



# 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

---

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Contexte et problématique</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Besoins et objectifs</b>	<b>11</b>
<b>4</b>	<b>Diagramme des propriétés fonctionnelles</b>	<b>13</b>
<b>5</b>	<b>Méthodologie</b>	<b>15</b>
<b>6</b>	<b>Validation croisée des simulations</b>	<b>17</b>
6.1	Convertisseur CC-CC 4 quadrants formé de 2 convertisseurs 3 niveaux NPC	17
6.2	AFE 3 niveaux NPC avec contrôle par MLI . . . . .	20
6.3	Système intégré : AFE 3 niveaux NPC avec contrôle par MLI avec convertisseur CC-CC formé de 2 cellules NPC 3 niveaux . . . . .	24
6.4	Comparatif des temps de simulation . . . . .	25
<b>7</b>	<b>Matrice de vérification des performances</b>	<b>28</b>
<b>8</b>	<b>Conclusion</b>	<b>29</b>

---

# TABLE DES FIGURES

---

1.1	Représentation schématique de l'implantation du complexe d'accélérateurs du CERN . . . . .	5
2.1	Schéma de l'implantation du PSB au CERN . . . . .	7
2.2	Allure de la tension ligne-ligne d'un convertisseur CA/CC 3 niveaux à 3 bras NPC . . . . .	8
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 . . . . .	9
2.4	Formes d'ondes type d'une commande entrelacée à k phases pour un convertisseur électronique . . . . .	9
2.5	Schéma du circuit complet simplifié équivalent . . . . .	10
2.6	Schéma électrique complet du système à implanter. . . . .	10
6.1	Courant traversant la charge sur PSIM et SPS pour un pas de calcul de $1\mu s$ pour le DCP/DCN . . . . .	18
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 . . . . .	19
6.3	Puissance active délivrée sur la charge RL sur PSIM et SPS pour un pas de calcul de $1\mu s$ pour le DCP/DCN . . . . .	19
6.4	Courant d'entrée à $1\mu s$ pour l'AFE sur charge RC suivant des variations périodiques de la consigne de tension . . . . .	21
6.5	Tension à la charge à $1\mu s$ pour l'AFE sur charge RC suivant des variations périodiques de la consigne de tension . . . . .	21
6.6	Tension et le courant au bornes d'un IGBT à $1\mu s$ pour l'AFE sur charge RC . . . . .	22
6.7	Tension ligne-ligne à $1\mu s$ pour l'AFE sur charge RC sans perturbation . . . . .	22
6.8	Phase entre le courant et la tension à $1\mu s$ pour l'AFE sur charge RC sans perturbation . . . . .	23
6.9	Courant d'entrée de l'AFE pour un pas de calcul de $1\mu s$ . . . . .	25
6.10	Tension du bus CC pour un pas de calcul de $1\mu s$ . . . . .	26
6.11	Courant aux bornes des électroaimants pour un pas de calcul de $1\mu s$ . . . . .	26

<i>TABLE DES FIGURES</i>	3
6.12 Puissance délivrée par le réseau alternatif pour un pas de calcul de $1\mu s$ . . .	27
7.1 Matrice de vérification des performances . . . . .	28
8.1 Schéma bloc de la chaîne de convertisseurs alimentant les électroaimants du CERN . . . . .	29

---

# 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 détaille 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

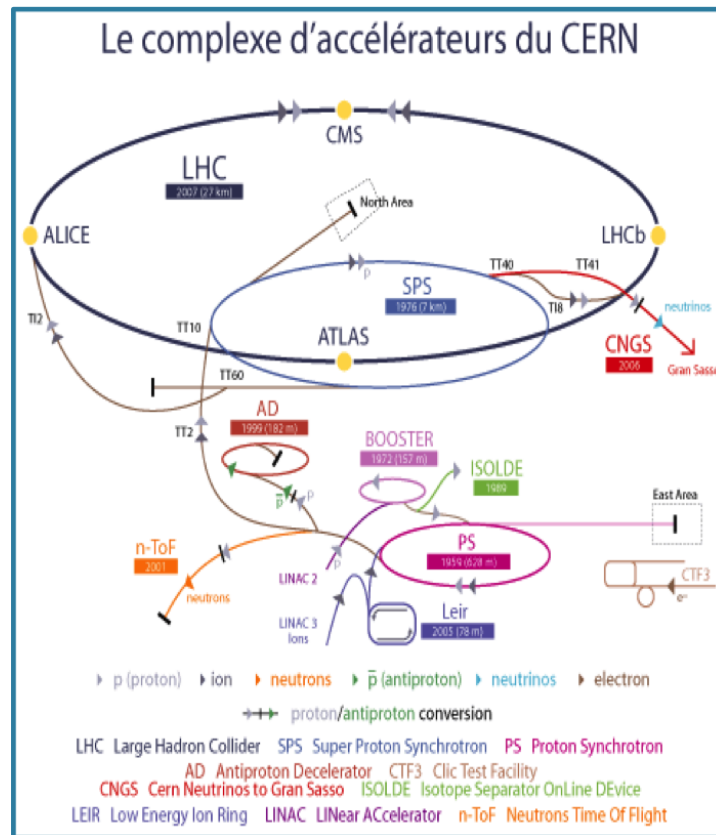


Figure 1.1 – Représentation schématique de l'implantation du complexe d'accélérateurs du CERN

---

# 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 ( $\mu_R$ ) 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

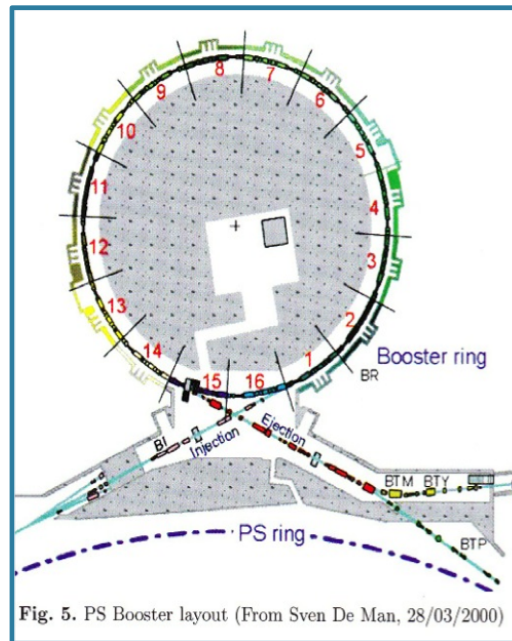


Figure 2.1 – Schéma de l'implantation du PSB au CERN

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  $6\text{kA}$ . La forme de courant à fournir aux électroaimants est présentée à la figure 2.3 Les électroaimants sont modélisés par une inductance de  $0.1\text{H}$  en série avec une résistance de  $0.28\Omega$ . Les bras du convertisseur CC-CC ont une commande d'une fréquence de  $333\text{Hz}$ , 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  $1\text{kHz}$ . 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  $3\text{kV}$ , la puissance maximale consommée par les électroaimants pendant un cycle est de  $18\text{MW}$ . La puissance moyenne pendant un cycle est de  $5.4\text{MW}$ . 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.

