

Simulation d'une alimentation des électroaimants d'un accélérateur de particules. (RAE)

Par l'équipe Électrosim

Contexte et problématique

Clients du projet



- ▶ Le CERN est un laboratoire de recherche multidisciplinaire sur la physique fondamentale
 - ▶ Le CERN est situé en Suisse (Genève)
 - ▶ Le laboratoire est constitué d'une chaîne complexe d'accélérateurs de particules
- ▶ Le LEEPCI est un laboratoire de recherche de l'université Laval et se concentre sur la
 - ▶ simulation de réseaux électriques;
 - ▶ modélisation et conception de machines électriques;
 - ▶ modélisation et conception de convertisseurs d'électronique de puissance.
- ▶ OPAL-RT est une compagnie spécialisée dans la développement de simulateurs temps réel PC/FPGA

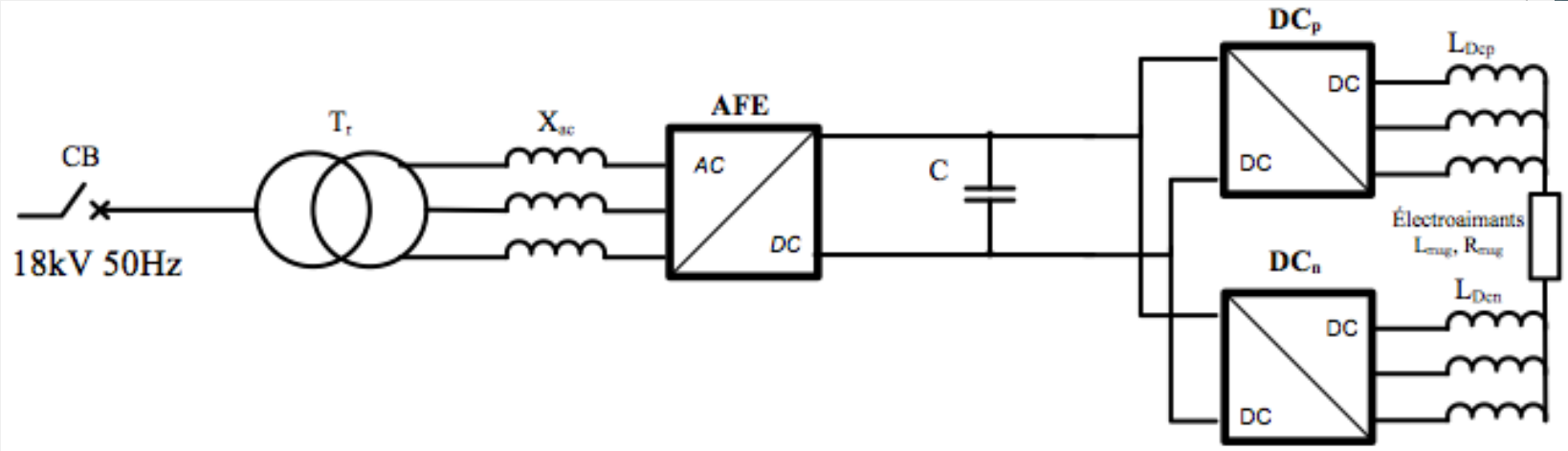
Rappel des objectifs

- ▶ Livrer 3 outils de dimensionnement (interrupteurs et régulateurs)
 - ▶ Chaque outil doit être convivial et facile d'emploi
 - ▶ Ils permettent de valider modèles et méthodes de simulation employés sur 3 plateformes (SPS, PSIM, OPAL-RT)
- ▶ Livrer un simulateur sur 3 plateformes
 - ▶ Les 3 simulateurs doivent remplir les fonctionnalités attendues (exemple: alimenter la charge avec une forme de courant trapézoïdale présentant une faible ondulation)
 - ▶ Plateformes: Matlab (SPS), PSIM, Opal-RT (OPA500)
- ▶ Livrer une documentation technique de référence décrivant l'utilisation de chacun des simulateurs ainsi que les modèles mathématiques utilisés.
- ▶ Implanter une validation croisée des 3 simulateurs

Rappel de la méthodologie

1. Modéliser et segmenter l'alimentation complète en sous-systèmes (approche cours de « Design »)
 1. Modéliser le redresseur NPC 3 niveaux par un redresseur actif triphasé (AFE)
 - ~~2. Modéliser hacheur 4 quadrants simplifié à 4 interrupteurs (préliminaire) (26/02/14)~~
 3. Modéliser hacheur 4 quadrants avec 2 cellules NPC 3 niveaux à commande entrelacée
2. Implanter et simuler indépendamment les sous-systèmes en boucle ouverte puis en boucle fermée avec régulateurs
 1. Modélisation simplifiée charge de l'AFE / banc de condensateurs et charge résistive équivalente au hacheur 4 quadrants alimentant électroaimants
 - ~~2. Modélisation simplifiée entrée hacheur 4 quadrants à 4 interrupteurs / bus CC 5KV parfait (26/02/14)~~
 3. Modélisation simplifiée entrée hacheur 4 quadrants à **cellules NPC** / bus CC 5KV parfait
 4. Valider le fonctionnement des sous-systèmes indépendants sur 3 plateformes
3. Assembler les différents sous-systèmes sous 3 plateformes.
 1. Valider les fonctionnalités des systèmes reliés.
 2. Valider la concordance des résultats de simulations sous 3 plateformes.

Système complet



- AFE « Active Front End »
 - Redresseur triphasé 3 niveaux NPC
 - Permet de charger le banc de condensateurs et de maintenir la tension du bus CC
 - Permet de réguler le facteur de puissance côté réseau (régulation d'angle)
 - Permet de réguler le courant côté réseau (régulation de l'amplitude du courant)
- DC_p DC_n
 - Hacheur 4 quadrants formé par l'association de 2 cellules onduleur NPC 3 niveaux triphasées
 - Permet de fournir une forme de courant précise aux électroaimants
 - Fonctionne dans les 4 quadrants (peut redonner de la puissance au banc de condensateur selon la tension appliquée sur les électroaimants)

AFE (modèle 2 niveaux sur charge idéale)

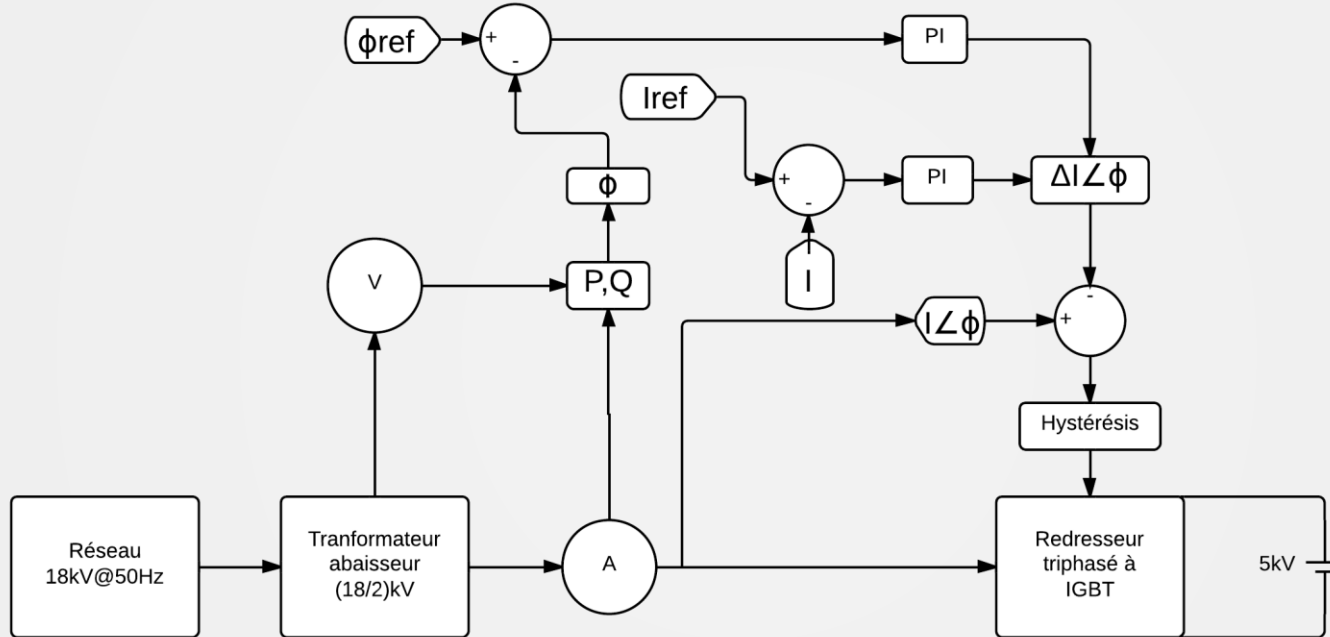
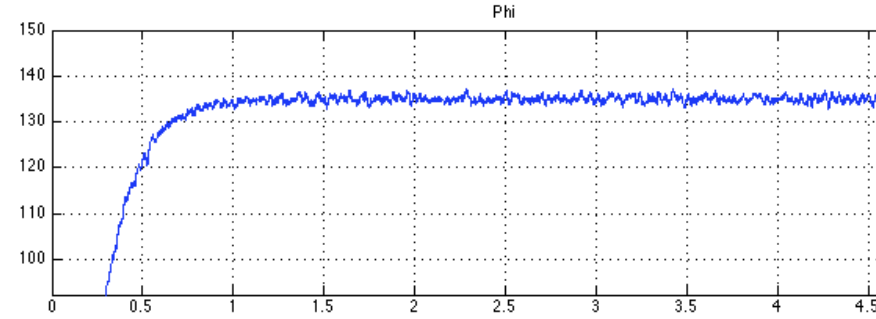
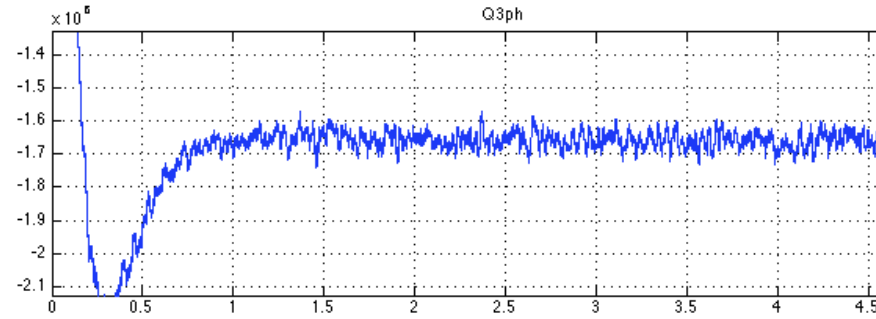
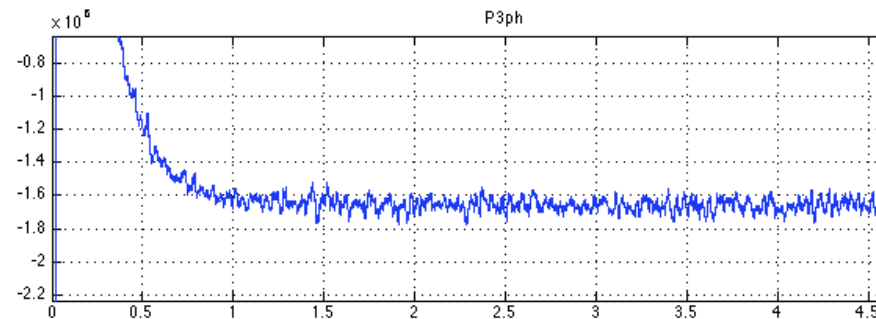
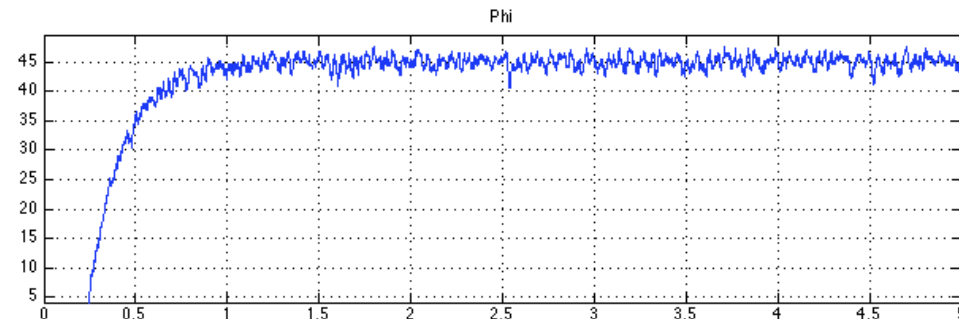
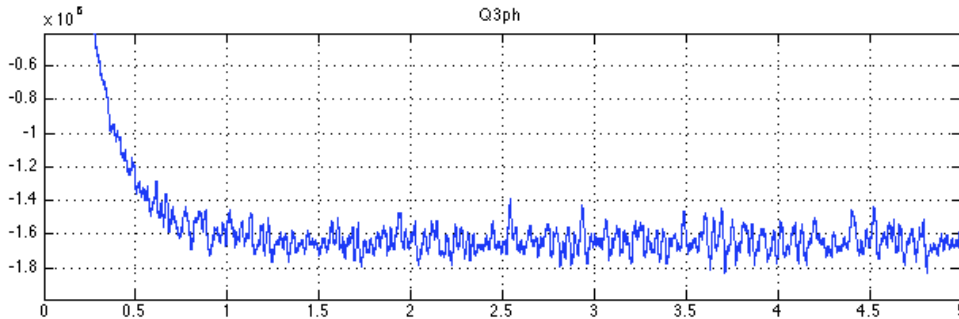
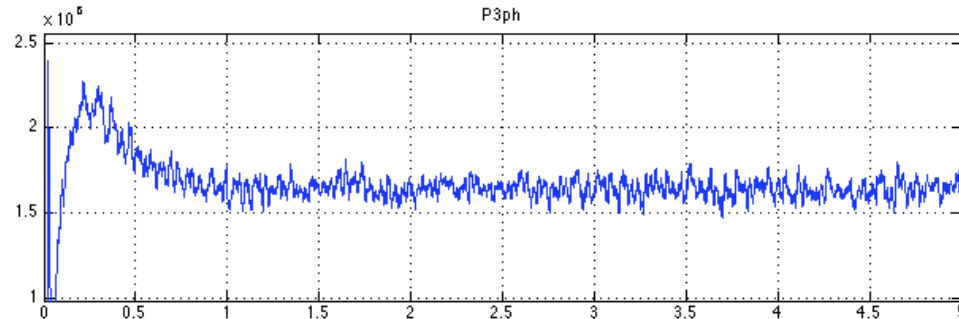


