

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

Par l'équipe Électrosim

# Contexte et problématique

## Clients du projet

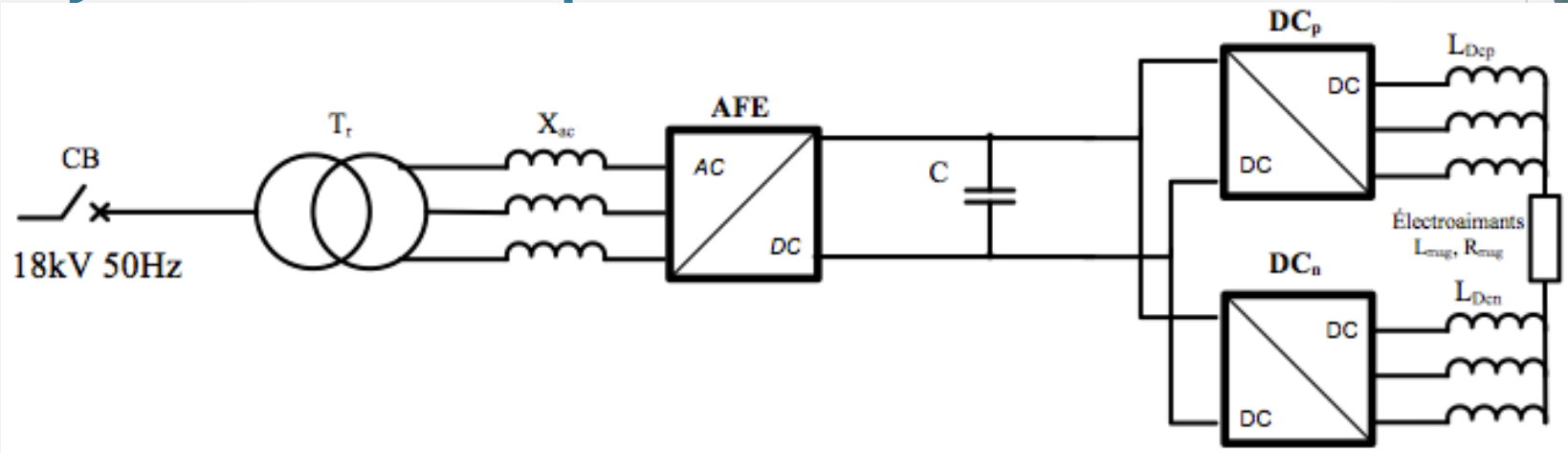


- ▶ Le CERN est un laboratoire de recherche multidisciplinaire sur la physique fondamentale
  - ▶ Le CERN est situé en Suisse (Genève)
  - ▶ Le laboratoire est constitué d'une chaîne complexe d'accélérateurs de particules
- ▶ Le LEEPCI est un laboratoire de recherche de l'université Laval et se concentre 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

# 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)

# Outil de contrôle et dimensionnement

- L'outil de dimensionnement est utilisé pour des fins de contrôle des intrants de simulation.
- Permet de lancer la simulation et de dimensionner les différentes composantes du système.
- Il est possible de lancer une simulation sur SPS.
- L'adaptation sur PSIM est faite, mais requiert tests et ajustements sur la plateforme du client.
- L'outil de dimensionnement fournit les outils nécessaires pour dimensionner les modèles SPS utilisables sur le simulateur temps réel.

# Outil de contrôle et dimensionnement (Réglages initiaux)

| A  | B                                    | C                                | D | E                            | F   |
|--|--------------------------------------|----------------------------------|---|------------------------------|---|
| <b>Options générales</b>                   |                                      |                                  |   |                              |   |
| <b>Simulations disponibles</b>             | <b>Nom de la simulation Simulink</b> | <b>Nom de la simulation Psim</b> |   |                              | <b>Dossier des simulations</b>                      |
| <b>AFE</b>                                 |                                      |                                  |   |                              | D:\Documents\GitHub\DesignIV\Remise\Simulation\AFE\ |
| AFE 2 niveaux - Hystérésis - Charge Idéale | AFEDT1.slx                           | AFEDT1.psimsch                   |   |                              |   |
| AFE 2 niveaux - Hystérésis - Charge RC     | AFEDT1_RC.slx                        | AFEDT1_RC.psimsch                |   |                              |   |
| AFE 2 niveaux - PWM - Charge RC            | AFEDT1_RD_PI.slx                     | AFEDT1_RD_PI.psimsch             |   |                              |   |
| AFE 3 niveaux - Hystérésis - Charge idéale | AFEDT1_3L.slx                        | AFEDT1_3L.psimsch                |   |                              |   |
| AFE 3 niveaux - Hystérésis - Charge RC     | AFEDT1_3L_RC.slx                     | AFEDT1_3L_RC.psimsch             |   |                              |   |
| AFE 3 niveaux - PWM - Charge RC            | AFEDT1_3L_RC_PI.slx                  | AFEDT1_3L_RC_PI.psimsch          |   |                              |   |
|  |                                      |                                  |   |                              |   |
| <b>DCP-DCN</b>                             |                                      |                                  |   | Mettre à jour les paramètres |   |
| 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                     |                                  |   |                              |   |
|  |                                      |                                  |   |                              |   |
| <b>Assemblage complet</b>                  |                                      |                                  |   |                              |   |
| Simulation Complète                        | NPC_1_modifs.slx                     |                                  |   |                              |   |