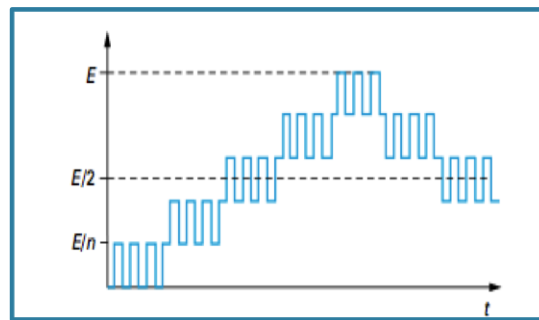


Figure 2.2 – Allure de la tension ligne-ligne d'un convertisseur CA/CC 3 niveaux à 3 bras NPC

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.

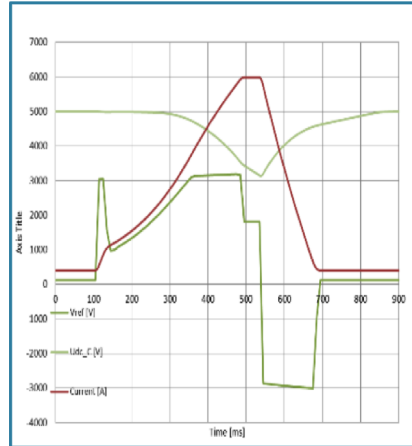


Figure 2.3 – Forme de courant et de tension à fournir précisément à la charge ainsi que la tension du bus CC en fonction du temps

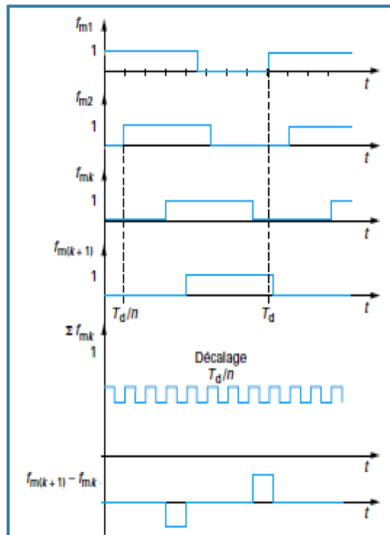
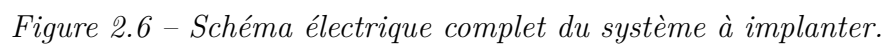


Figure 2.4 – Formes d'ondes type d'une commande entrelacée à  $k$  phases pour un convertisseur électronique



---

# 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 en 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

---

Ce chapitre présente seulement les sous-systèmes faisant partie du système intégré et qui permettent de vérifier le cahier des charges.

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

Le premier sous-système est celui du convertisseur CC-CC 4 quadrants formé de 2 convertisseurs triphasés 3 niveaux NPC avec une commande par MLI à 333Hz, intercalée de  $120^\circ$  par phase. La fréquence vue à la charge est la même que la fréquence de commande de l'AFE, soit 1kHz. L'entrelacement des commandes permet de réduire les valeurs RMS et moyennes des courants dans les différents bras des convertisseurs. La tension maximale vue des interrupteurs est abaissée à la moitié de la tension du bus CC, ce qui présente un net avantage de dimensionnement. Le sous-système du DCP/DCN permet de remplir l'exigence d'alimenter les électroaimants avec une forme de courant précise. De plus, la puissance moyenne et maximale doivent être similaires à celles prévues par le CERN (18MW crête et 5.4MW moyenne). Les simulations ont été implantées sous SPS et PSIM, le simulateur d'OPAL-RT n'étant pas disponible à temps. Les résultats comparatifs du courant dans la charge sont présentés à la figure 6.1. On remarque premièrement que les 2 simulateurs permettent de suivre la consigne de courant demandée. Par la suite, lorsqu'on observe le courant en maintenant à 6kA, on remarque qu'il y a une légère différence de fréquence entre les 2 signaux, de l'ordre d'environ 110Hz. La différence est apportée par l'implémentation des filtres dans les 2 simulateurs ainsi que par les algorithmes utilisés afin de solutionner les matrices d'équation d'états (SPS) et les matrices d'admittances nodales (PSIM). De plus, les algorithmes de détection des passages par 0 ne sont pas exactement similaires. SPS utilise une discrétisation par la méthode de Tustin et PSIM une méthode trapézoïdale pure. Ce faisant, vu la quantité de composantes et le nombre de commutations élevées (36 interrupteurs commandés), il est normal d'observer des différences ponctuelles. On constate cependant que les amplitudes observées sont identiques et que les signaux reviennent en phase périodiquement. Les formes d'ondes de courant en montée initiale et en montée rapide permettent de constater que la réponse globale des simulateurs est similaire et qu'ils présentent un comportement analogue.

La figure 6.2 présente la tension aux bornes d'un IGBT du DCP/DCN dans les 2 simulateurs. On remarque que les patrons de tensions et les durées de conduction sont identiques.

Les amplitudes des tensions aux bornes de l'IGBT le sont aussi. Cependant, qu'il y a un décalage de l'une des simulations par rapport à l'autre, ce qui explique les différences ponctuelles.

Pour ce qui est du sous-système formé par le DCP/DCN, on comprend que la commande des interrupteurs représente le fonctionnement désiré, qu'elle permet de remplir l'exigence d'alimenter les électroaimants de l'accélérateur de particules avec une forme de courant précise et une fréquence de modulation équivalente de 1kHz. La puissance instantanée sur 0.9s ainsi que la puissance moyenne mesurée sur 0.9s sont présentées à la figure 6.3. On remarque que le critère de puissance maximale (18MW) est respecté ainsi que le critère de puissance moyenne (un peu moins de 5.4MW). Ces critères sont ceux qui ont été fournis par le CERN. Aussi, la correspondance du fonctionnement dans PSIM et dans SPS a été vérifiée par des comparaisons à l'échelle de la modulation.

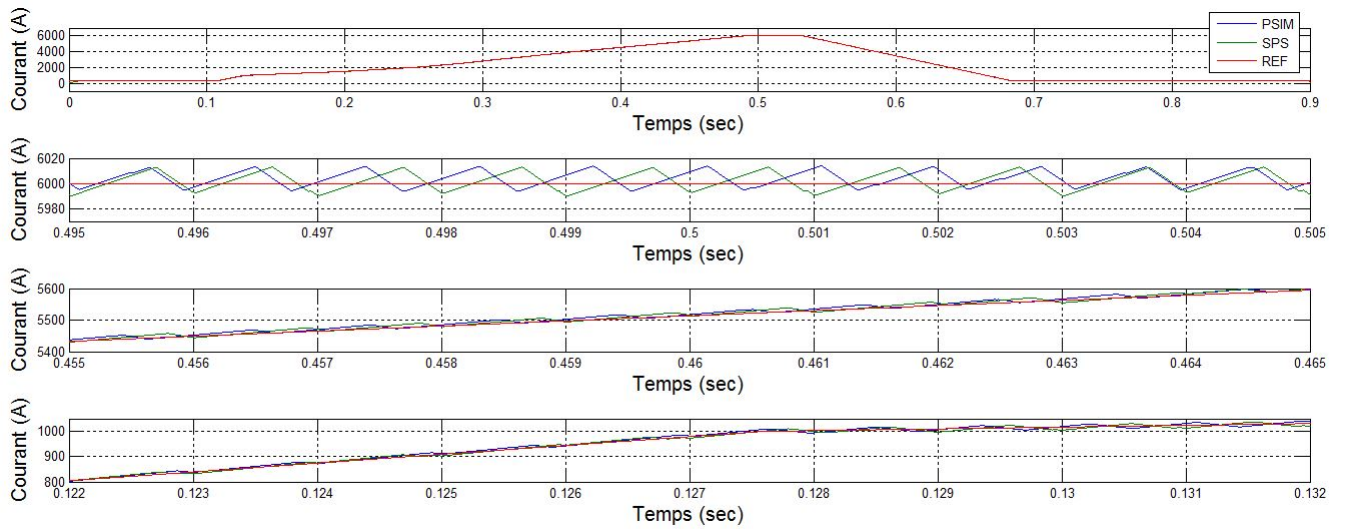


Figure 6.1 – Courant traversant la charge sur PSIM et SPS pour un pas de calcul de  $1\mu s$  pour le DCP/DCN