Schéma bloc de l'AFE 2 niveaux sur charge idéale, régulation de courant (amplitude et phase) par hystérésis

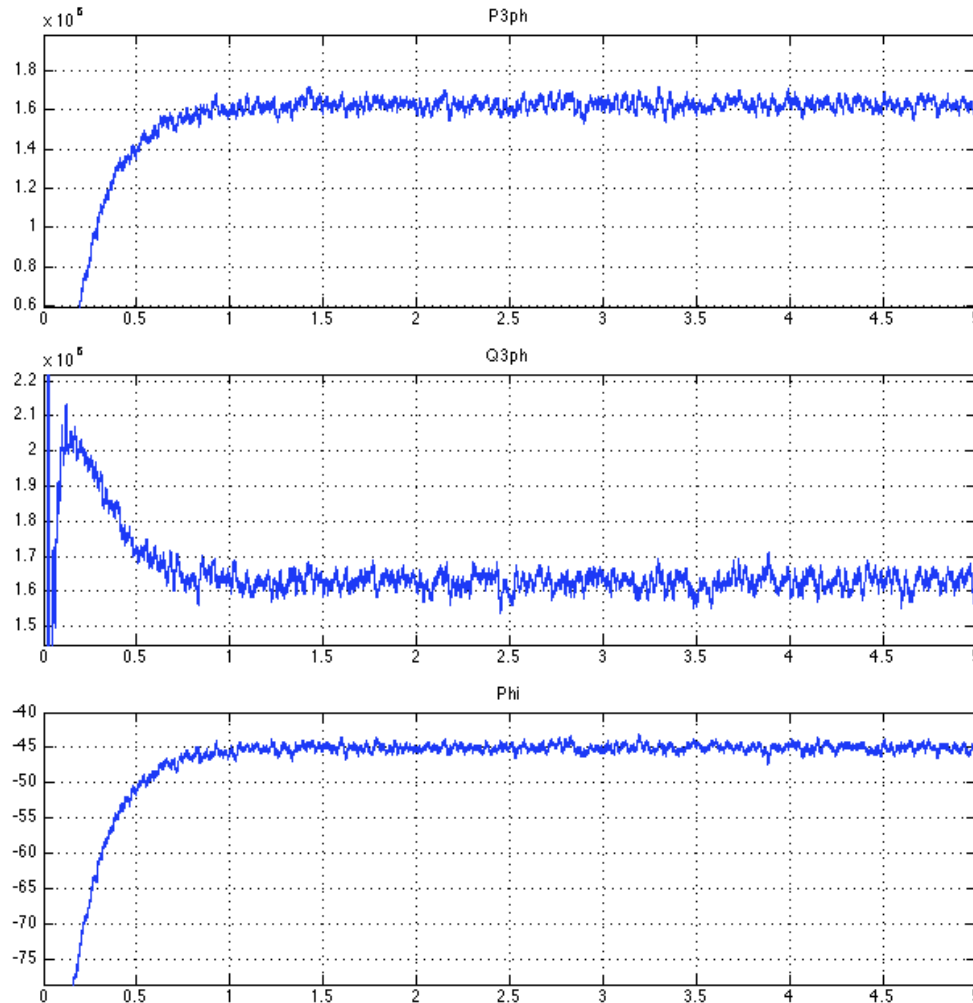
Régulation de courant permettant d'imposer le facteur de puissance et la puissance apparente (fonctionnement 4 quadrants)



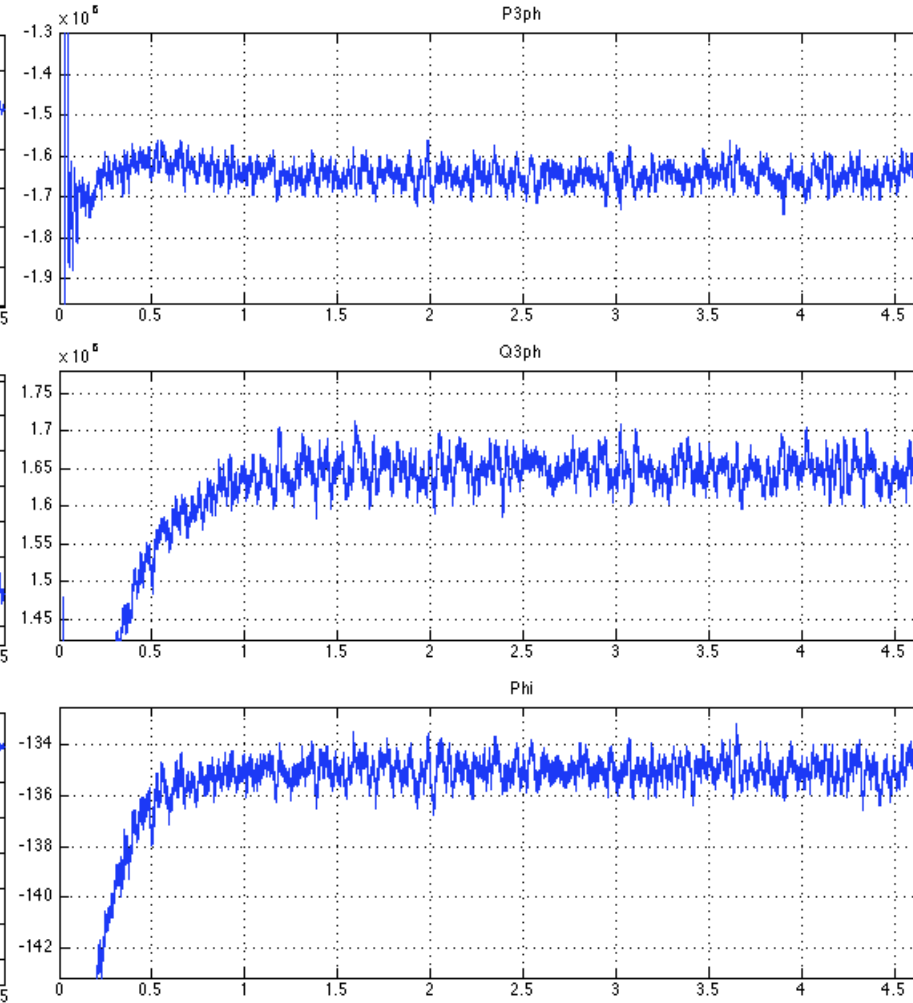
$$\phi = 45^\circ$$

$$\phi = 135^\circ$$

Régulation de courant permettant d'imposer le facteur de puissance et la puissance apparente (fonctionnement 4 quadrants)