# Outil de contrôle et dimensionnement (Paramètres de simulation)

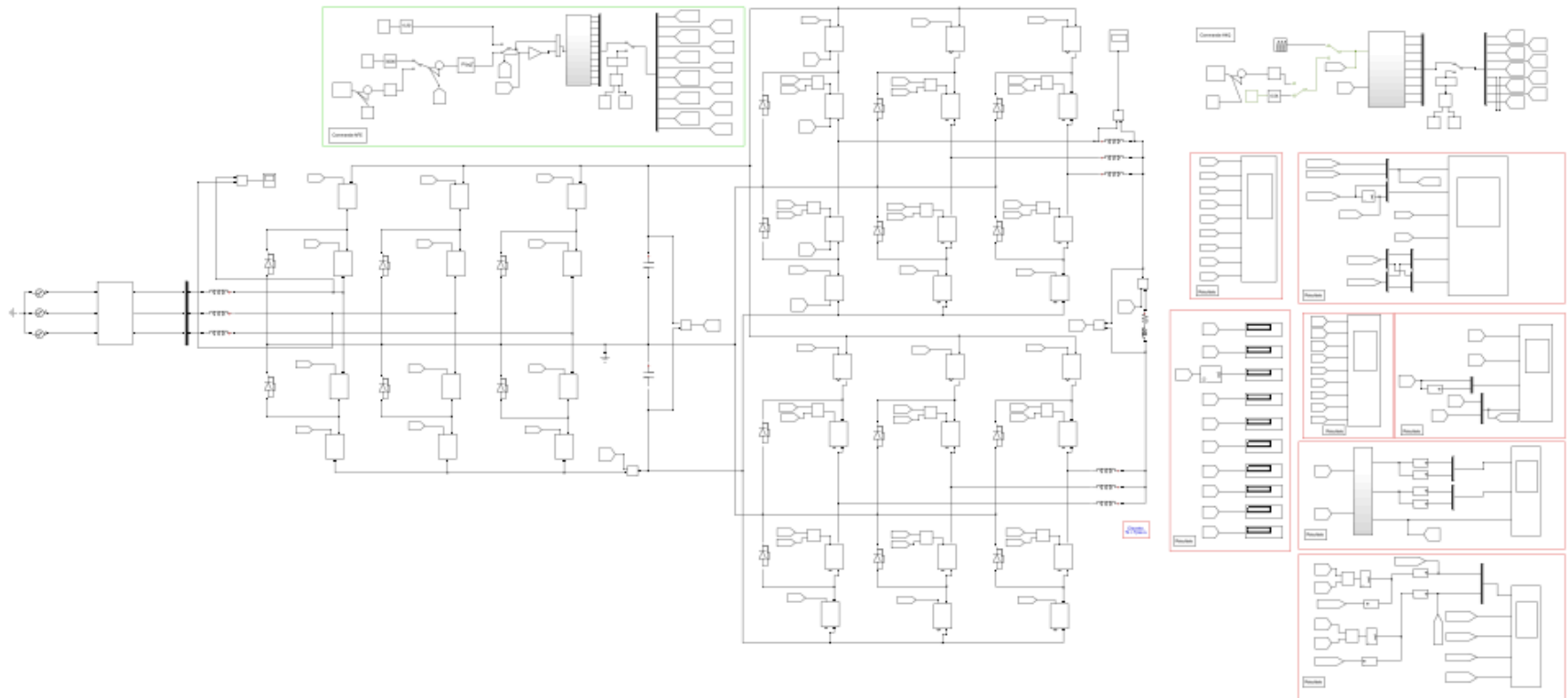
| Paramètres des simulations                        |                                     |        |  |     |       |                          |                                     |                      |                          |                      |                          |                       |                          |                        |                          |                |                          |                 |                          |
|---|-------------------------------------|--------|--|-----|-------|--------------------------|-------------------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|----------------|--------------------------|-----------------|--------------------------|
| <b>Paramètres généraux</b>                        |                                     |        |  |     |       |                          |                                     |                      |                          |                      |                          |                       |                          |                        |                          |                |                          |                 |                          |
| Pas de calcul                                     | 1.00E-05                            | Tpas   | Type de simulation<br>DCP-DCN  |     |       |                          |                                     |                      |                          |                      |                          |                       |                          |                        |                          |                |                          |                 |                          |
| Durée de simulation                               | 0.90                                | Timer  |  |     |       |                          |                                     |                      |                          |                      |                          |                       |                          |                        |                          |                |                          |                 |                          |
| Fréquence   | 50.00                               | Freq   |  |     |       |                          |                                     |                      |                          |                      |                          |                       |                          |                        |                          |                |                          |                 |                          |
| Sensibilité pour la tension moyenne               | 3000                                | ech    | Choix de la simulation<br>Test   |     |       |                          |                                     |                      |                          |                      |                          |                       |                          |                        |                          |                |                          |                 |                          |
| Inductance de découplage                          | 1.00E-05                            | Lcoup  |  |     |       |                          |                                     |                      |                          |                      |                          |                       |                          |                        |                          |                |                          |                 |                          |
| Résistance IGBT                                   | 1.00E-02                            | Ron    |  |     |       |                          |                                     |                      |                          |                      |                          |                       |                          |                        |                          |                |                          |                 |                          |
| Hysteresis  | 450                                 | hys    | Logiciels de simulation<br>Psim  |     |       |                          |                                     |                      |                          |                      |                          |                       |                          |                        |                          |                |                          |                 |                          |
| Fréquence de modulation                           | 1000                                | fmod4Q |  |     |       |                          |                                     |                      |                          |                      |                          |                       |                          |                        |                          |                |                          |                 |                          |
|   |                                     |        |  |     |       |                          |                                     |                      |                          |                      |                          |                       |                          |                        |                          |                |                          |                 |                          |
| <b>Valeurs des électroaimants</b>                 |                                     |        |  |     |       |                          |                                     |                      |                          |                      |                          |                       |                          |                        |                          |                |                          |                 |                          |
| Résistance  | 0.28                                | R      |  |     |       |                          |                                     |                      |                          |                      |                          |                       |                          |                        |                          |                |                          |                 |                          |
| Inductance  | 0.1                                 | L      |  |     |       |                          |                                     |                      |                          |                      |                          |                       |                          |                        |                          |                |                          |                 |                          |
| <b>Valeurs des subbers RC</b>                     |                                     |        |  |     |       |                          |                                     |                      |                          |                      |                          |                       |                          |                        |                          |                |                          |                 |                          |
