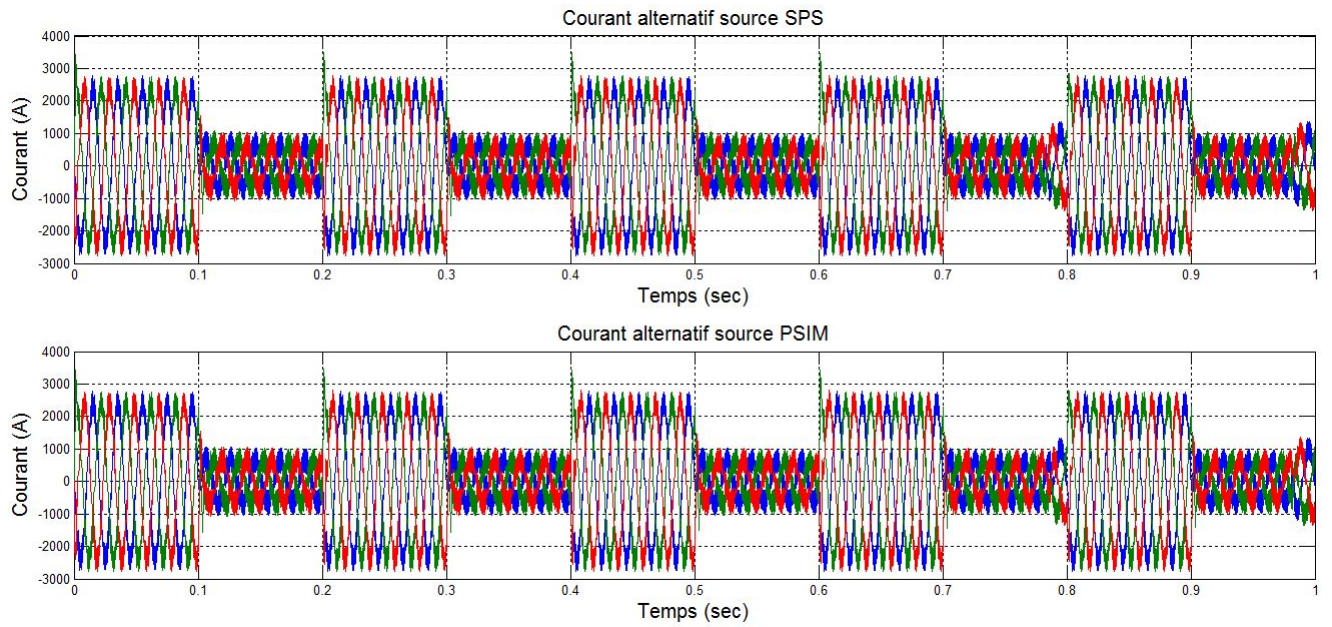


Figure 6.3 – Le courant d'entré à $1\mu s$ pour l'AFE sur charge RC

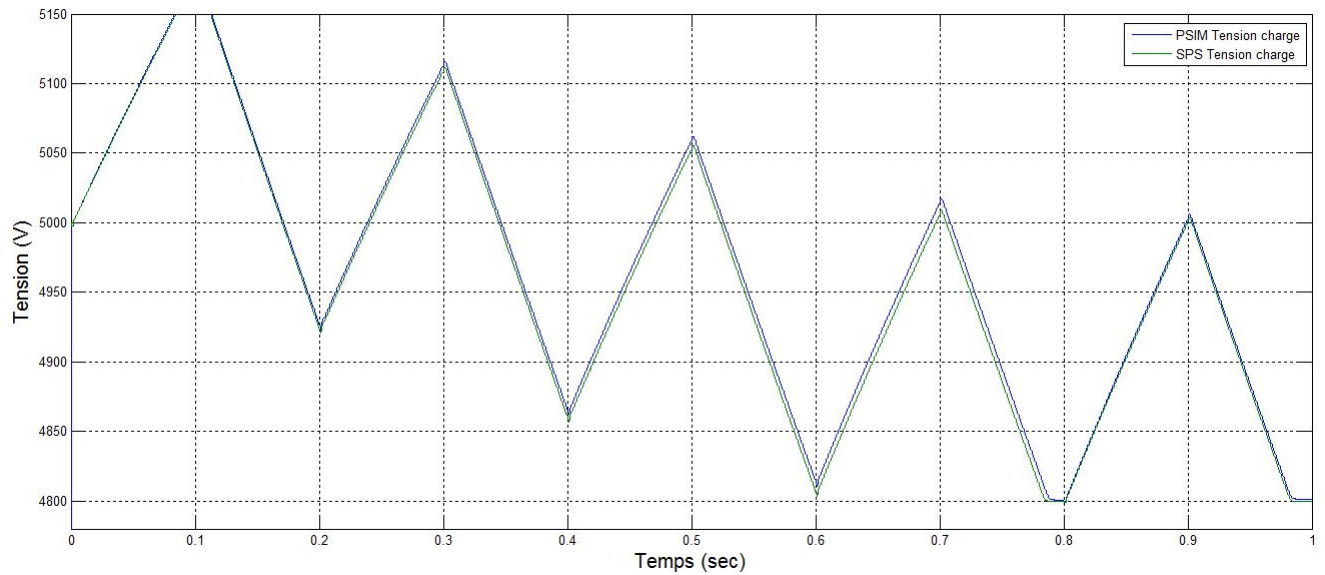


Figure 6.4 – La tension à la