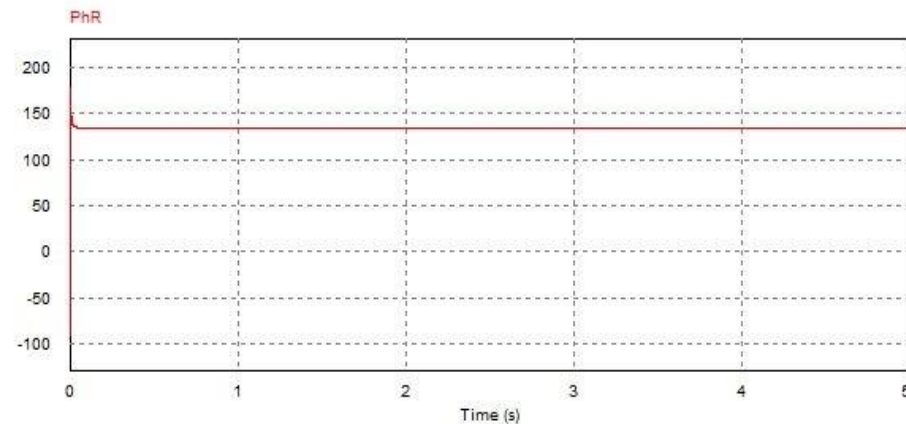
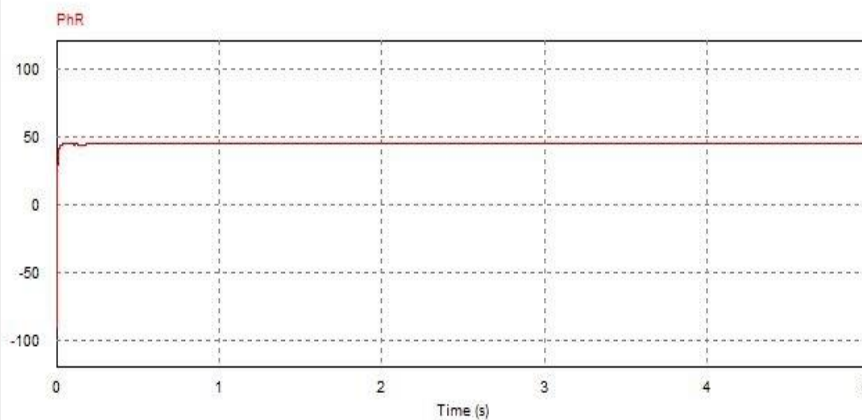
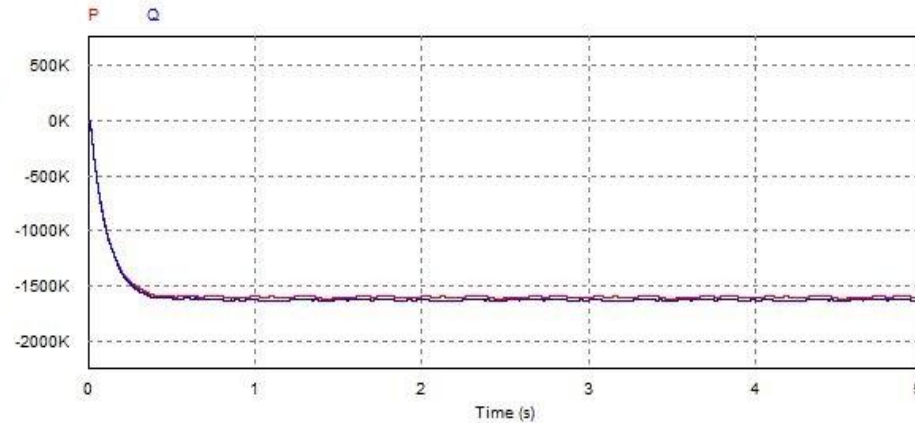
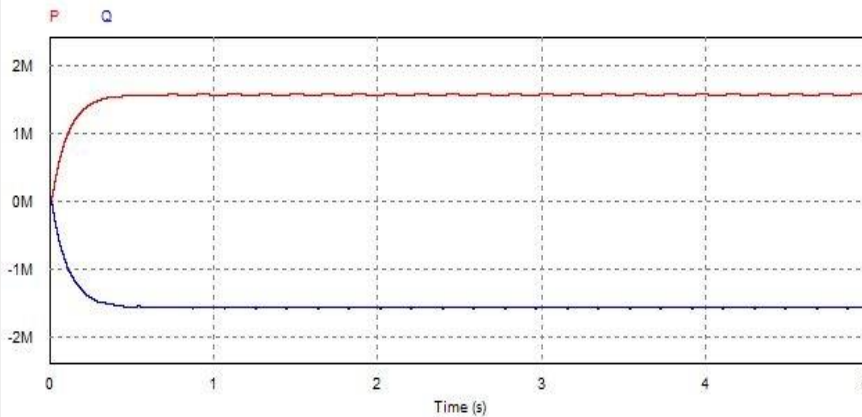


$$\phi = -45^\circ$$



$$\phi = -135^\circ$$

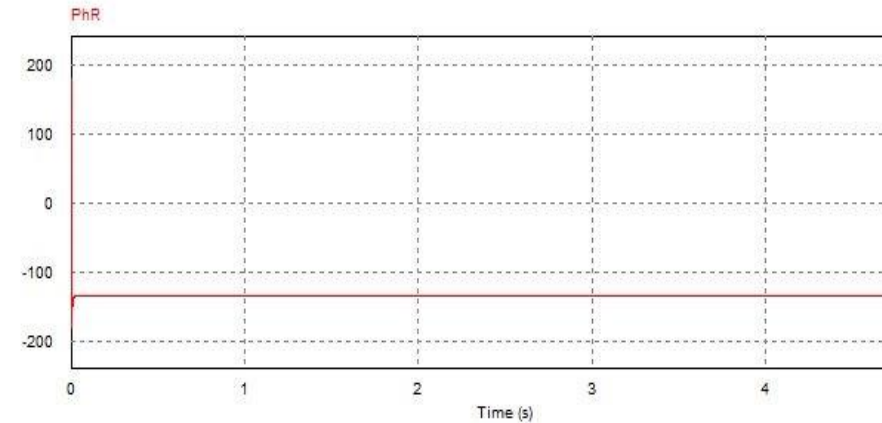
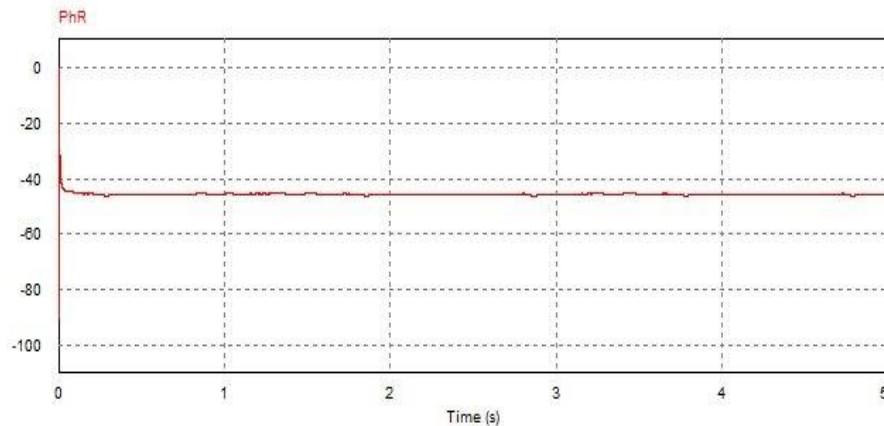
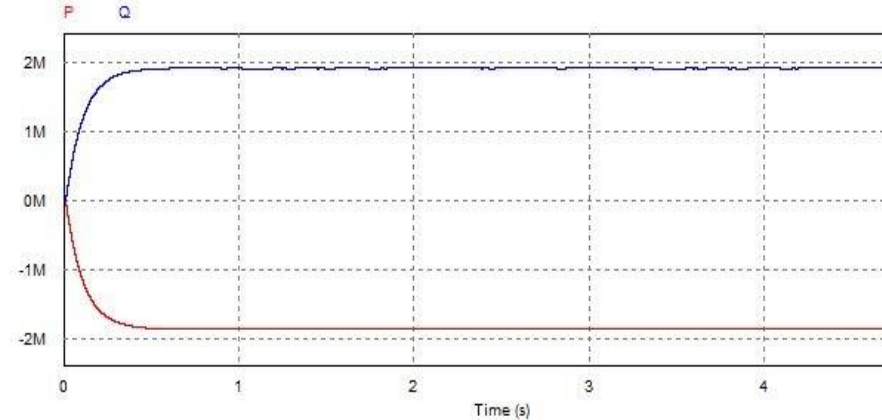
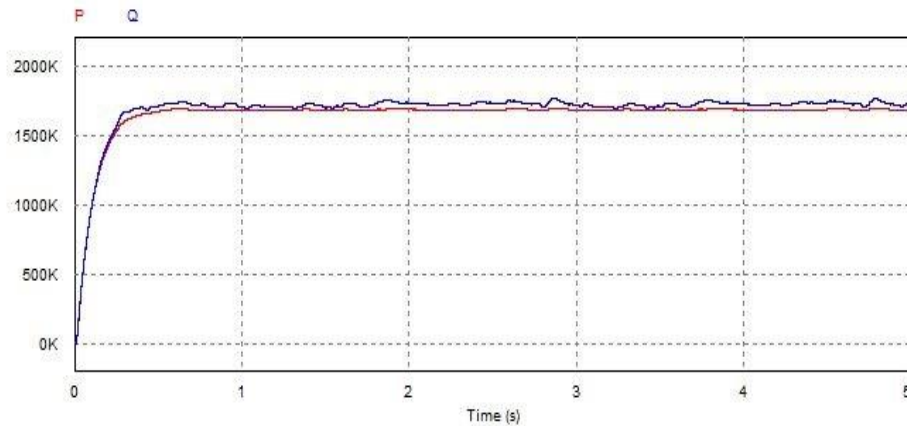
Régulation de courant permettant d'imposer le facteur de puissance et la puissance apparente (fonctionnement 4 quadrants Psim)



$$\phi = 45^\circ$$

$$\phi = 135^\circ$$

Régulation de courant permettant d'imposer le facteur de puissance et la puissance apparente (fonctionnement 4 quadrants Psim)



$$\phi = -45^\circ$$

$$\phi = -135$$

AFE (modèle 3 niveaux sur charge non-idéale)