| Résistance  | 100000                              | Rs     |  |     |       |                          |                                     |                      |                          |                      |                          |                       |                          |                        |                          |                |                          |                 |                          |
| Capacité  | Inf                                 | Cs     |  |     |       |                          |                                     |                      |                          |                      |                          |                       |                          |                        |                          |                |                          |                 |                          |
| <b>Valeurs des sources</b>                        |                                     |        |  |     |       |                          |                                     |                      |                          |                      |                          |                       |                          |                        |                          |                |                          |                 |                          |
| Tension CA LL RMS                                 | 2000                                | Vac    | <b>Affichage des résultats</b><br><table border="1"> <thead> <tr> <th>Nom</th> <th>Choix</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Puissance dans la charge</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Tension de la source</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Courant de la source</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Tension sur la charge</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Courant dans la charge</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Tension sur T1</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Courant dans T1</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> </tbody> </table> | 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"/> |
| 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"/>            |        |  |     |       |                          |                                     |                      |                          |                      |                          |                       |                          |                        |                          |                |                          |                 |                          |
| Tension CC  | 5000                                | Vdc    |  |     |       |                          |                                     |                      |                          |                      |                          |                       |                          |                        |                          |                |                          |                 |                          |
| Courant Maximal dans la charge                    | 1469.7                              | Satv   |  |     |       |                          |                                     |                      |                          |                      |                          |                       |                          |                        |                          |                |                          |                 |                          |
| Inductance de source                              | 8.15E-04                            | Lac    |  |     |       |                          |                                     |                      |                          |                      |                          |                       |                          |                        |                          |                |                          |                 |                          |
|   |                                     |        |  |     |       |                          |                                     |                      |                          |                      |                          |                       |                          |                        |                          |                |                          |                 |                          |
| <b>Valeurs de la charge - AFE</b>                 |                                     |        |  |     |       |                          |                                     |                      |                          |                      |                          |                       |                          |                        |                          |                |                          |                 |                          |
| Résistance  | 9.28                                | Rch    |  |     |       |                          |                                     |                      |                          |                      |                          |                       |                          |                        |                          |                |                          |                 |                          |
| Capacité  | 0.3                                 | Cbus   |  |     |       |                          |                                     |                      |                          |                      |                          |                       |                          |                        |                          |                |                          |                 |                          |
| <b>Paramètres du PI - Courant AFE - 2 Niveaux</b> |                                     |        |  |     |       |                          |                                     |                      |                          |                      |                          |                       |                          |                        |                          |                |                          |                 |                          |
| P   | 25.72428                            | Pv     |  |     |       |                          |                                     |                      |                          |                      |                          |                       |                          |                        |                          |                |                          |                 |                          |
| I   | 9.26                                | Iv     |  |     |       |                          |                                     |                      |                          |                      |                          |                       |                          |                        |                          |                |                          |                 |                          |