charge à $1\mu s$ pour l'AFE sur charge RC

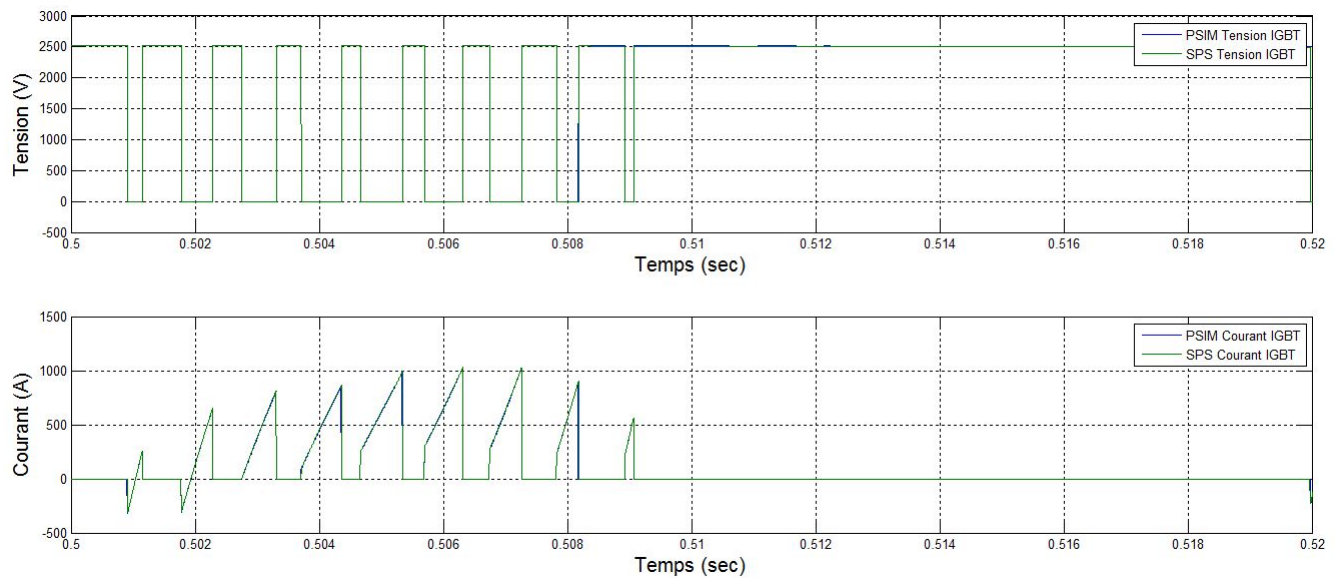


Figure 6.5 – La tension et le courant au bornes d'un IGBT à $1\mu s$ pour l'AFE sur charge RC