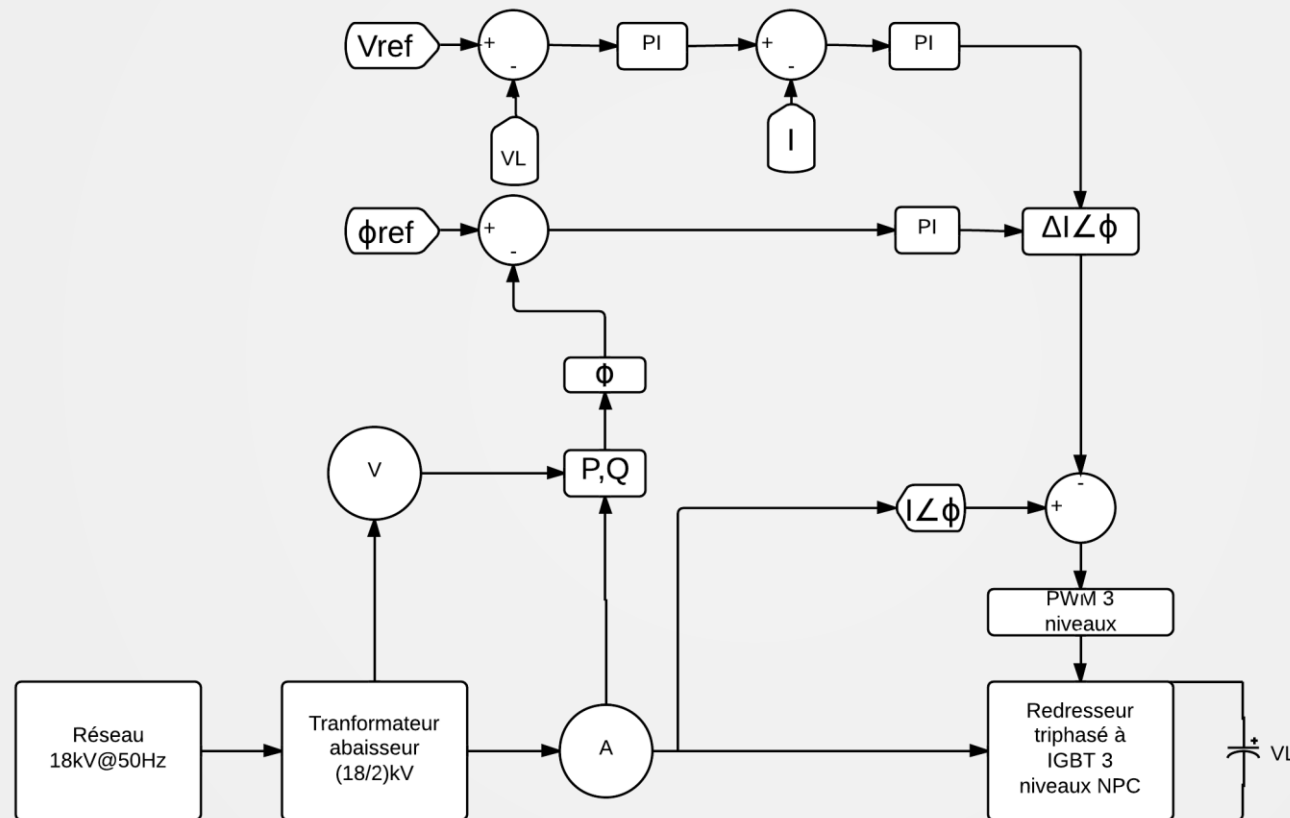
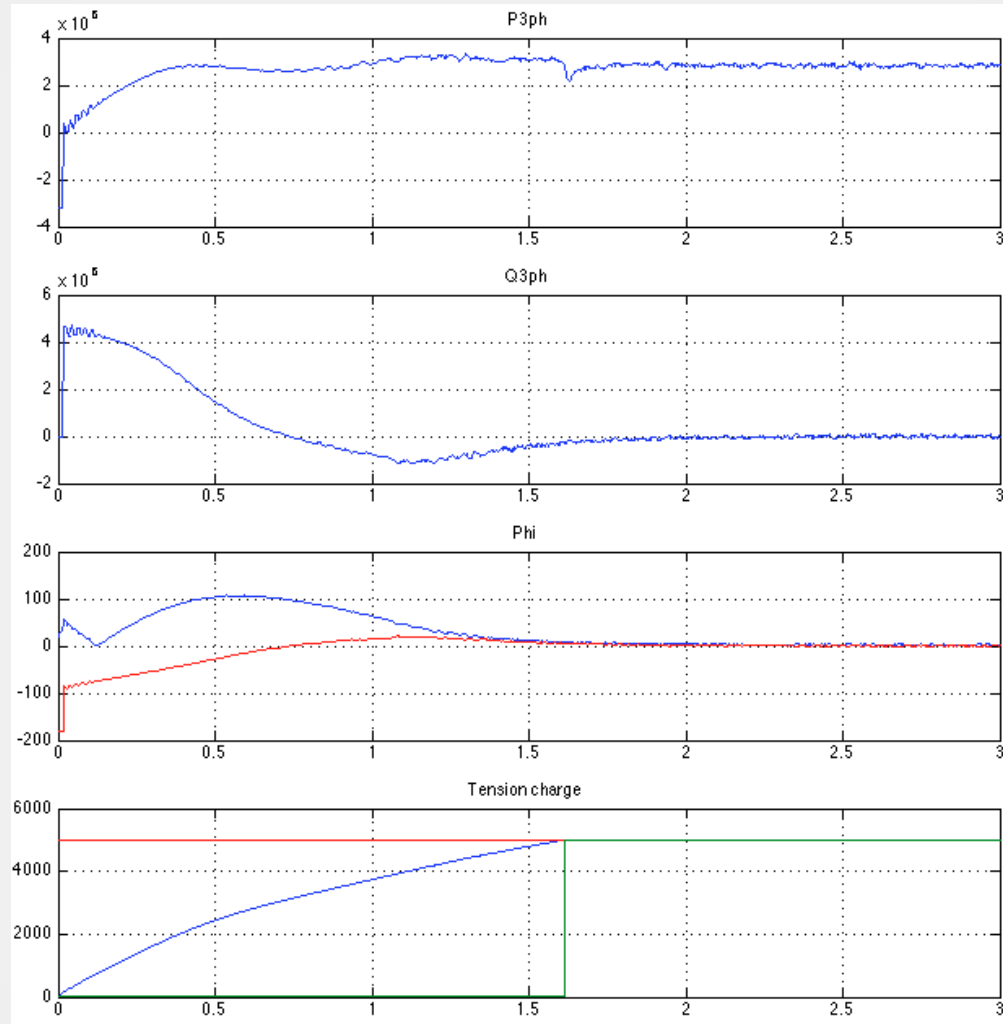


Schéma bloc de l'AFE 3 niveaux sur charge non-idéale, régulation de tension de la charge, régulation du courant d'entrée (amplitude et phase) avec MLI

Charge d'un banc de condensateur et régulation sur charge RC



Charge d'un banc de condensateur et alimentation d'un charge constante avec un AFE 3 niveaux avec régulation de tension de la charge, régulation du courant d'entrée (amplitude et phase) avec MLI (avec $FP = 1$)

DCP/DCN 3 niveaux NPC avec source idéale

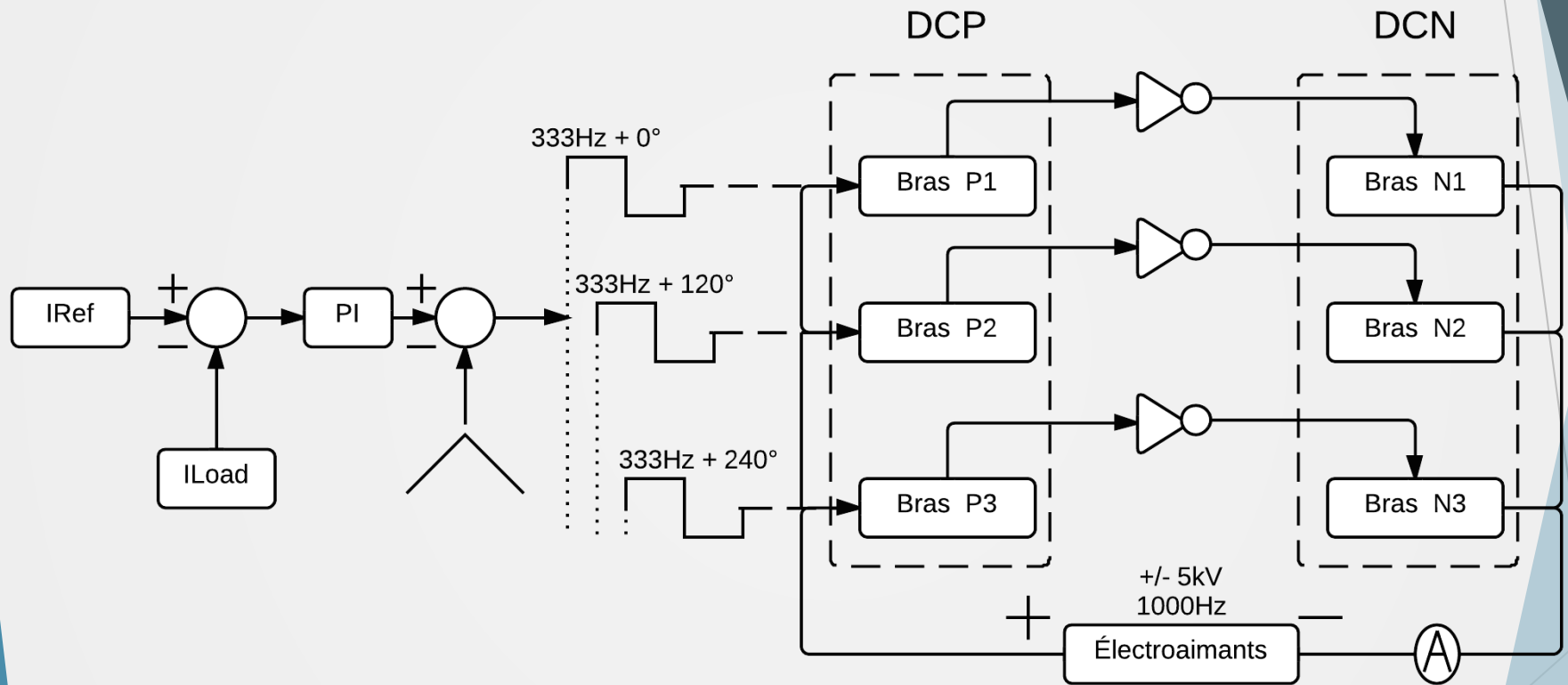
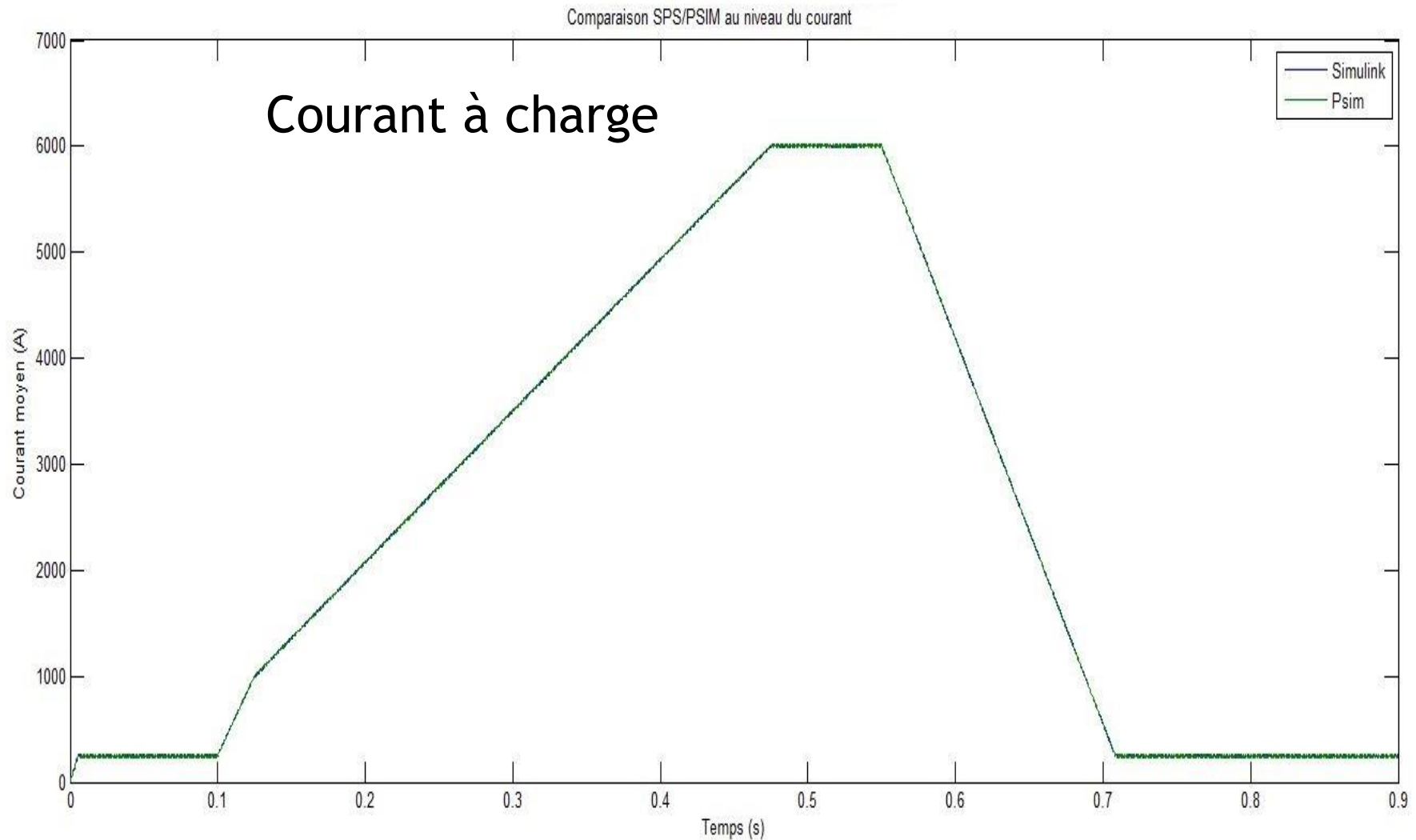
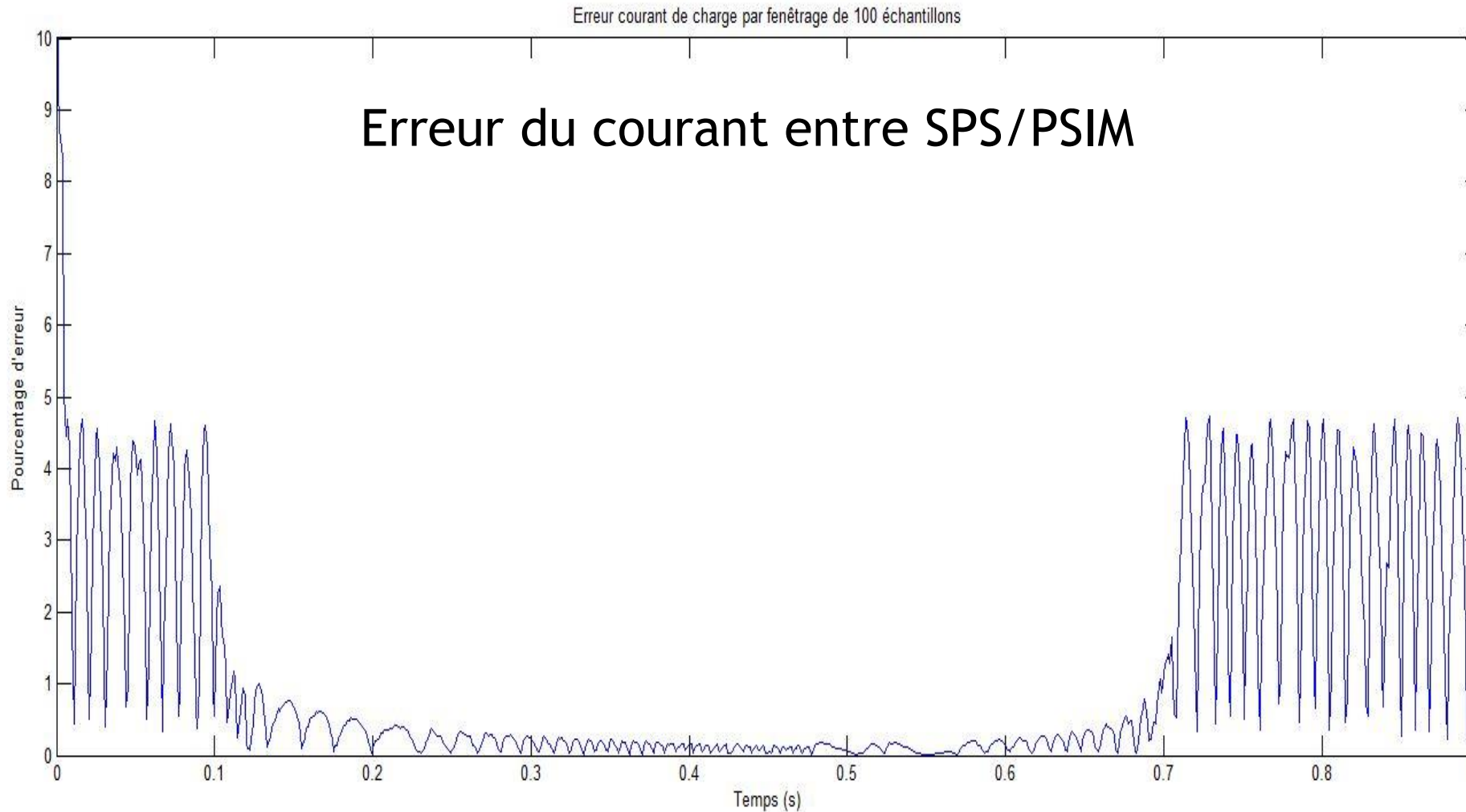