# Outil de contrôle - Démonstration

- ▶ Réglages des paramètres initiaux
- ▶ Réglages des paramètres de simulation
- ▶ Lancement de la simulation SPS (H4Q)
- ▶ Lancement de la simulation Psim (H4Q)
- ▶ Affichage de résultats

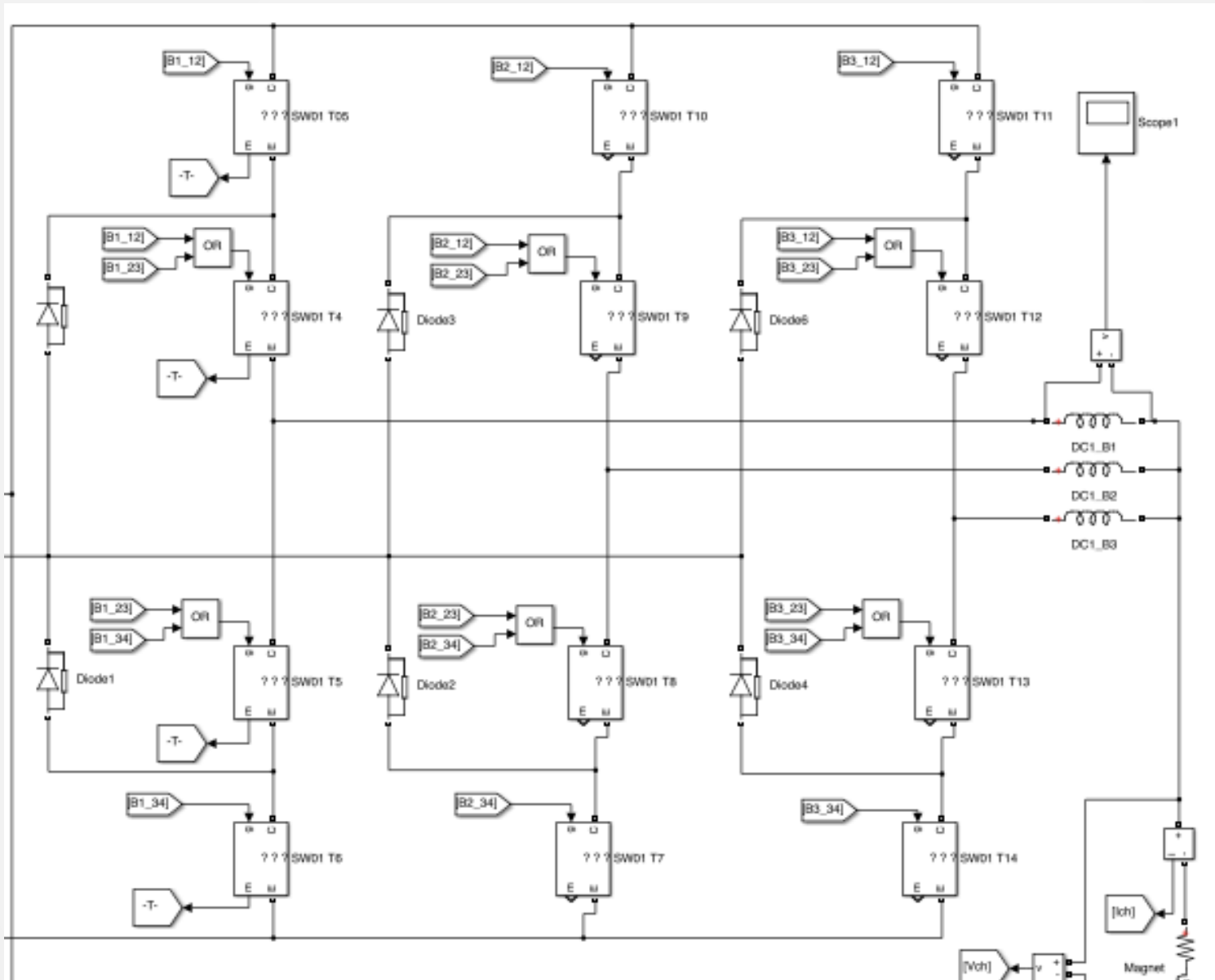


# Simulation complète (SPS)

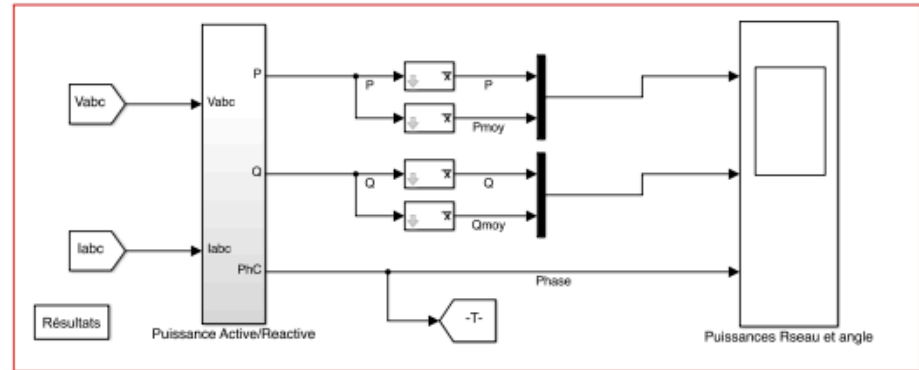
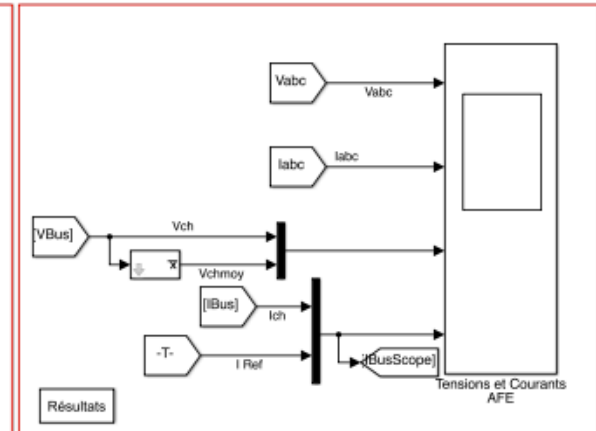
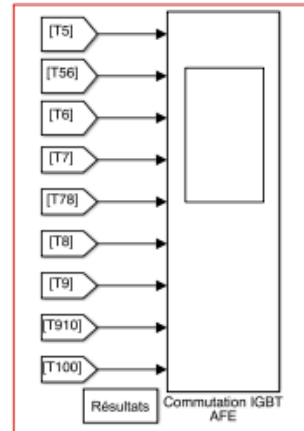
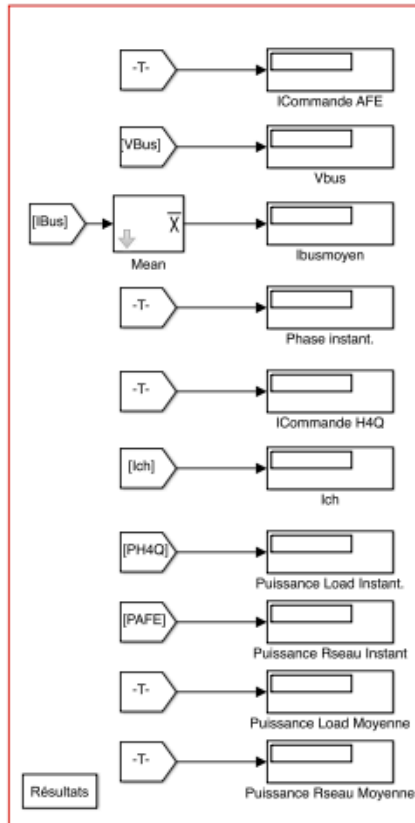
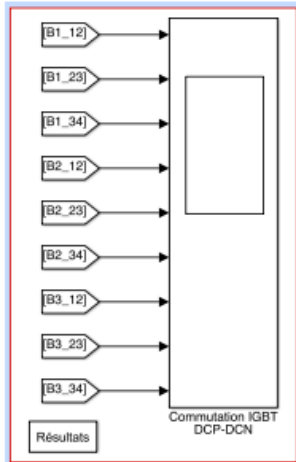