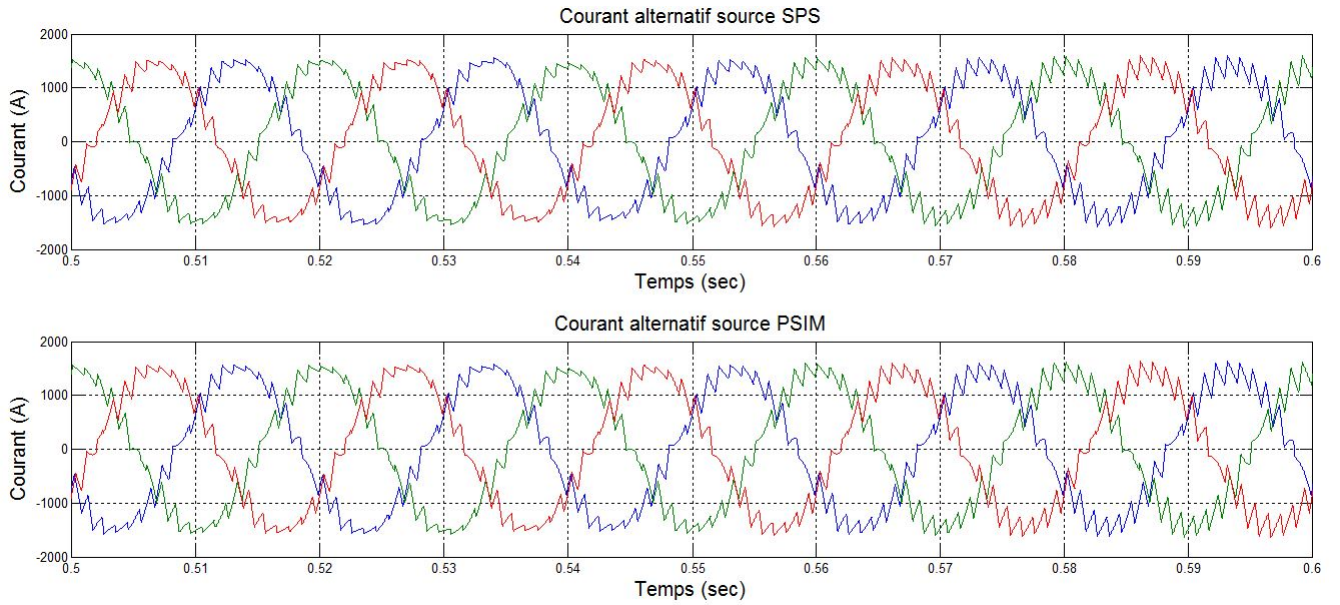


Figure 6.6 – Le courant d'entrée de l'AFE pour un pas de calcul de $1\mu s$

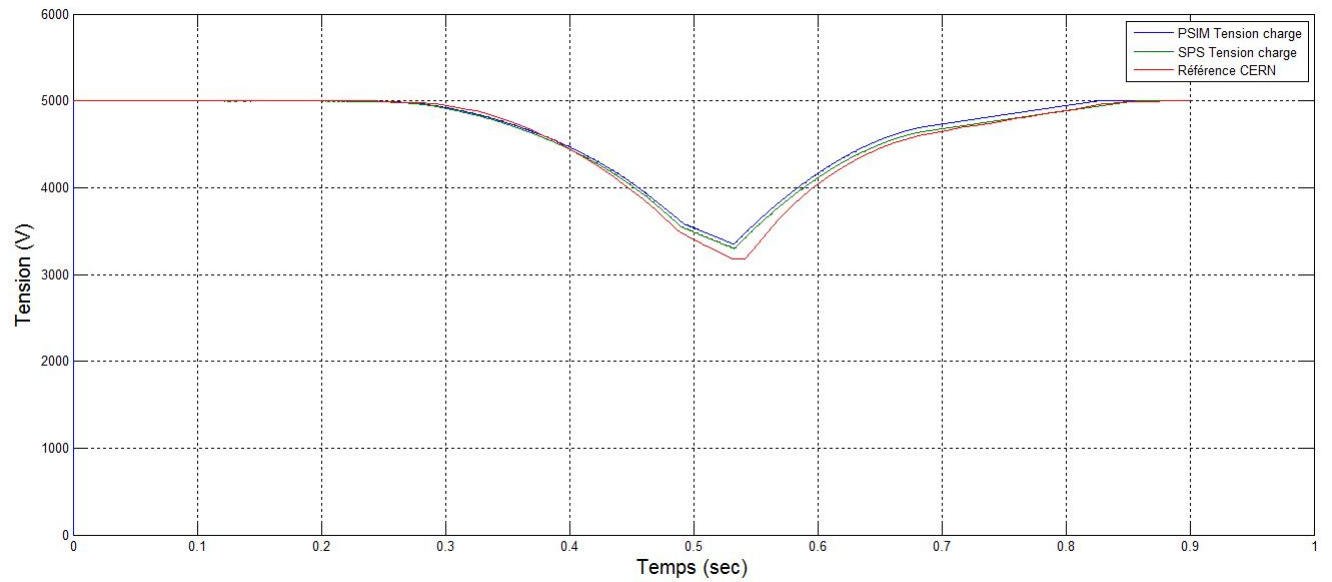


Figure 6.7 – La tension du bus CC pour un pas de calcul de $1\mu s$

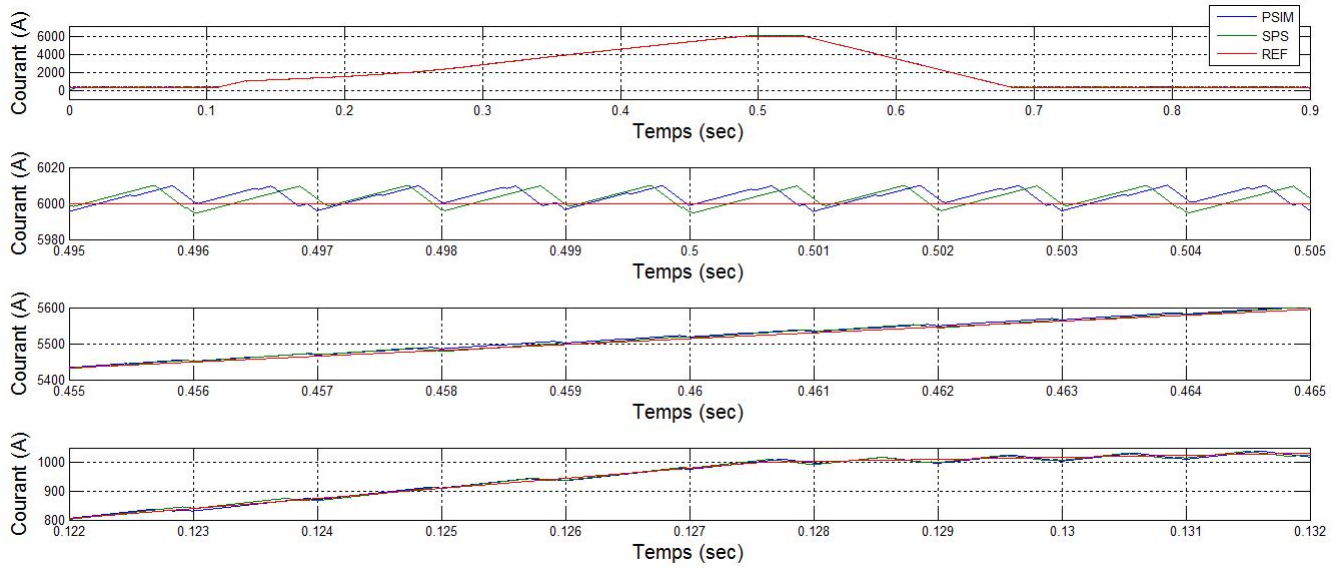