Schéma bloc du DCP/DCN 3 niveaux avec source idéale avec une régulation de courant MLI à la charge

DC_P/DC_N : Alimenter les électroaimants de l'accélérateur de particules avec une forme de courant précise (cross-validé Psim et SPS)

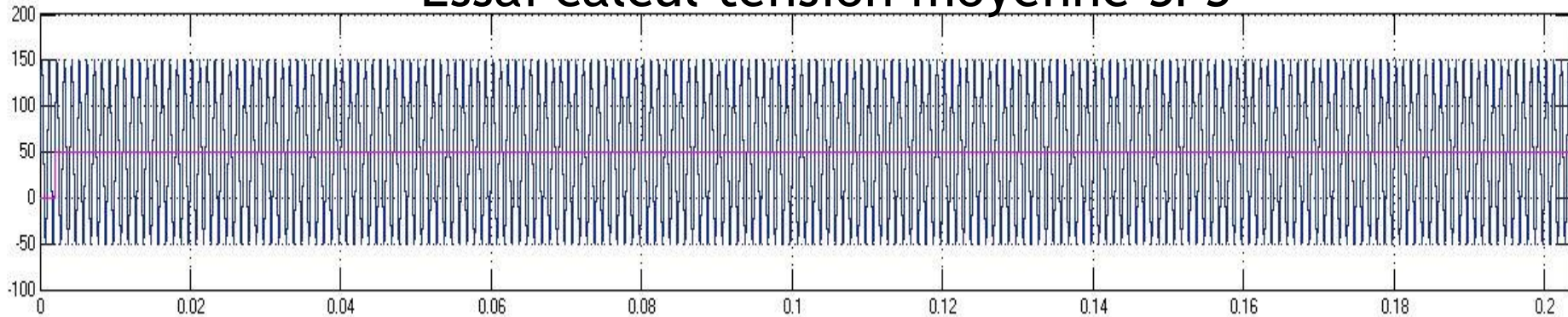


DC_P/DC_N : Alimenter les électroaimants de l'accélérateur de particules avec une forme de courant (cross-validé Psim et SPS)

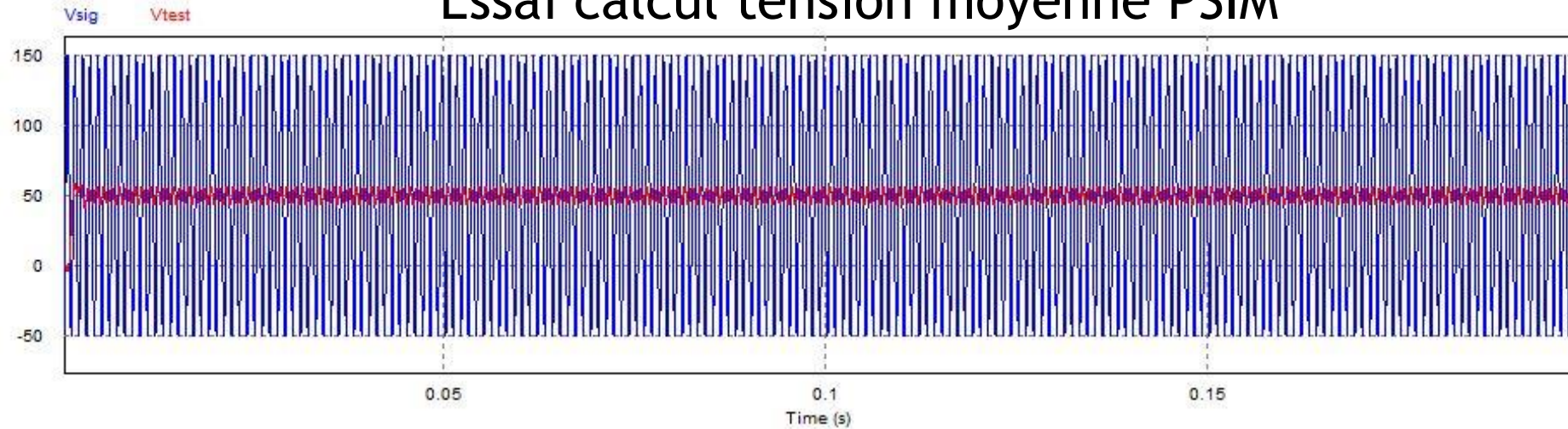


DC_P/DC_N : Calcul de tension moyenne (cross- validé Psim et SPS)