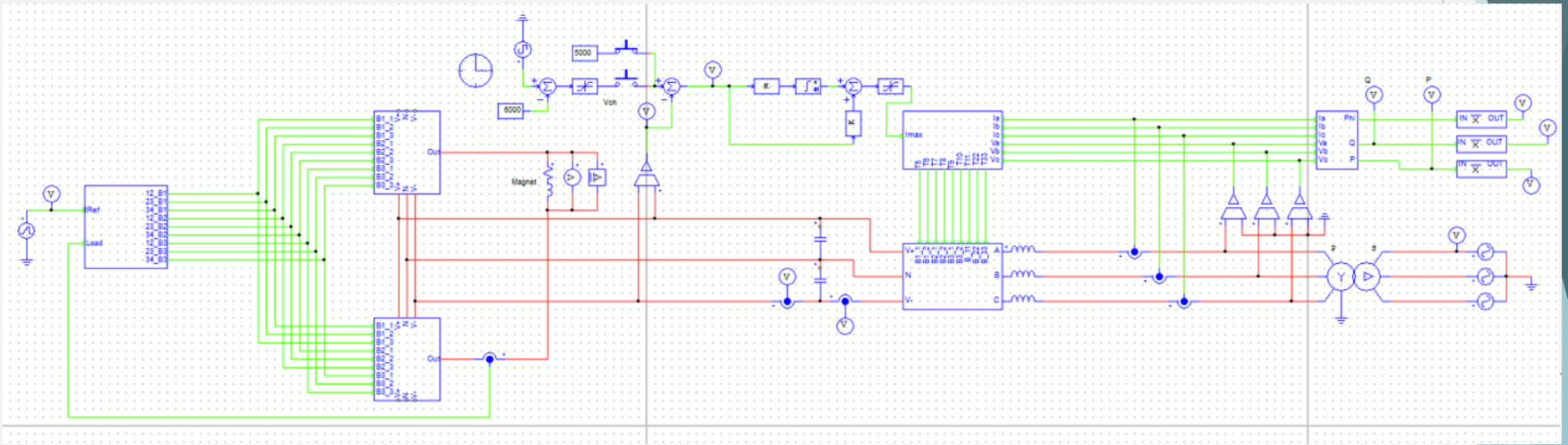
# DCP-DCN (SPS)



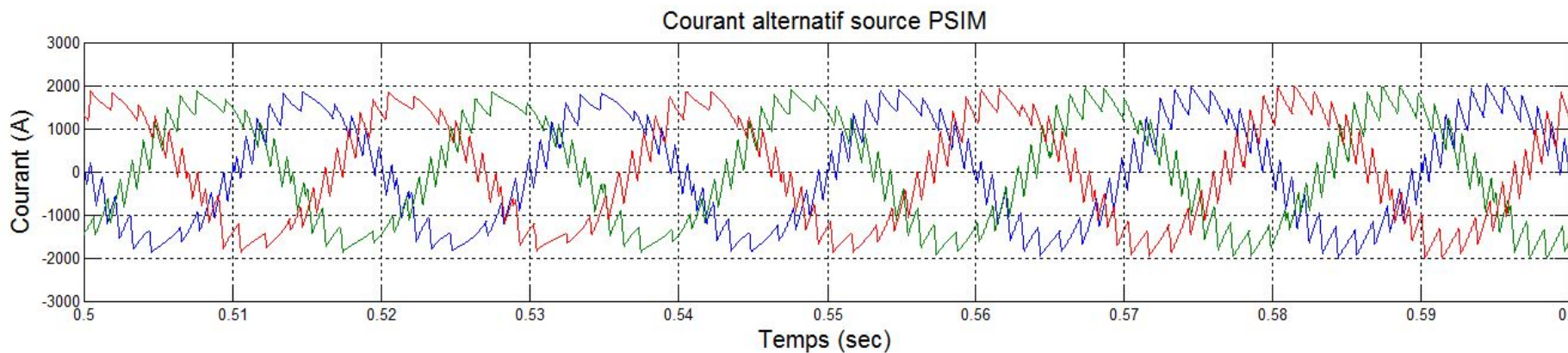
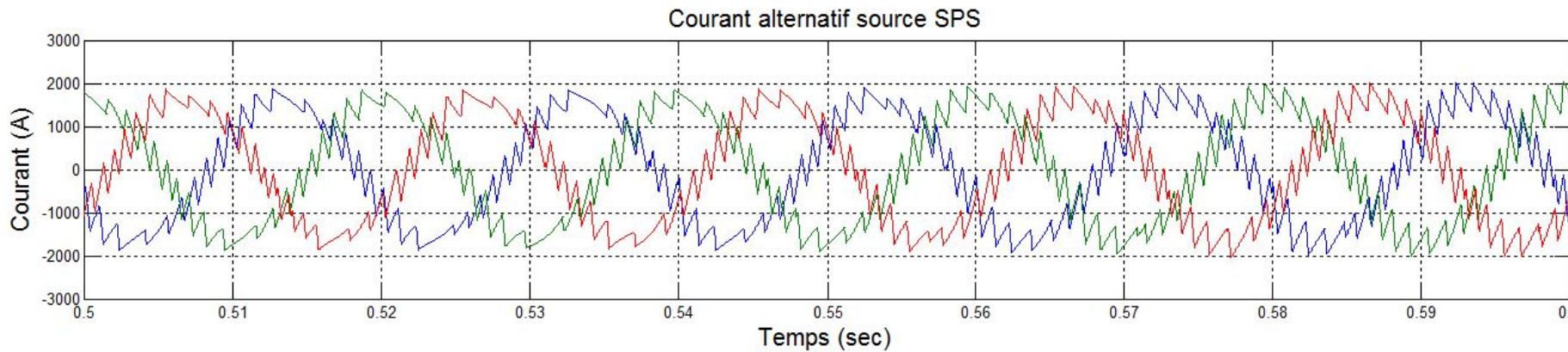
# Affichages personnalisés (SPS)