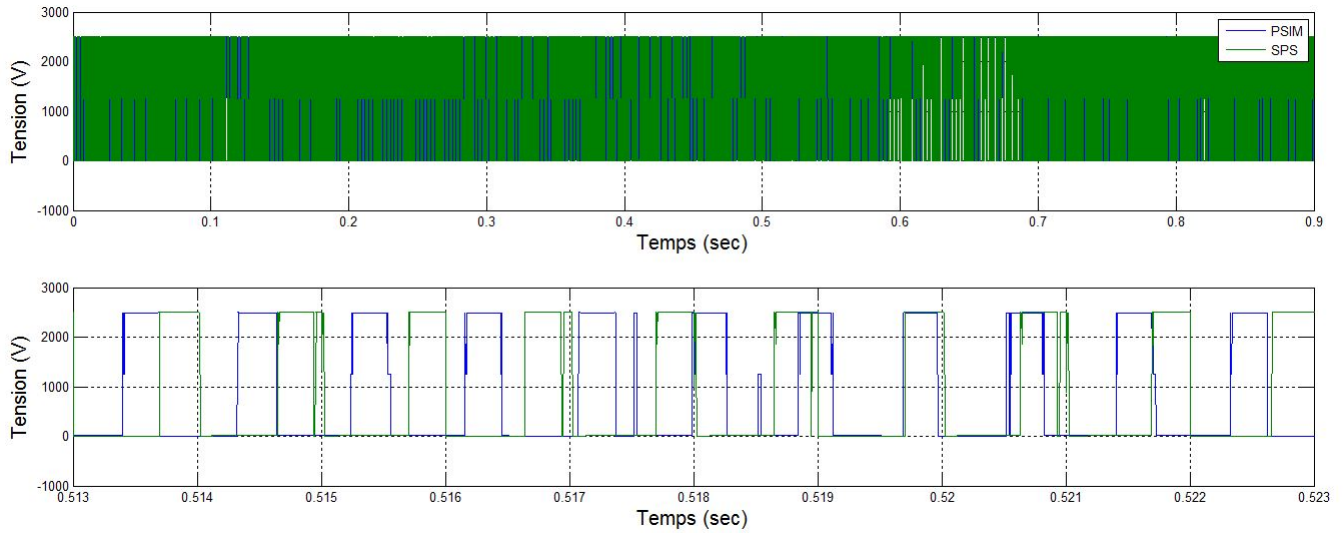


Figure 6.2 – Tension aux bornes d'un IGBT sur PSIM et SPS pour un pas de calcul de  $1\mu\text{s}$  pour le DCP/DCN

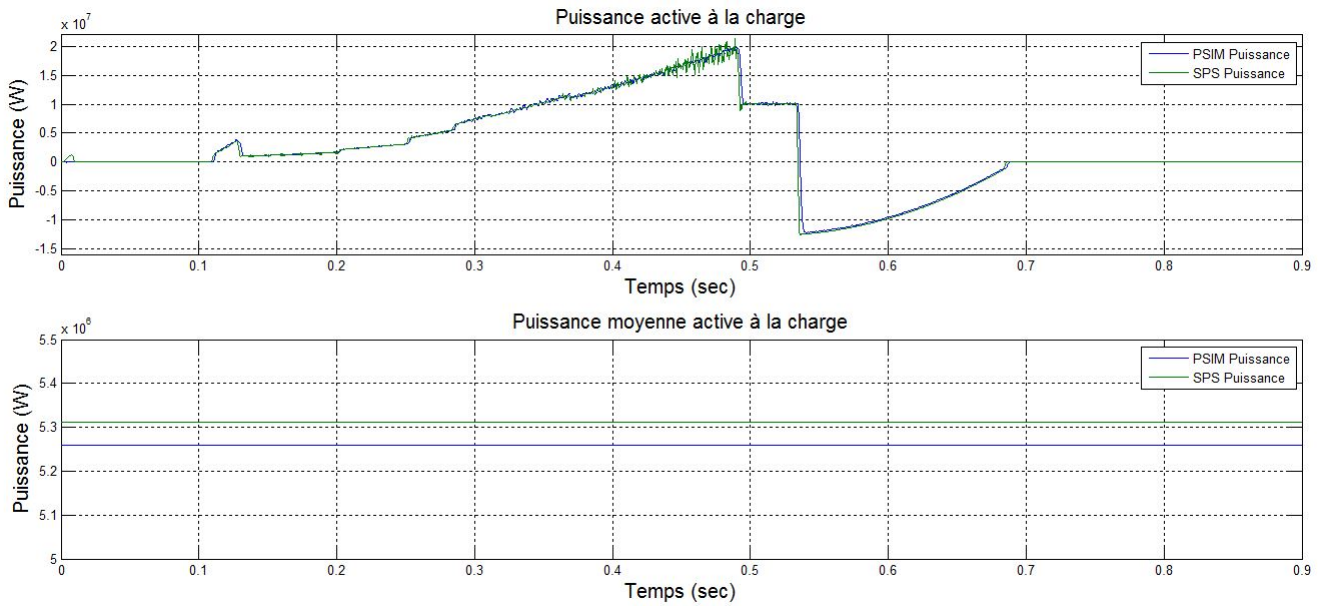


Figure 6.3 – Puissance active délivrée sur la charge RL sur PSIM et SPS pour un pas de calcul de  $1\mu\text{s}$  pour le DCP/DCN

## 6.2 AFE 3 niveaux NPC avec contrôle par MLI

Le second sous-système est celui de l'AFE 3 niveaux NPC triphasé avec contrôle par MLI débitant sur une charge RC équivalente. Ce sous-système permet de remplir l'exigence de redresser le signal d'entrée du transformateur, de fournir une puissance moyenne maximale de 2.7MW et une puissance crête maximale de 3.6MW. Cela, tout en maintenant la phase du courant nulle par rapport à la tension. La figure 6.4 présente le courant d'entrée pour l'AFE sur charge RC suivant des variations périodiques de la consigne de tension. On cherche ici à présenter la stabilité transitoire et en régime permanent de l'AFE débitant sur une charge RC. L'objectif étant de montrer que les réglages employés donnent des réponses transitoires et permanentes identiques en perturbation. On remarque que les courbes de courant de SPS et de PSIM présentent des réponses pratiquement identiques et indissociables. La figure 6.5 présente la tensions aux bornes de la charge RC suivant des variations périodiques de la consigne de tension. On constate que les réponses entre SPS et PSIM sont très similaires et que la tension converge vers la même tension en régime permanent. Par ailleurs, on constate que le courant d'entrée se stabilise suivant une perturbation et que les régulateurs choisis présentent un fonctionnement stable en perturbation. La figure 6.6 présente la tension et le courant d'un IGBT de l'AFE en régulation suivant des variations périodiques de la consigne de tension. On constate que les simulateurs fournissent des résultats à toutes fins pratiques identiques sur ce point.