Essai calcul tension moyenne SPS

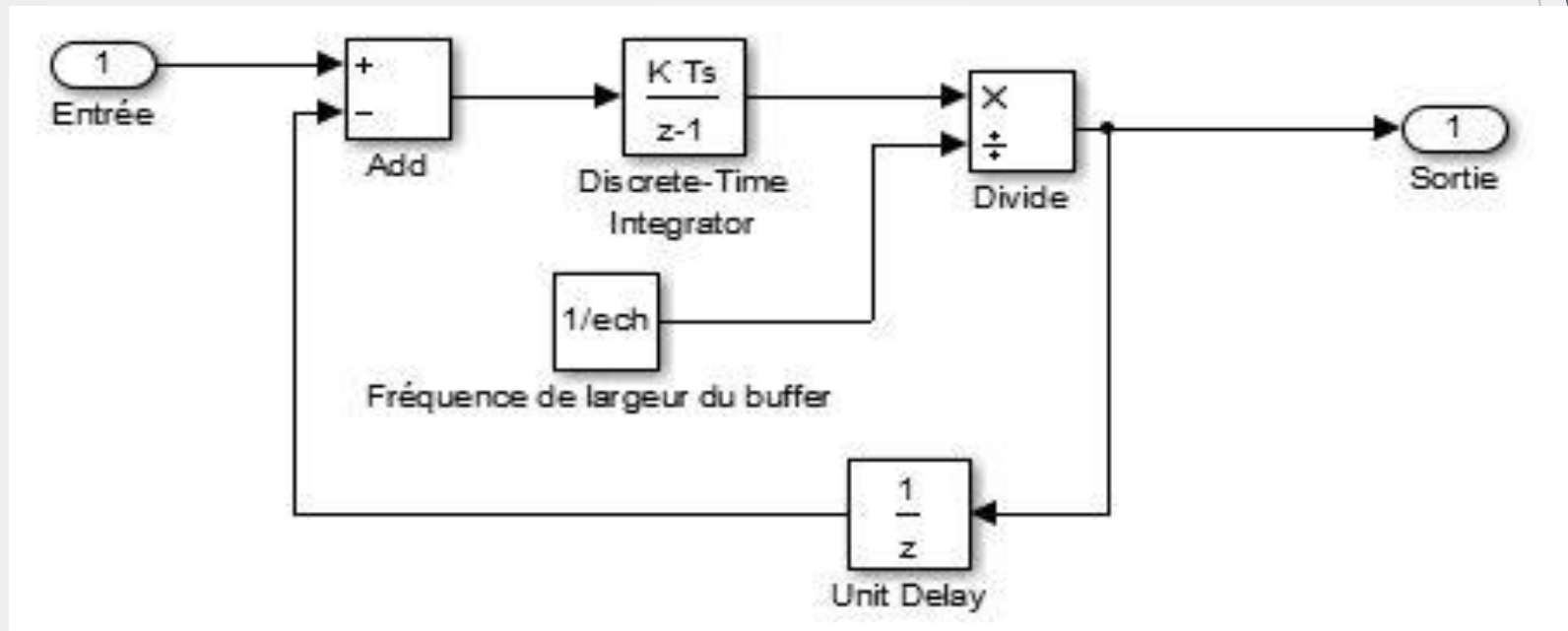


Essai calcul tension moyenne PSIM



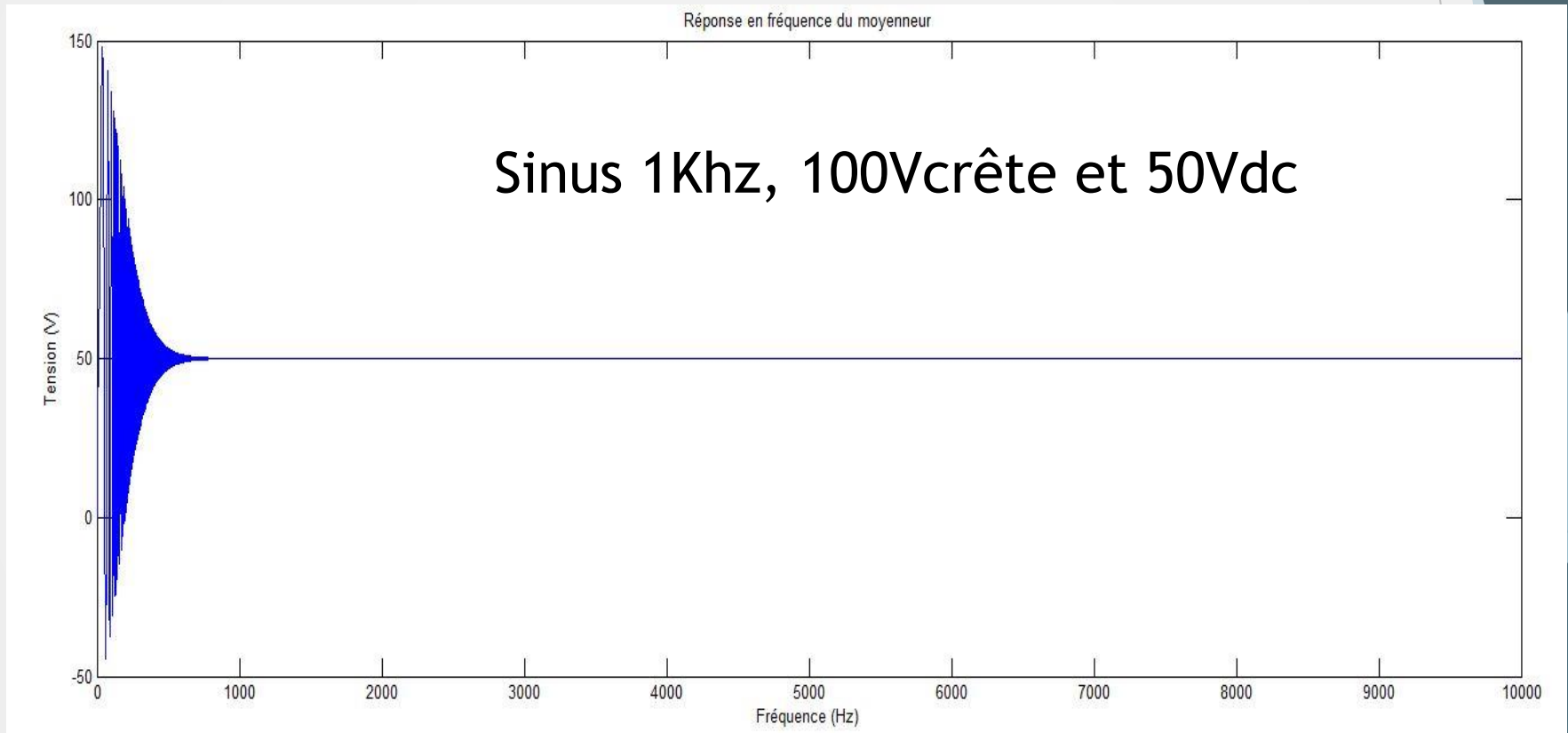
Essais effectués sur un sinus 1Khz, 100Vcrête et 50VCC

DC_P/DC_N : Implantation du calcul de tension moyenne



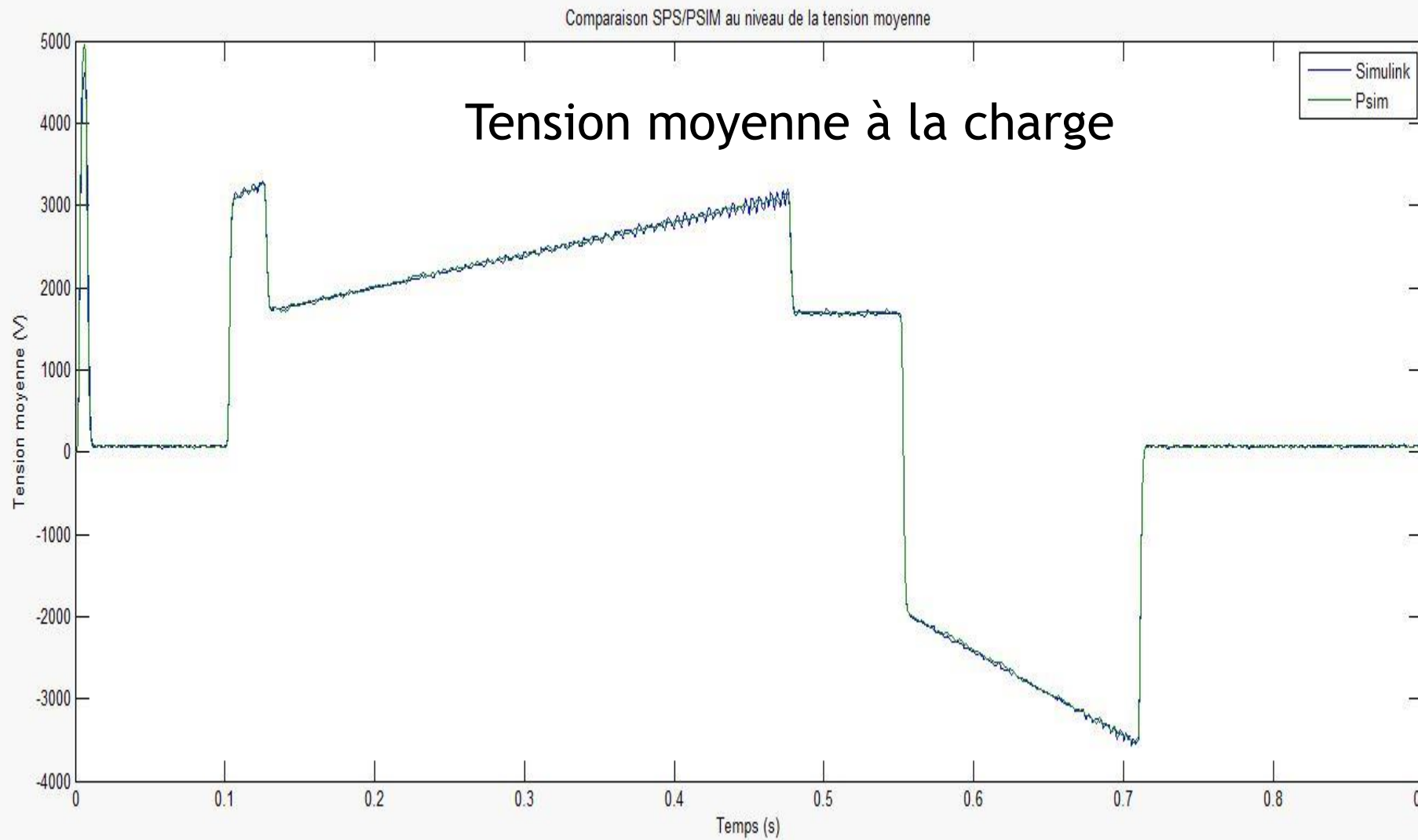
Bloc élémentaire de calcul de la tension moyenne (cascadé 10)

DC_P/DC_N : Alimenter les électroaimants de l'accélérateur de particules avec une forme de courant cross validé



Réponse en fréquence du bloc du calcul de la tension moyenne
Utilisation pour signal à 1Khz

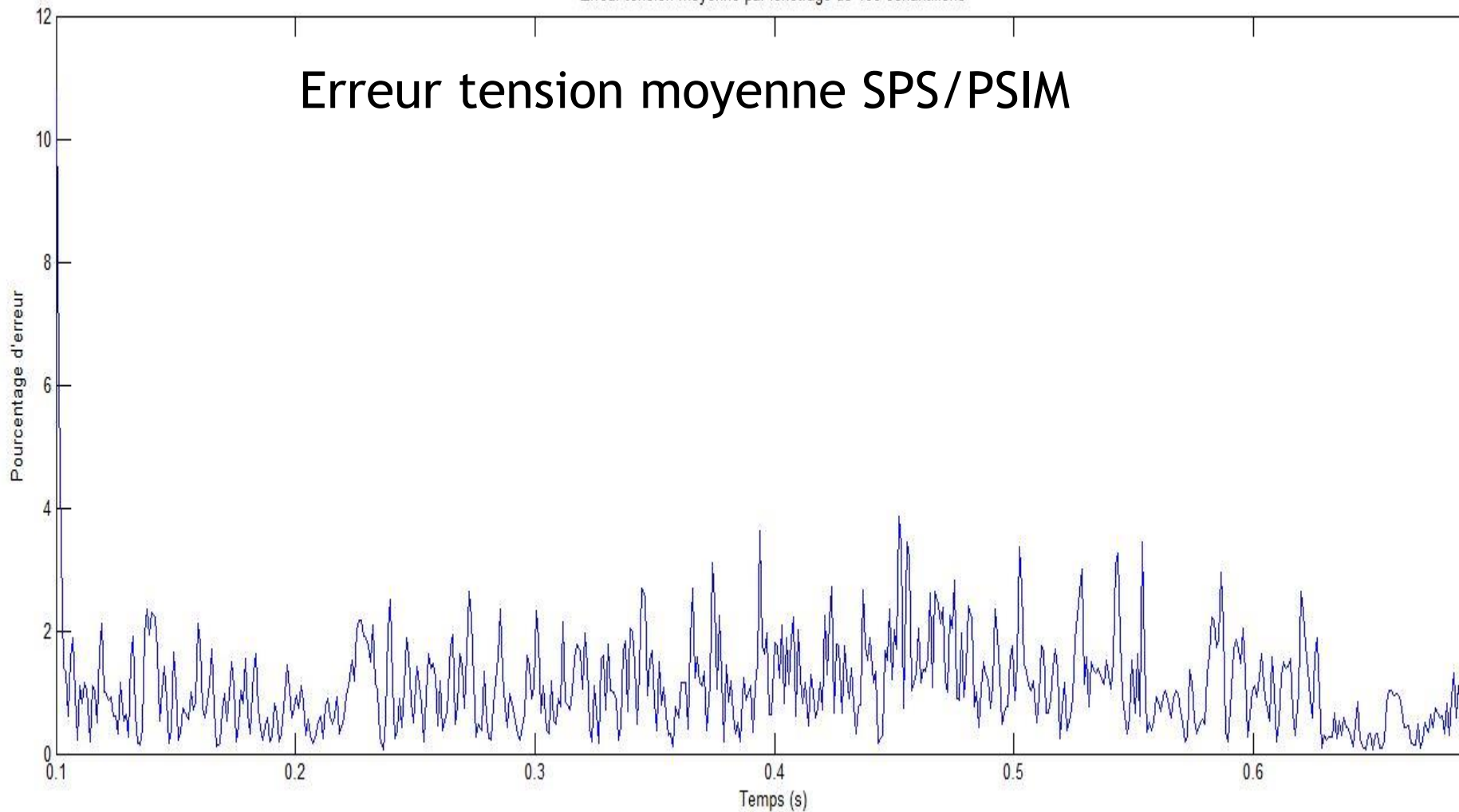
DC_P/DC_N : Tension moyenne à la charge (cross-validé Psim-SPS)