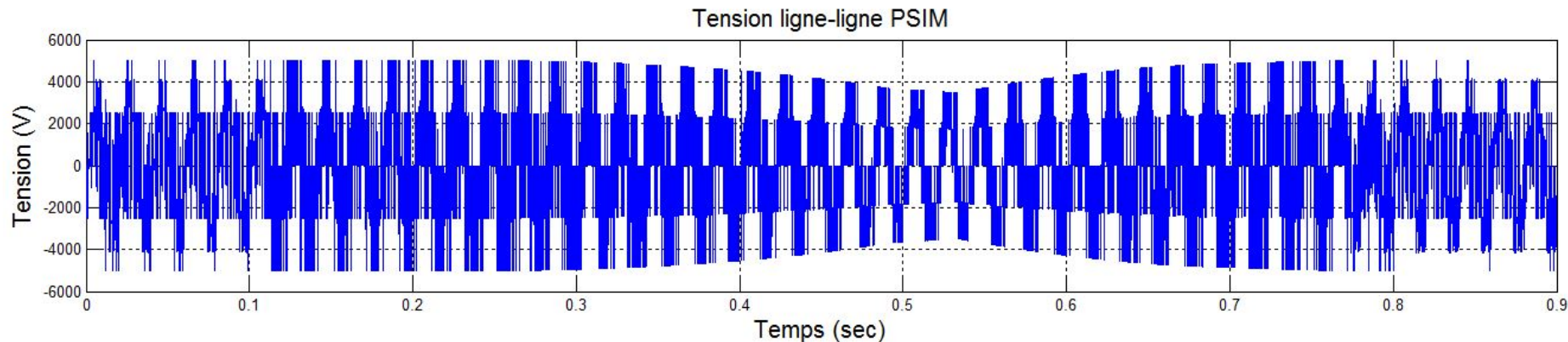
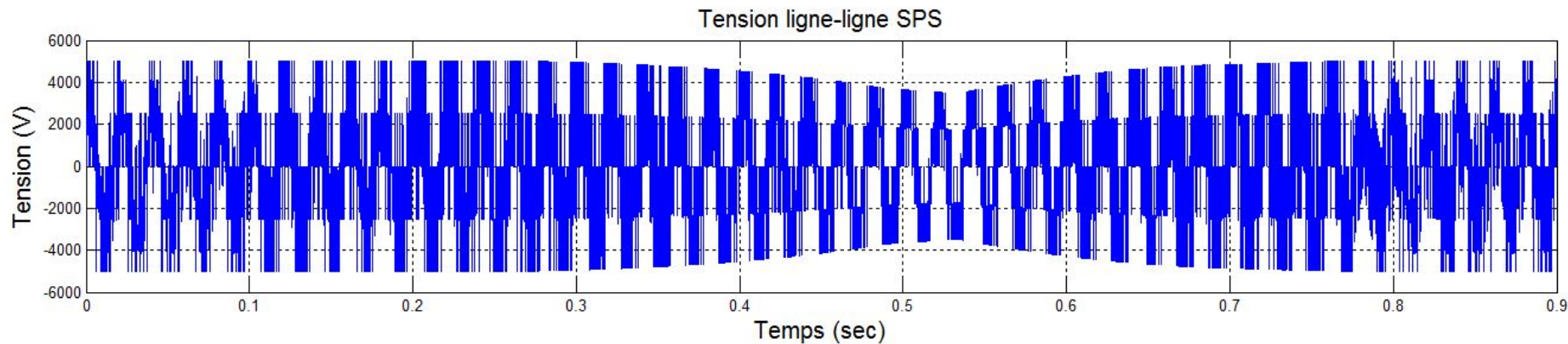
# Simulation complète (PSim)