Pour cette section, il est possible de constater que l'AFE remplit le critère de redresser le signal d'entrée avec un courant présentant un déphasage de près de  $0^\circ$  avec la tension. Cela peut être confirmé avec la figure 6.8 qui présente la phase entre le courant et la tension en régulation de tension. On vérifie la fréquence de commutation en prenant une transformée de fourrier de la tension ligne-ligne vue à l'entrée du redresseur. La figure 6.7 présente la tension ligne-ligne pour les 2 simulateurs.

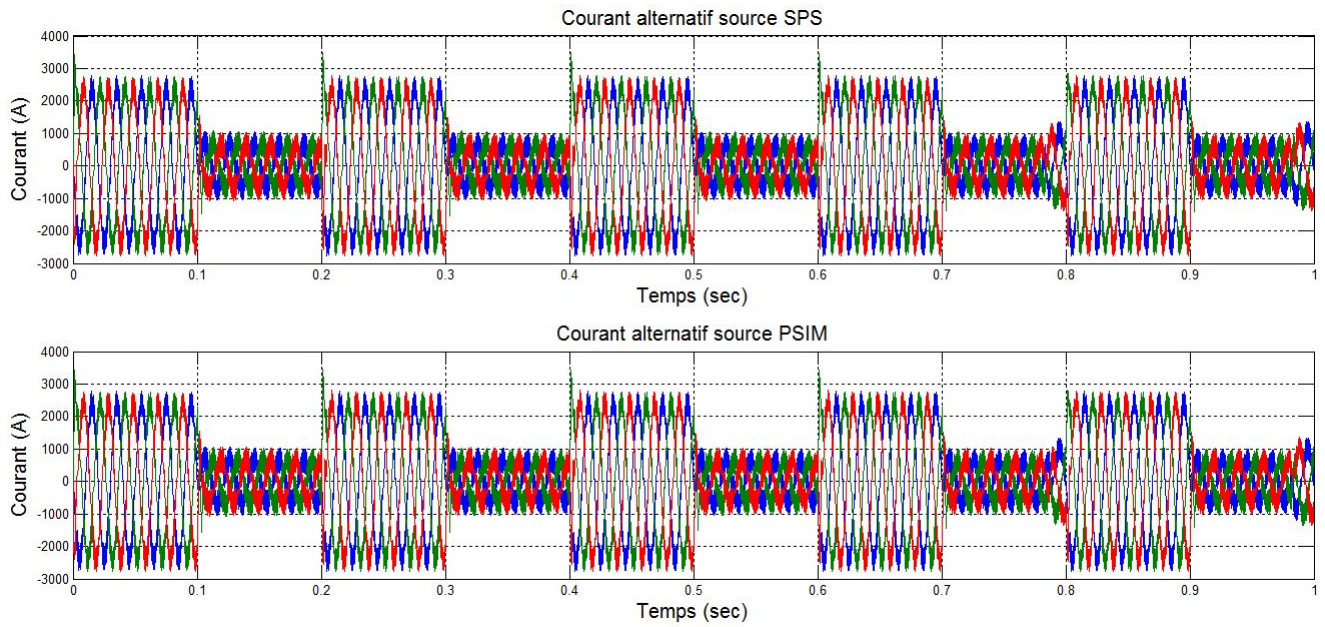


Figure 6.4 – Courant d'entrée à  $1\mu\text{s}$  pour l'AFE sur charge RC suivant des variations périodiques de la consigne de tension

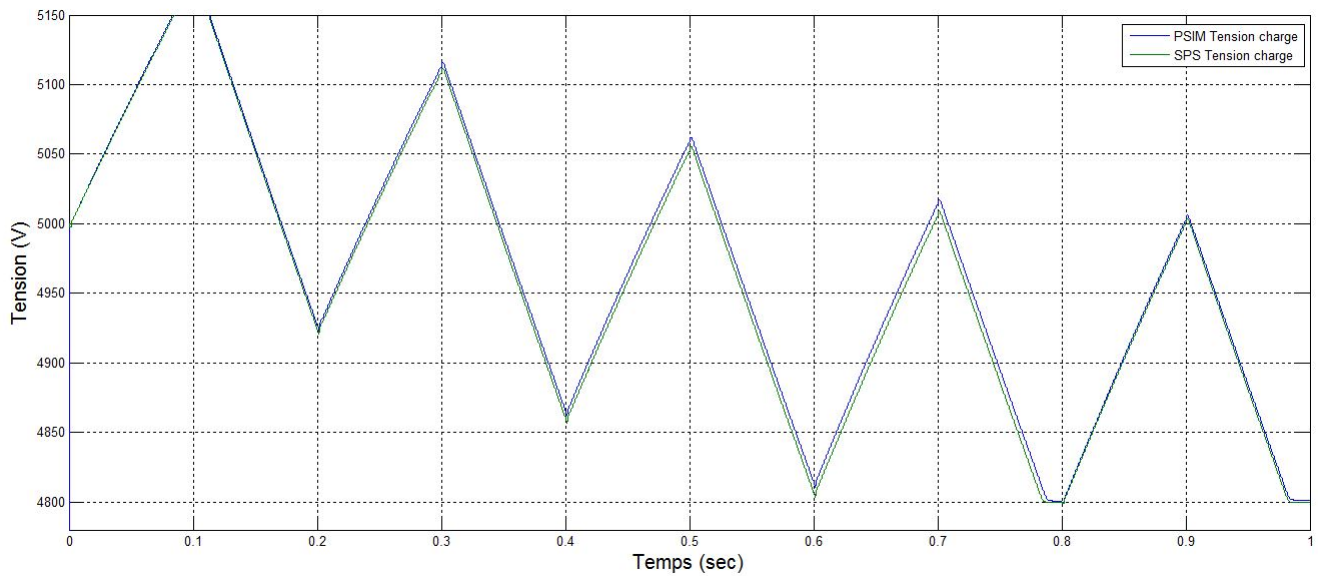


Figure 6.5 – Tension à la charge à  $1\mu\text{s}$  pour l'AFE sur charge RC suivant des variations périodiques de la consigne de tension