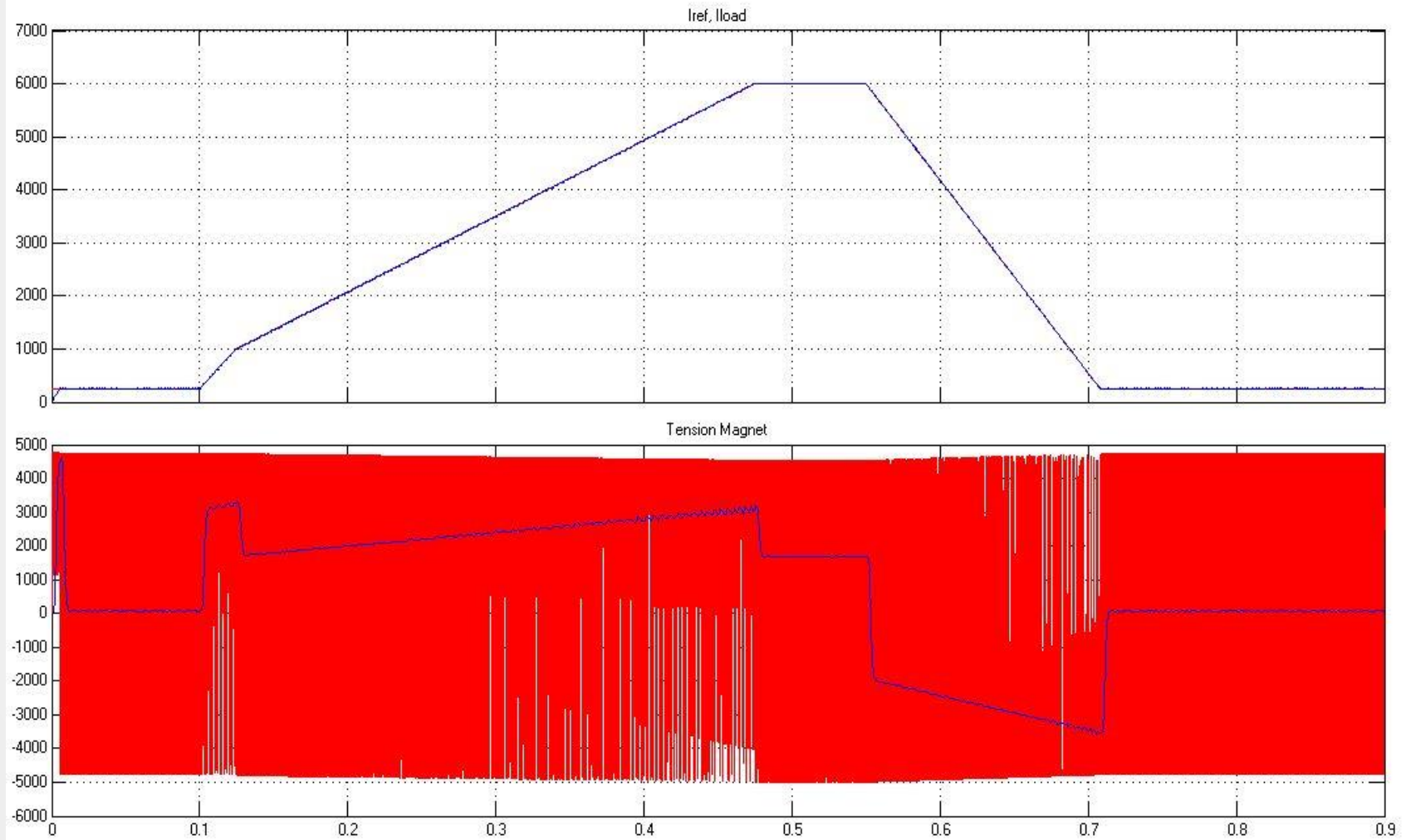
DC_P/DC_N : Alimenter les électroaimants de l'accélérateur de particules avec une forme de courant cross validé

Erreur tension moyenne par fenêtrage de 100 échantillons

Erreur tension moyenne SPS/PSIM

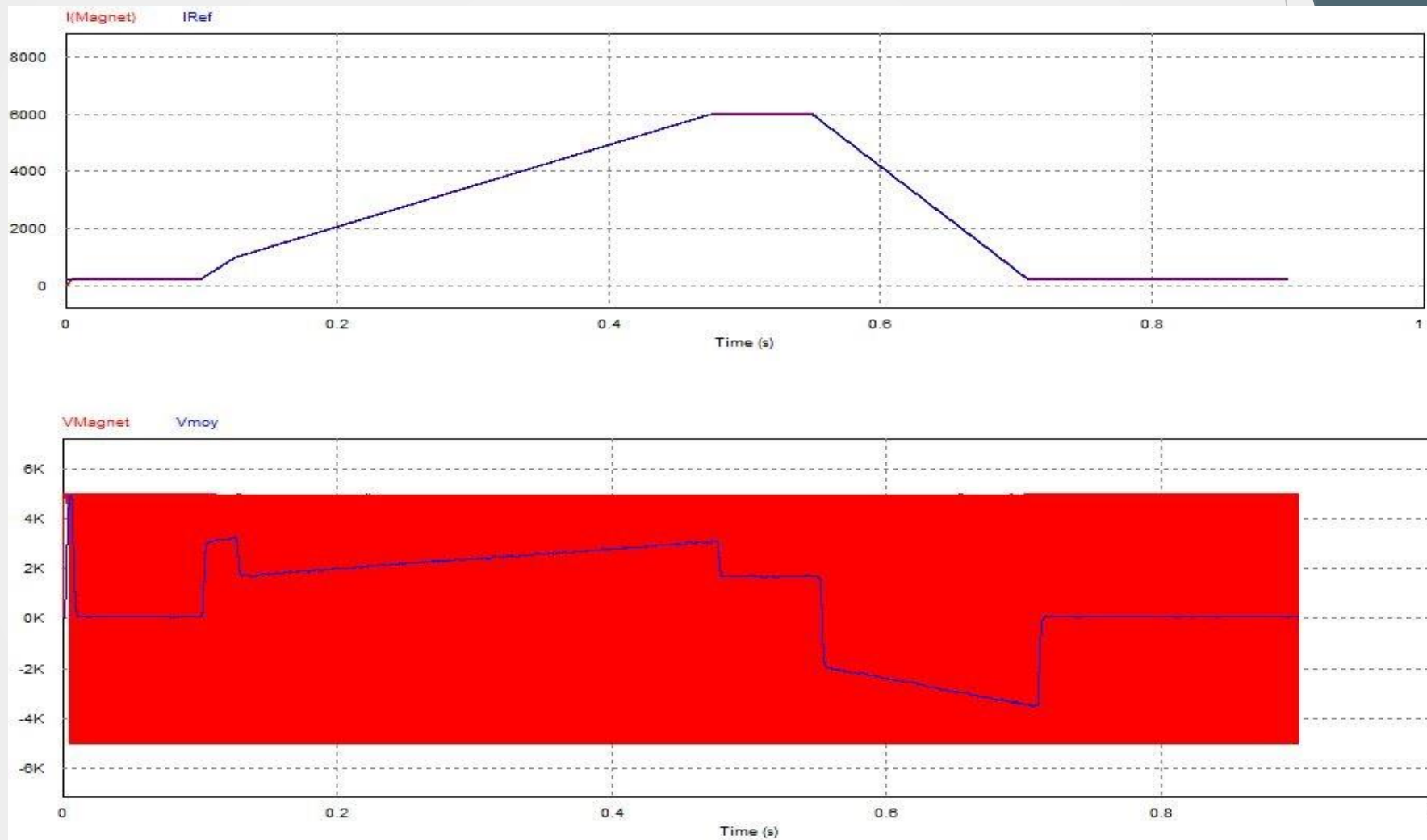


DC_P/DC_N : Alimenter les électroaimants de l'accélérateur de particules avec une forme de courant cross validé



Résultats SPS

DC_p/DC_N : Alimenter les électroaimants de l'accélérateur de particules avec une forme de courant cross validé



Résultats PSIM

Outil de contrôle

Paramètres des simulations

Paramètres généraux

Pas de calcul	1.00E-05 Tpas	Type de simulation
Durée de simulation	1.00 Timer	AFE
Fréquence	50.00 Freq	
Sensibilité pour la tension moyenne	3000 ech	Choix de la simulation
Inductance de découplage	1.00E-05 Lcoup	AFE 2 niveaux - Hystérésis - Charge Idéale
Résistance IGBT	1.00E-02 Ron	
Hysteresis	100 hys	Logiciels de simulation
		Matlab/Simulink

Valeurs des électroaimants

Résistance	0.28 Rch
Inductance	0.1 Lch

Valeurs des subbers RC

Résistance	100000 Rs
Capacité	inf Cs

Paramètres du PI

P	1.5611 P
I	24.6 I

Paramètres du filtre passe-bas

KLP numérateur	[0.0109 -0.0162 0.0109]	KLP
TLP dénominateur	[1 -1.8954 0.9009]	TLP

Valeurs des sources

Tension CA LL RMS	2000 Vac
Tension CC	5000 Vdc
Courant Maximal dans la charge	1469.7 Imax
Saturation	5000 Sat
Inductance de source	8.15E-04 Lac

Valeurs de la charge

Résistance	9.26 R
Capacité	0.3 C

Simulation

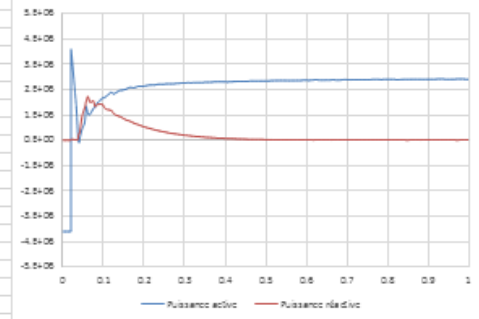
Affichage des résultats

Nom	Choix
Puissance dans la charge	<input checked="" type="checkbox"/>
Tension de la source	<input type="checkbox"/>
Courant de la source	<input type="checkbox"/>
Tension sur la charge	<input type="checkbox"/>
Courant dans la charge	<input type="checkbox"/>
Tension sur T1	<input type="checkbox"/>
Courant dans T1	<input type="checkbox"/>