# Validation croisée (Courant d'entrée AFE)

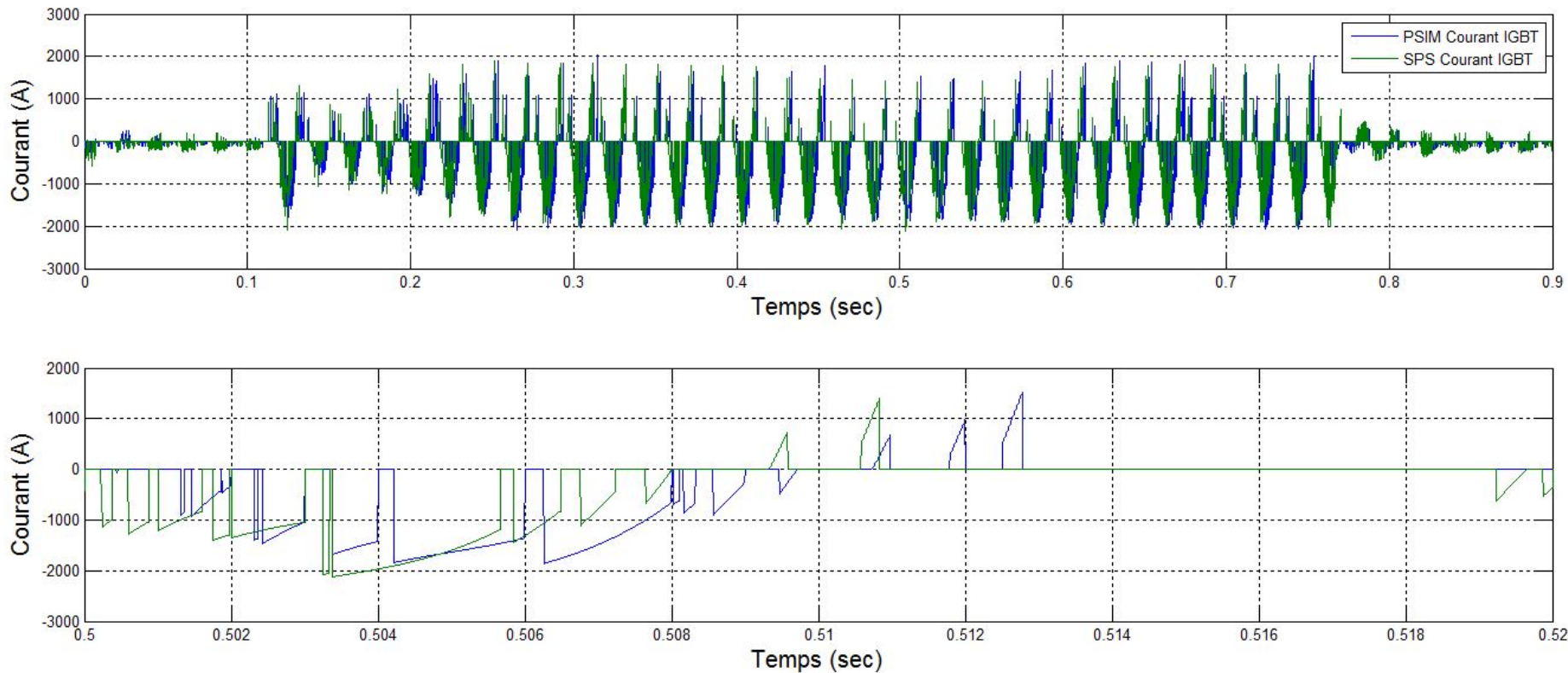


# Validation croisée (Tension ligne-ligne AFE)



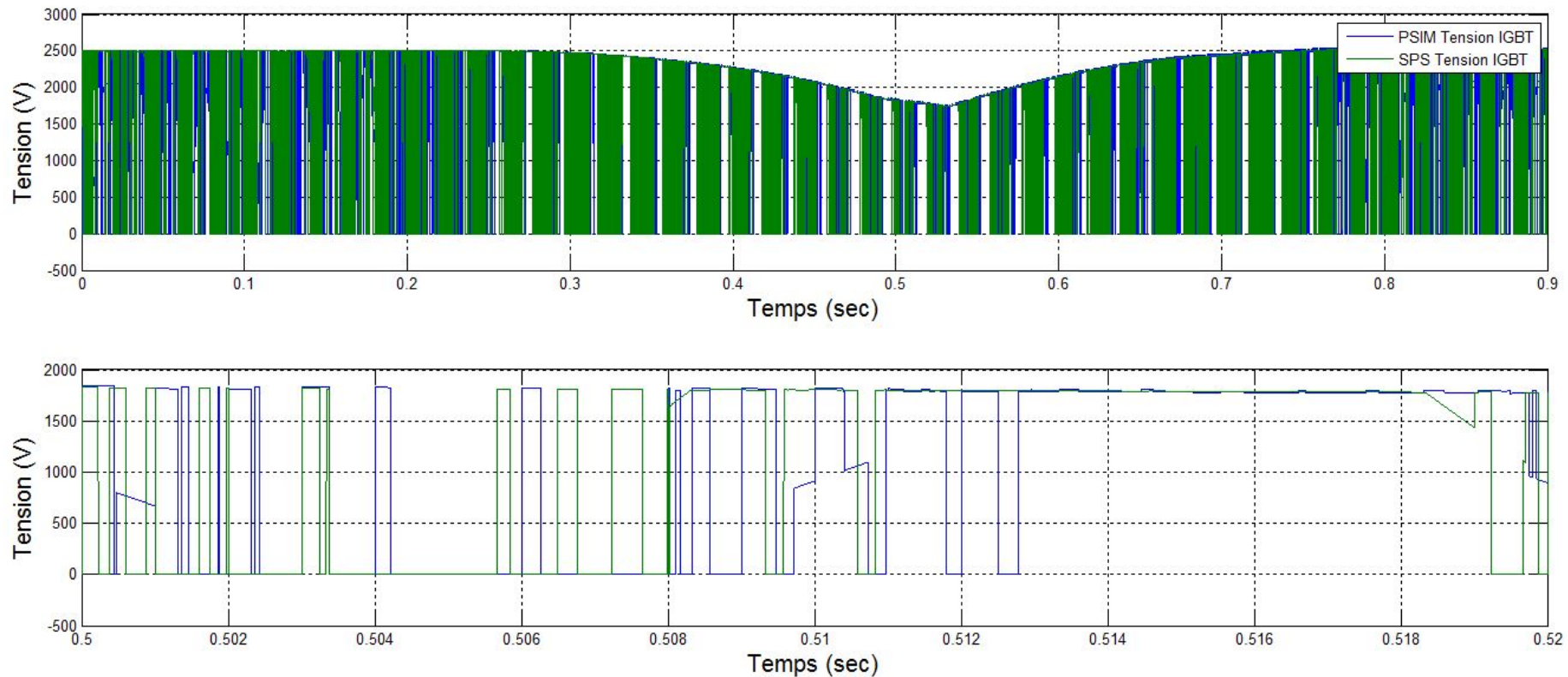


# Validation croisée (Courant IGBT AFE)

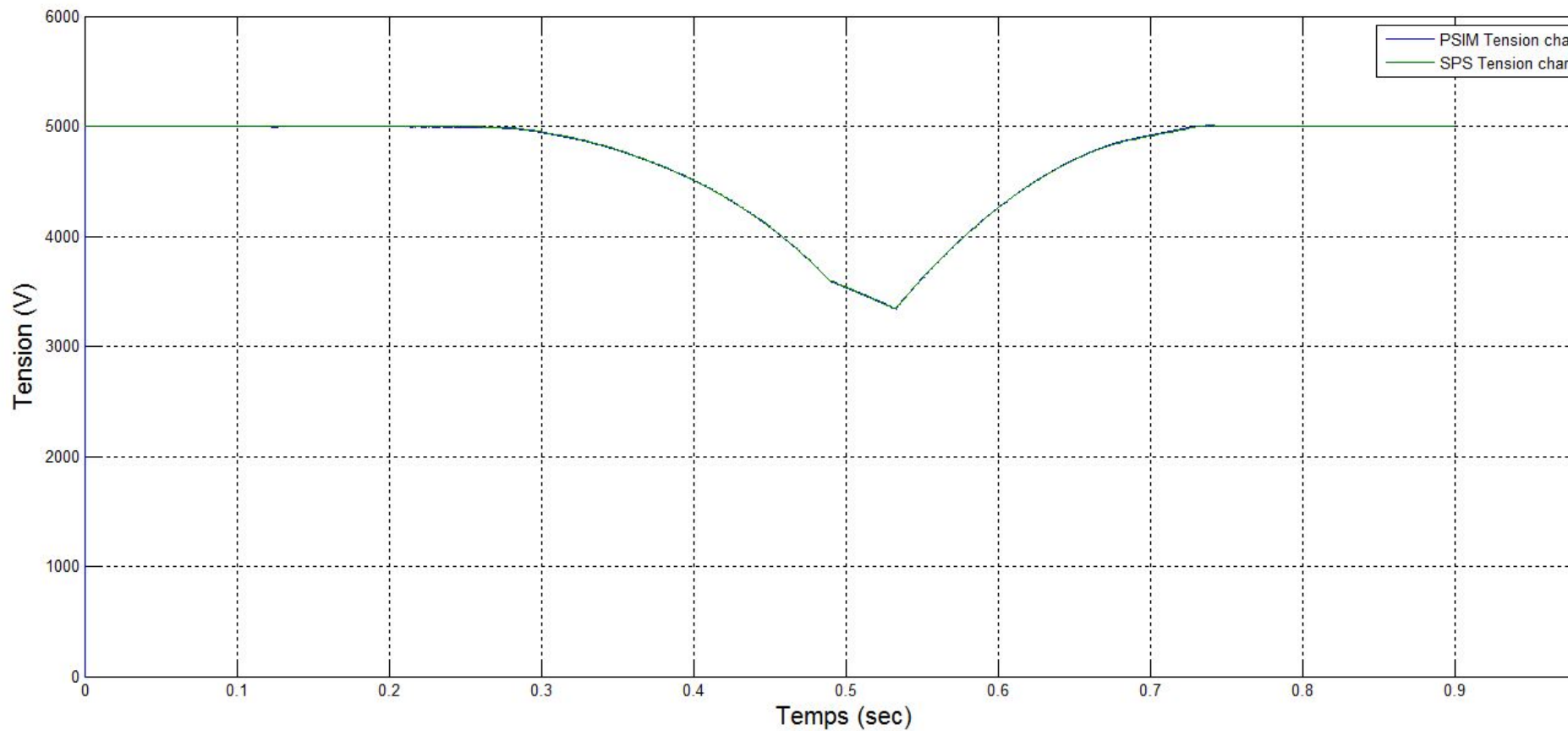