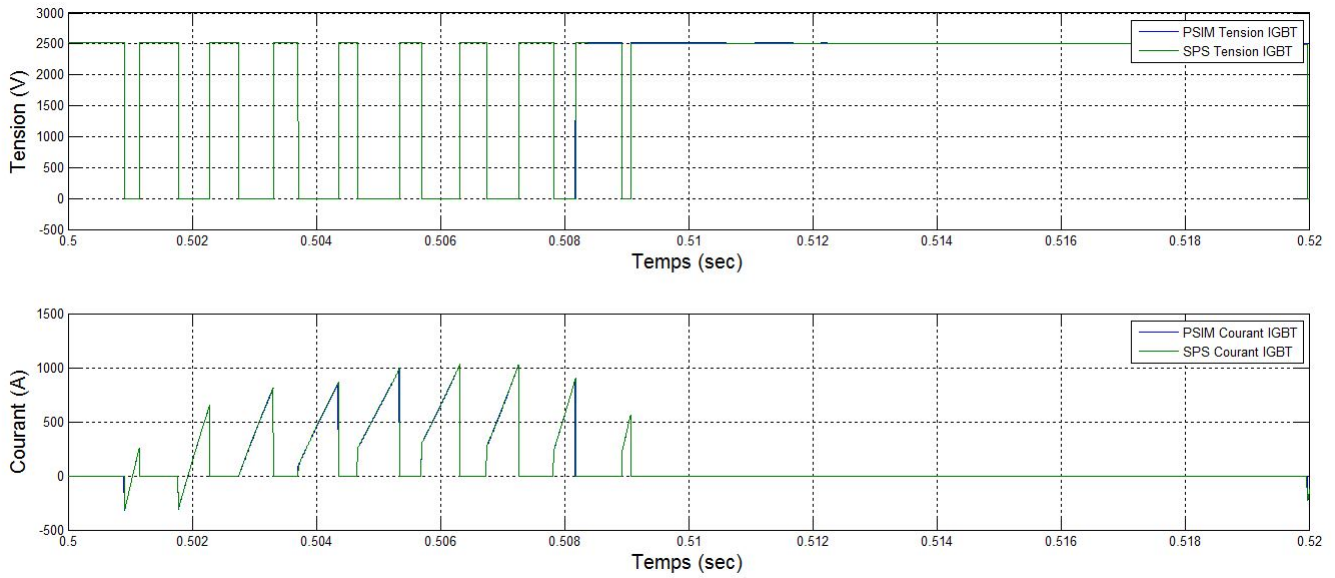


Figure 6.6 – Tension et le courant au bornes d'un IGBT à  $1\mu s$  pour l'AFE sur charge RC

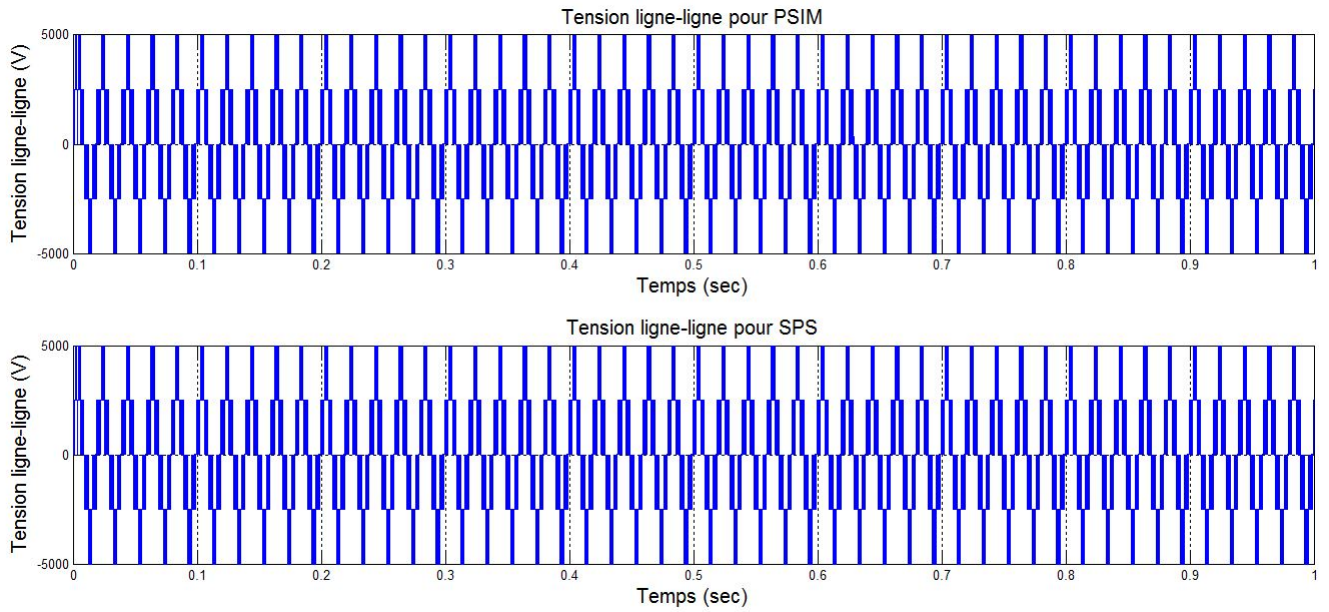


Figure 6.7 – Tension ligne-ligne à  $1\mu s$  pour l'AFE sur charge RC sans perturbation



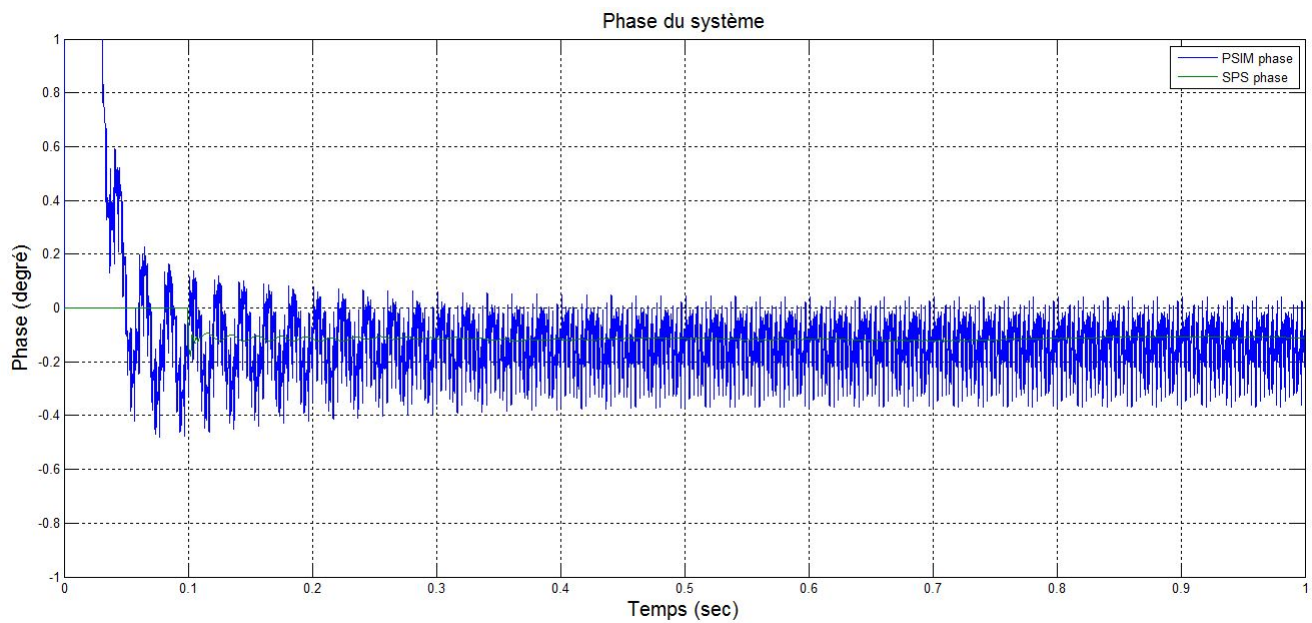


Figure 6.8 – Phase entre le courant et la tension à  $1\mu\text{s}$  pour l'AFE sur charge RC sans perturbation