Résultats

Time	P	Q
0	-3600015	0
0.00001	-3600015	0
0.00002	-3600015	0
0.00003	-3600015	0
0.00004	-3600015	0
0.00005	-3600015	0
0.00006	-3600015	0
0.00007	-3600015	0
0.00008	-3600015	0
0.00009	-3600015	0
0.0001	-3600015	0
0.00011	-3600015	0
0.00012	-3600015	0
0.00013	-3600015	0
0.00014	-3600015	0
0.00015	-3600015	0
0.00016	-3600015	0
0.00017	-3600015	0
0.00018	-3600015	0
0.00019	-3600015	0
0.0002	-3600015	0
0.00021	-3600015	0
0.00022	-3600015	0
0.00023	-3600015	0
0.00024	-3600015	0
0.00025	-3600015	0
0.00026	-3600015	0
0.00027	-3600015	0
0.00028	-3600015	0
0.00029	-3600015	0
0.0003	-3600015	0

Puissance consommée par la charge

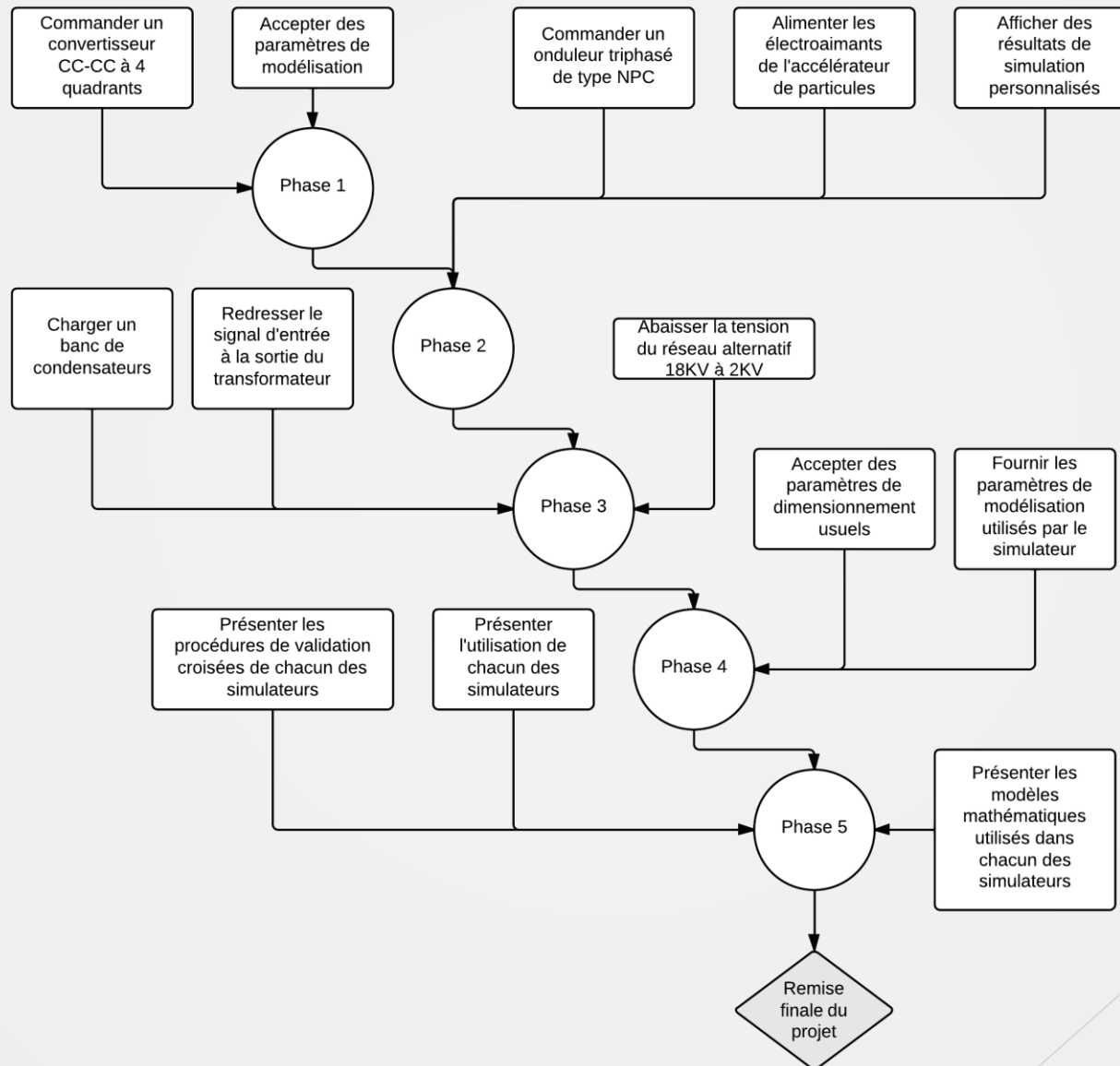


Options générales

Simulations disponibles	Nom de la simulation Simulink	Nom de la simulation Psim	Dossier des simulations
AFE			D:\Documents\GitHub\DesignIV\Remise\Simulation\AFE\
AFE 2 niveaux - Hystérésis - Charge Idéale	AFEDT1.slx	AFEDT1.psim	
AFE 2 niveaux - Hystérésis - Charge RC	AFEDT1_RC.slx	AFEDT1_RC.psim	
AFE 2 niveaux - PWM - Charge RC	AFEDT1_RD_PI.slx	AFEDT1_RD_PI.psim	
AFE 3 niveaux - Hystérésis - Charge Idéale	AFEDT1_3L.slx	AFEDT1_3L.psim	
AFE 3 niveaux - Hystérésis - Charge RC	AFEDT1_3L_RC.slx	AFEDT1_3L_RC.psim	
AFE 3 niveaux - PWM - Charge RC	AFEDT1_3L_RC_PI.slx	AFEDT1_3L_RC_PI.psim	
DCP-DCN			
Hacheur 4 Quadrants - PWM	NPC_1.slx		
DCP-DCN 3 niveaux - Hystérésis	NPC_1_modifs.slx		
DCP-DCN 3 niveaux - PWM	NPC_1_modifs.slx		
Assemblage complet			
Simulation Complète	NPC_1_modifs.slx		

Mettre à jour les paramètres

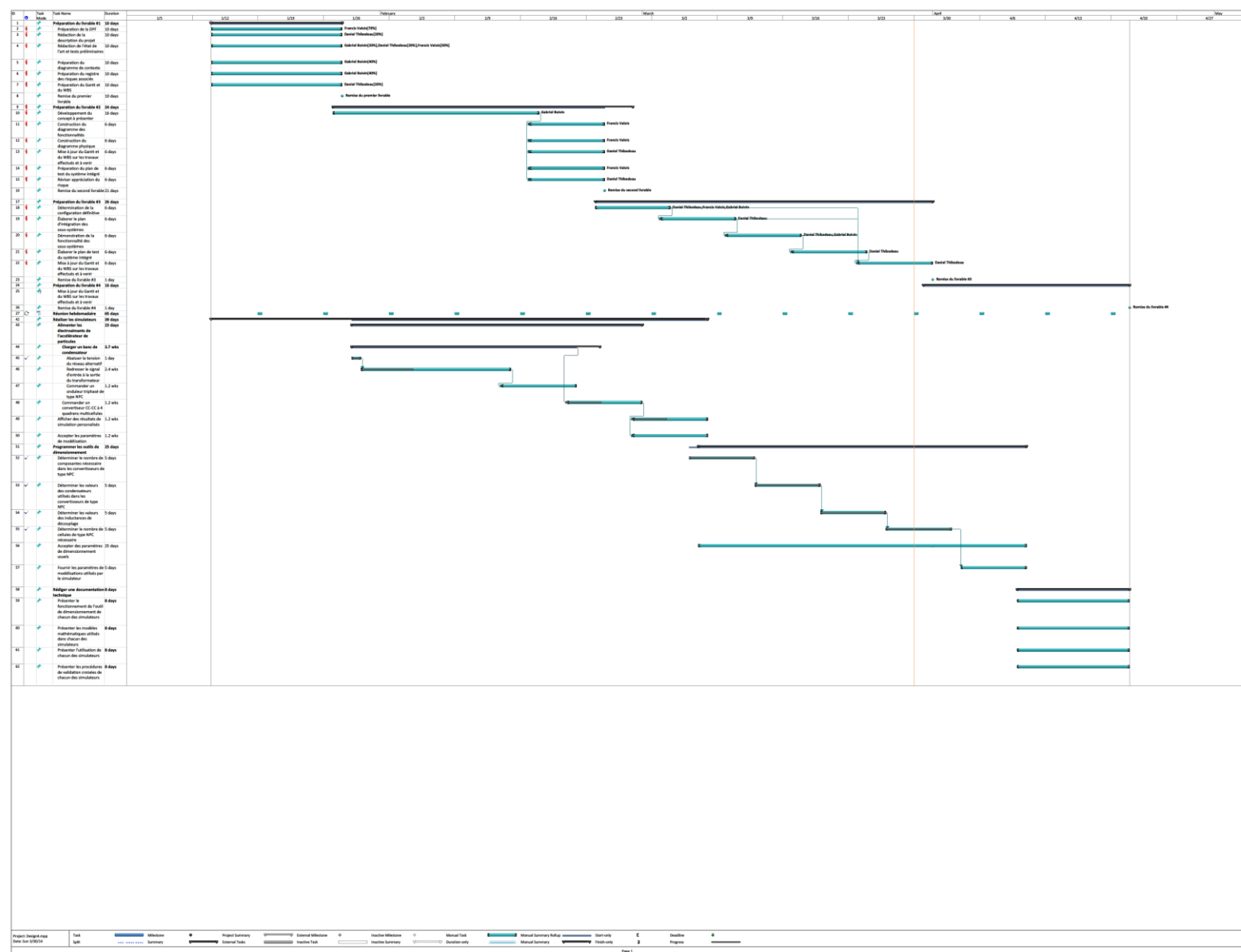
Plan d'intégration



Plan de test du système intégré

Niveau	Sous-niveau	Méthode de vérification	Méthode d'analyse	Sp
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	
	Accepter des paramètres de modélisation	Test sur SPS et Psim	Injecter un paramètre de modélisation et vérifier que la variation a lieu	
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	
	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	
	Afficher des résultats de simulation personnalisés	Test	Oui/Non le critère est-il rempli?	
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	Pm Pmo
	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	ΔV
Phase 4: Outil de dimensionnement	Accepter des paramètres de dimensionnement usuels	Test sur Excel	Oui/Non le critère est-il rempli?	
	Fournir les paramètres de modélisation utilisés par le simulateur	Test sur Excel	Oui/Non le critère est-il rempli?	
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?	
	Présenter l'utilisation de chacun des simulateurs	Test de la méthode sur les plateformes	Oui/Non le critère est-il rempli?	
	Présenter les modèles mathématiques utilisés dans chacun des simulateurs	Test sur les plateformes	Oui/Non le critère est-il rempli?	

Gantt



WBS