Figure 6.8 – Le courant aux bornes des électroaimants pour un pas de calcul de $1\mu s$

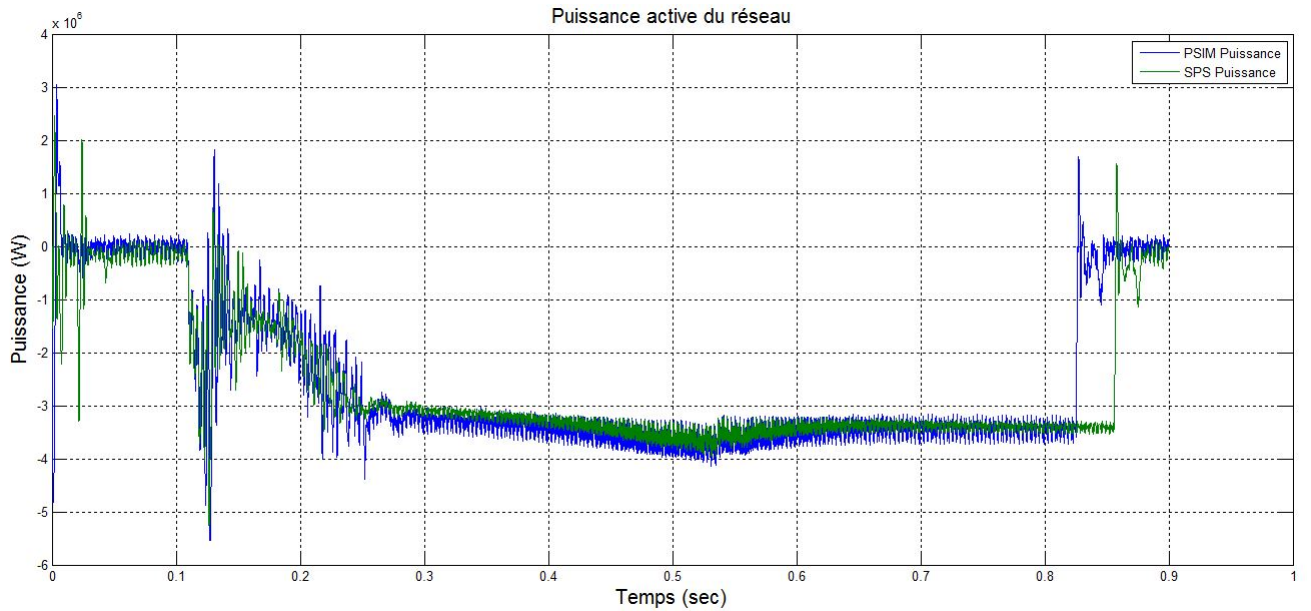


Figure 6.9 – La puissance délivrée par le réseau alternatif pour un pas de calcul de $1\mu s$

CONCLUSION