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

Cette section présente le système intégré, soit l'AFE triphasé 3 niveaux NPC avec contrôle par MLI dont la charge est un convertisseur CC-CC formé de 2 cellules onduleur NPC triphasé à 3 niveaux avec une commande par MLI décalée. En ce qui attrait à l'AFE 3 niveaux, la figure 6.9 présente le courant d'entrée du redresseur en fonction du temps. On constate que les formes d'ondes entre SPS et PSIM sont pratiquement identiques et indissociables à l'oeil. La figure 6.10 présente la tension aux bornes de la charge pour un cycle complet sous SPS, PSIM et selon une courbe de référence extrapolée d'un document fourni par le CERN. La constante de charge du système est identique dans SPS et PSIM et la pente plus abrupte sur la courbe présentée par le CERN. La différence entre les tensions sur SPS et PSIM est au maximum de 50V en descente. On constate que le temps de charge du banc de condensateurs est de 0.28s pour PSIM et de 0.33s pour SPS. Le temps de charge du CERN est autour de 0.28s. L'erreur avec le CERN est autour de 200V, en plus d'une descente plus marquée. Par contre, étant donné que les réglages utilisés ont été réalisés de manière indépendante à ceux effectués au CERN et avec des méthodes totalement différentes, on considère que le système obtenu représente suffisamment bien celui du CERN pour fins de dimensionnement et d'analyse.

La figure 6.11 présente le courant à la charge lorsque la tension du bus DC est maintenue par un AFE 3 niveaux. On remarque que l'erreur en maintien est plus constatée et que les fréquences ne glissent pas. Cependant, il est possible de constater des perturbations de la forme d'onde sur PSIM, probablement causé par des ré-amorçages d'IGBT. Somme toute, les amplitudes des courants sur les 2 simulateurs sont identiques et l'ondulation de courant est maintenue inférieure à  $\pm 10A$ . Il est à noter que la précision obtenue au CERN est largement supérieure, mais que nous ne disposons pas de la même souplesse de réglage avec la méthode de régulation implantée. Les courants en montée et en descente ne présentent pas de différences notables et sont analogues à ceux obtenus sans l'AFE.

Pour ce qui est de maintenir une puissance maximale autour de 3.6MW et une puissance moyenne de 2.7MW sur un cycle, on constate au moyen de la figure 6.12 que cet objectif est rempli et que les réglages apportés limitent correctement la puissance à l'entrée. L'ondulation

est causée par la présence d'harmoniques dans le signal de courant. Il est à noter un décalage des résultats entre PSIM et SPS. La courbe de SPS étant en retard sur celle de PSIM. Par ailleurs, la puissance moyenne n'est pas exactement à 2.7MW, puisque la méthode de régulation employée dans la conception ne permet pas explicitement d'imposer la puissance de l'AFE en contrôle dynamique. La souplesse possible avec des contrôleurs PID simples ne permet pas d'atteindre cet objectif, il est essentiel d'utiliser une méthode de réglage comparable à celle du CERN pour y arriver.

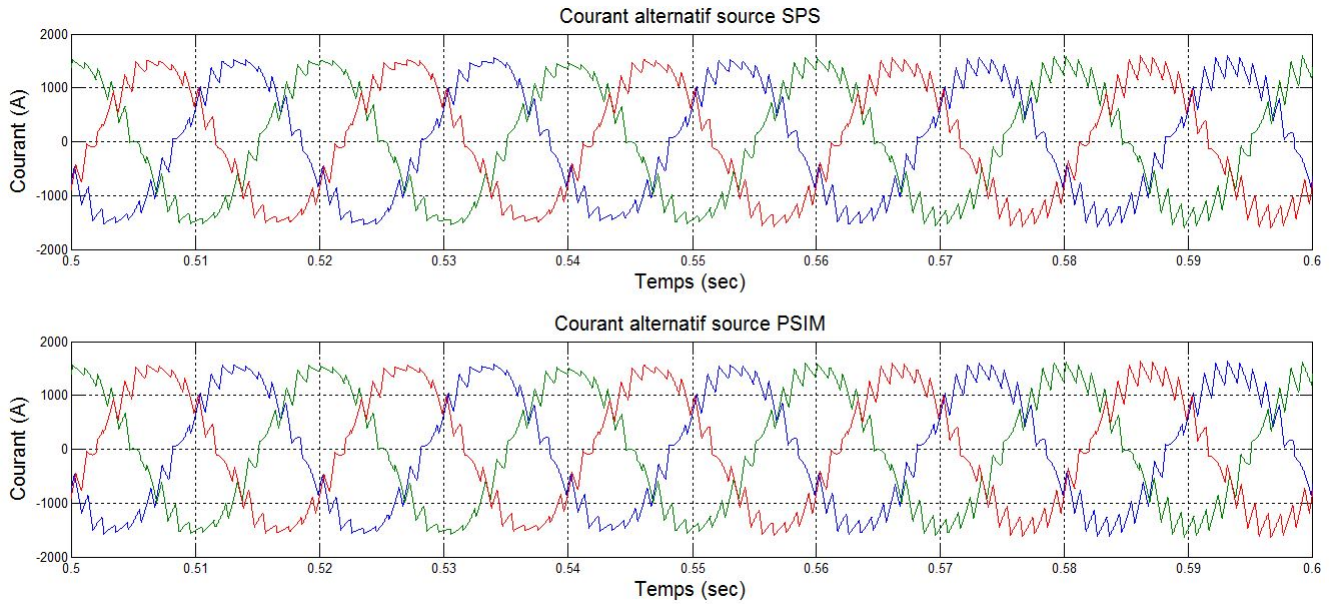


Figure 6.9 – Courant d'entrée de l'AFE pour un pas de calcul de  $1\mu s$

## 6.4 Comparatif des temps de simulation

Les temps de simulation de l'ensemble des sous-systèmes qui ont été implanté dans les simulateurs sur les 2 plateformes sont résumés au tableau 6.1. Ce tableau présente les temps totaux de simulation pour 2 ordinateurs munis de processeurs différents. L'objectif est de vérifier la complexité algorithmique relative des 2 plateformes de simulation. On note que les simulations de complexité croissante provoquent un impact plus marqué sur le temps de calcul sur PSIM que sur SPS.

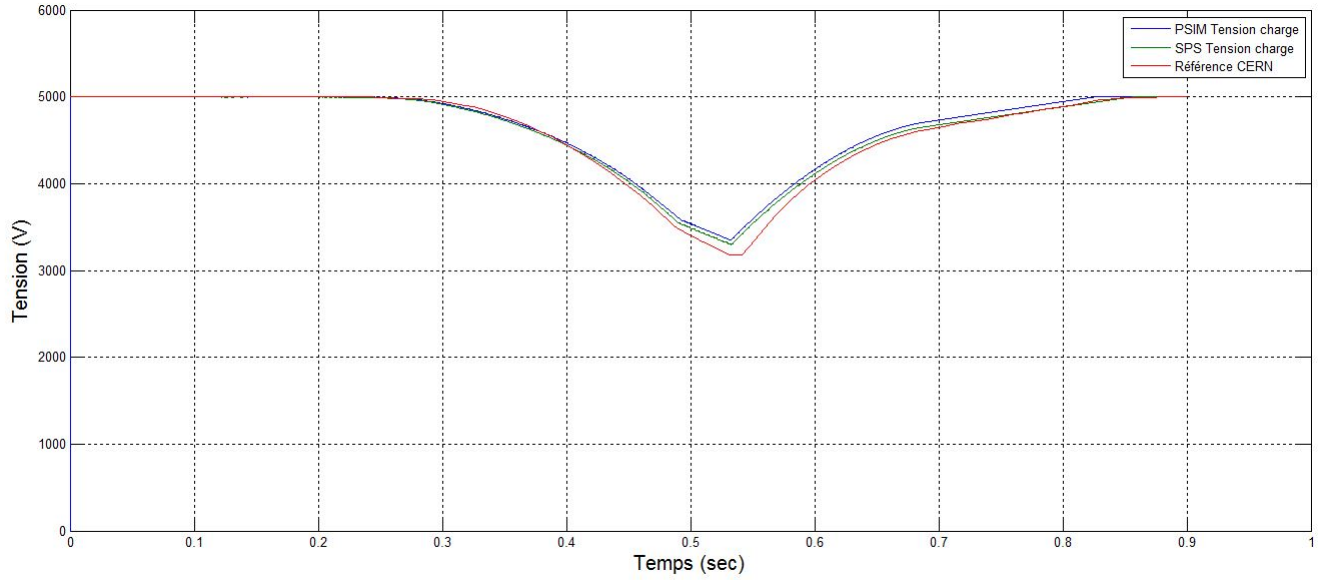


Figure 6.10 – Tension du bus CC pour un pas de calcul de  $1\mu s$

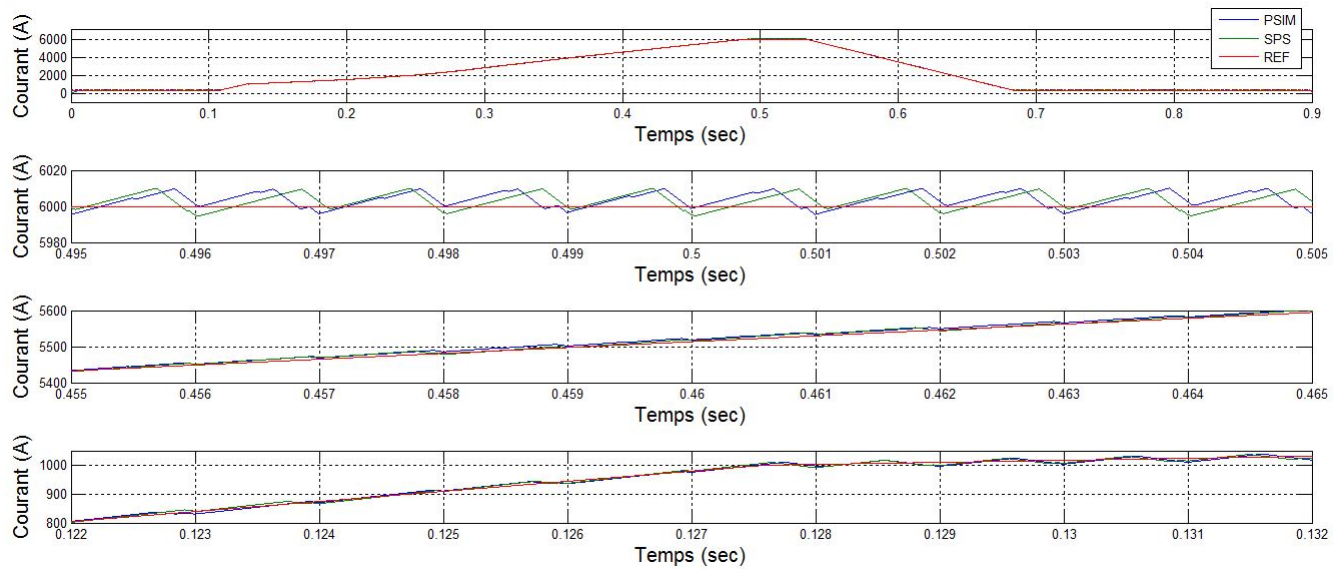


Figure 6.11 – Courant aux bornes des électroaimants pour un pas de calcul de  $1\mu s$

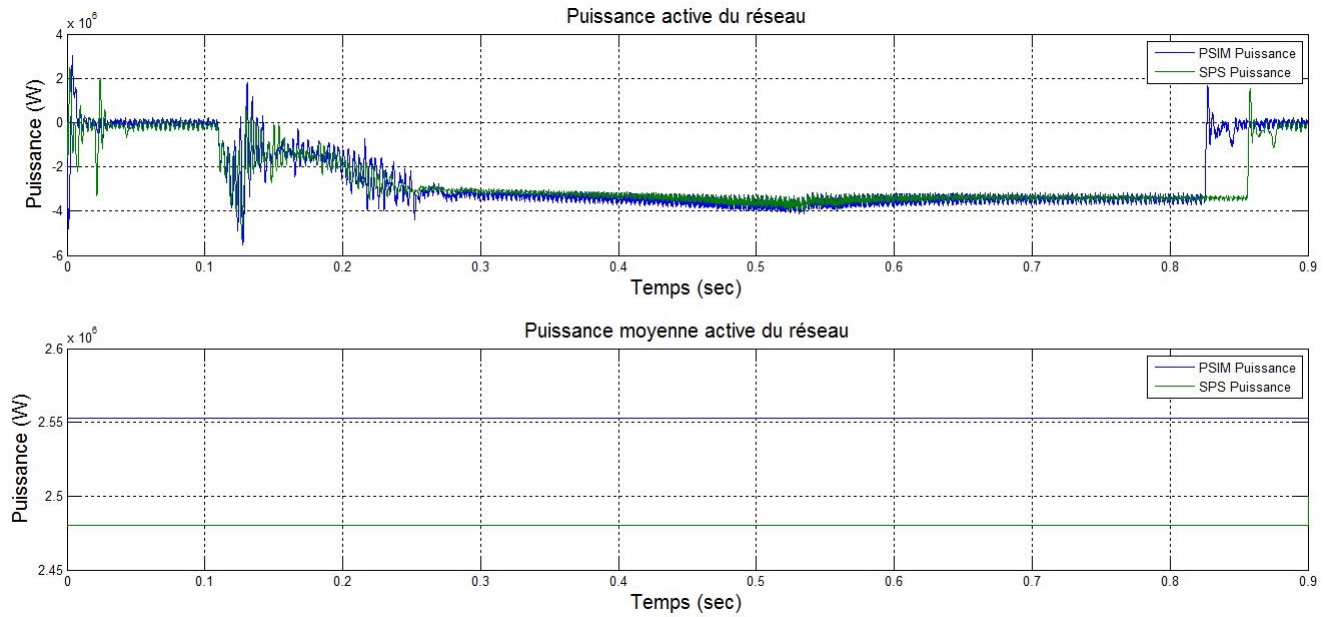


Figure 6.12 – Puissance délivrée par le réseau alternatif pour un pas de calcul de  $1\mu s$

Simulations	Intel Core 2 Duo T9900 3.06GHz		AMD FX-8350 4 GHz	
	SPS	PSIM	SPS	PSIM
AFE 3 LEVEL+DCP/DCN 0.9sec	22min	23min	5m 54s	7m 23s
AFE 2 LEVEL + HACHEUR 0.9sec	5min	5min	3m 08s	1m 28s
AFE 3 LEVEL PWM 1sec	9min	5min	4m 11s	1m 41s
AFE 2 LEVEL HYSTERESIS 1sec	7min	4min	2m 33s	1m 19s
AFE 2 LEVEL IDEAL 1sec	8min	6min	2m 49s	2m 5s
DCP/DCN 0.9sec	5min	5min	2m 48s	1m 41s
HACHEUR 4 QUADRANTS 0.9sec	3min	1min	1m 20s	16s

Tableau 6.1 – Résumé des temps de simulations sur 2 ordinateurs munis de processeurs différents

# MATRICE DE VÉRIFICATION DES PERFORMANCES

Ce chapitre présente les performances réelles obtenues au moyen des simulations présentées dans ce rapport. Cette matrice permet de valider l'atteinte des critères présentés dans le cahier des charges. Il est à noter que les simulations n'ont pas toutes été implantées dans le simulateur d'OPAL-RT, pour des raisons de livraison et d'installation.

Niveau	Sous-niveau	Méthode de vérification	Méthode d'analyse	Spécification	Performance	Marge	Commentaires
Phase 1: Modélisation convertisseur 4 quadrants de base	Commander un convertisseur CC-CC à 4 quadrants	Test sur 3 plateformes	Comparaison du courant dans la charge par rapport au courant de référence	$\Delta \leq 25A$	$\pm 10A$		Superposition du courant à la charge sur SPS et PSIM, amplitude et fréquence
	Accepter des paramètres de modélisation	Test sur SPS et PSIM	Injecter un paramètre de modélisation et vérifier que la variation a lieu		La variation demandée se produit		Des changements ne compromettant pas la stabilité du système ont été testés
Phase 2: Alimentation des électroaimants avec une forme de courant précise au moyen d'un convertisseur CC-CC formé de 2 cellules NPC 3 niveaux	Commander un onduleur triphasé de type NPC	Test en boucle ouverte et en boucle fermée	Comparaison du courant dans la charge par rapport au courant de référence	$\Delta \leq 25A$	$\pm 10A$		
	Alimenter les électroaimants de l'accélérateur de particules	Test en boucle fermée du système avec charge RL équivalente	Comparaison du courant dans la charge par rapport au courant de référence et comparaison de la tension moyenne avec courbe de référence	$\Delta \leq 25A$	$\pm 15A$	$\pm 10A$	
	Afficher des résultats de simulation personnalisés	Test	Oui/Non le critère est-il rempli?		Oui		
Phase 3: Redresser le signal d'entrée avec un redresseur actif et régler le facteur de puissance vu à l'entrée	Charger un banc de condensateur	Test sur SPS et Psim	Courbe de charge stable avec temps de charge minimal	$t_{s2s}$ , $P_{max} \leq 3.6MW$ , $P_{moy} \leq 2.7MW$	$t=0.31s$ , $P_{moy} = 2.55MW$ et $P_{max}=3.62MW$ pour PSIM, $P_{moy}=2.48MW$ et $P_{max}=3.56MW$ pour SPS	$\Delta t = 1.69s$ , $\Delta P_{moy} = -0.15MW$ , $\Delta P_{max} = -0.04MW$	Temps de recharge de 0.31s calculé à partir du point bas de la tension du bus CC (variation de 1700V)
	Redresser le signal d'entrée à la sortie du transformateur	Test sur SPS et Psim	Vérification angle de charge par rapport à l'angle de charge imposé, Vérification de la tension moyenne à la charge par rapport à celle imposée en régime permanent	$\Delta V_{max} \leq 50V$ , $\Delta \phi \leq 2^\circ$	$\Delta V_{max} = 0.2$ , $\Delta \phi = 0.3$	49.8V, 1.7°	
Phase 4: Outil de dimensionnement	Accepter des paramètres de dimensionnement usuels	Test sur Excel	Oui/Non le critère est-il rempli?		Oui		
	Fournir les paramètres de modélisation utilisés par le simulateur	Test sur Excel	Oui/Non le critère est-il rempli?		Oui		
Phase 5: Documentation technique	Présenter les procédures de validation croisées de chacun des simulateurs	Test de la méthode sur les plateformes	Oui/Non le critère est-il rempli?		Oui		
	Présenter l'utilisation de chacun des simulateurs	Test de la méthode sur les plateformes	Oui/Non le critère est-il rempli?		Oui		
	Présenter les modèles mathématiques utilisés dans chacun des simulateurs	Test sur les plateformes	Oui/Non le critère est-il rempli?		Oui		

Figure 7.1 – Matrice de vérification des performances

---

# CONCLUSION

---

En somme, le projet portant sur la simulation d'un accélérateurs de particules fut un succès. Le cahier des charges du client au niveau de la dynamique des simulateurs a été respecté. L'outil de dimensionnement livré permet de faire varier les paramètres dans les simulations et de les lancer. Les simulations sont représentatives du comportement observé au CERN, si l'on se réfère aux courbes qui ont été fournies par le client. Le guide de l'utilisateur et la documentation technique associés aux livrables du projet sont présentés en annexe. Ils permettent de compléter le cahier des charges. La section portant sur le simulateur temps réel n'est pas complète suivant des retards dans la livraison et l'installation des simulateurs. Cependant, il a été possible de documenter l'installation et l'utilisation, ce qui pour le client était le plus important. Pour ce qui est des avancées possible dans le projet, il est évident que l'intégration du convertisseur « Trim » présenté à la figure 8.1 doit être réalisée. Ce convertisseur permet l'emploi d'inductances de couplage de plus grande impédance et donc une ondulation moins élevée du courant de sortie. De plus, les contrôles utilisés dans le projet sont des contrôles classiques fait de régulateurs PID. Les régulateurs employés au CERN sont des régulateurs RST qui sont réalisés exclusivement dans un modèle discret. Ils permettent une souplesse de réglage supérieure ainsi qu'une optimisation des paramètres des réglages.

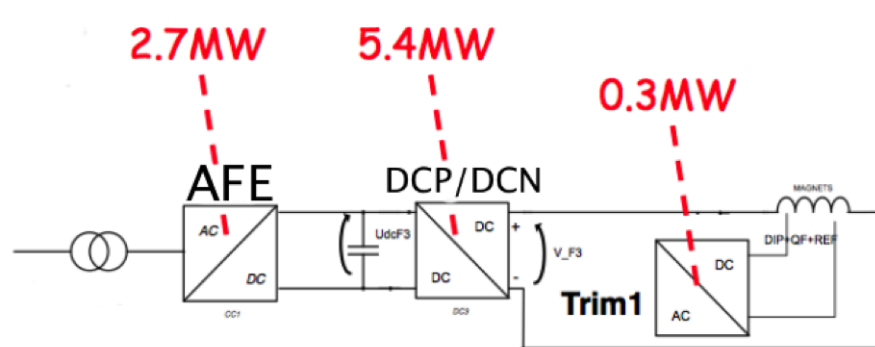


Figure 8.1 – Schéma bloc de la chaîne de convertisseurs alimentant les électroaimants du CERN