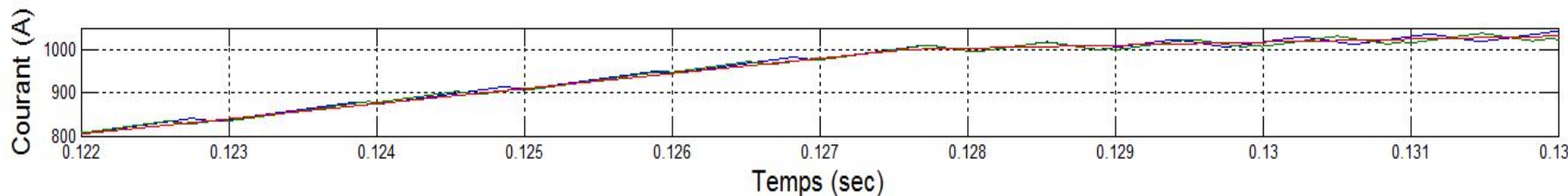
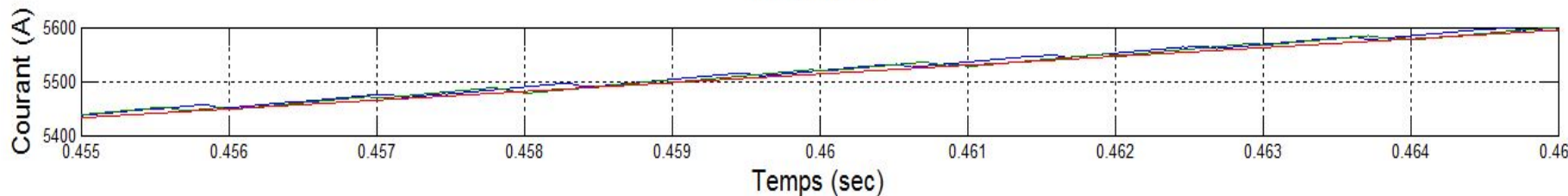
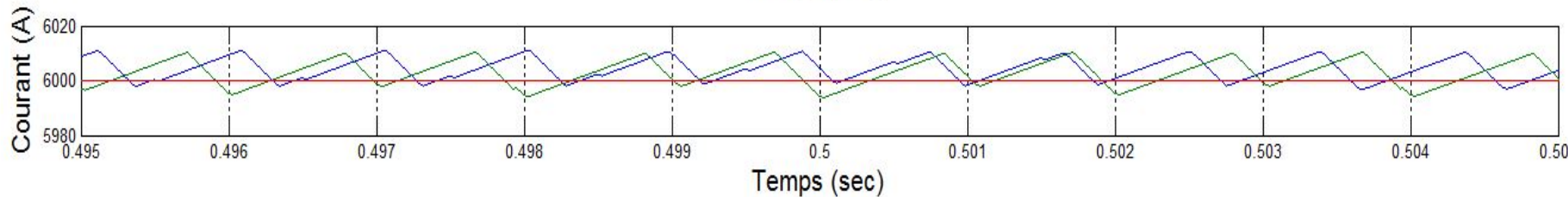
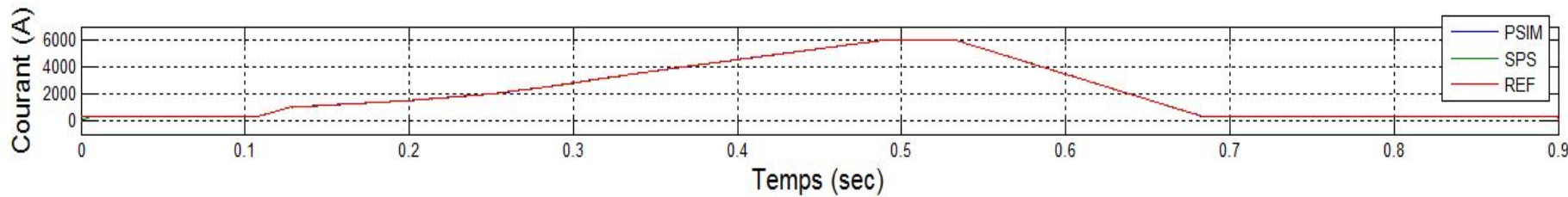
# Validation croisée (Tension IGBT AFE)



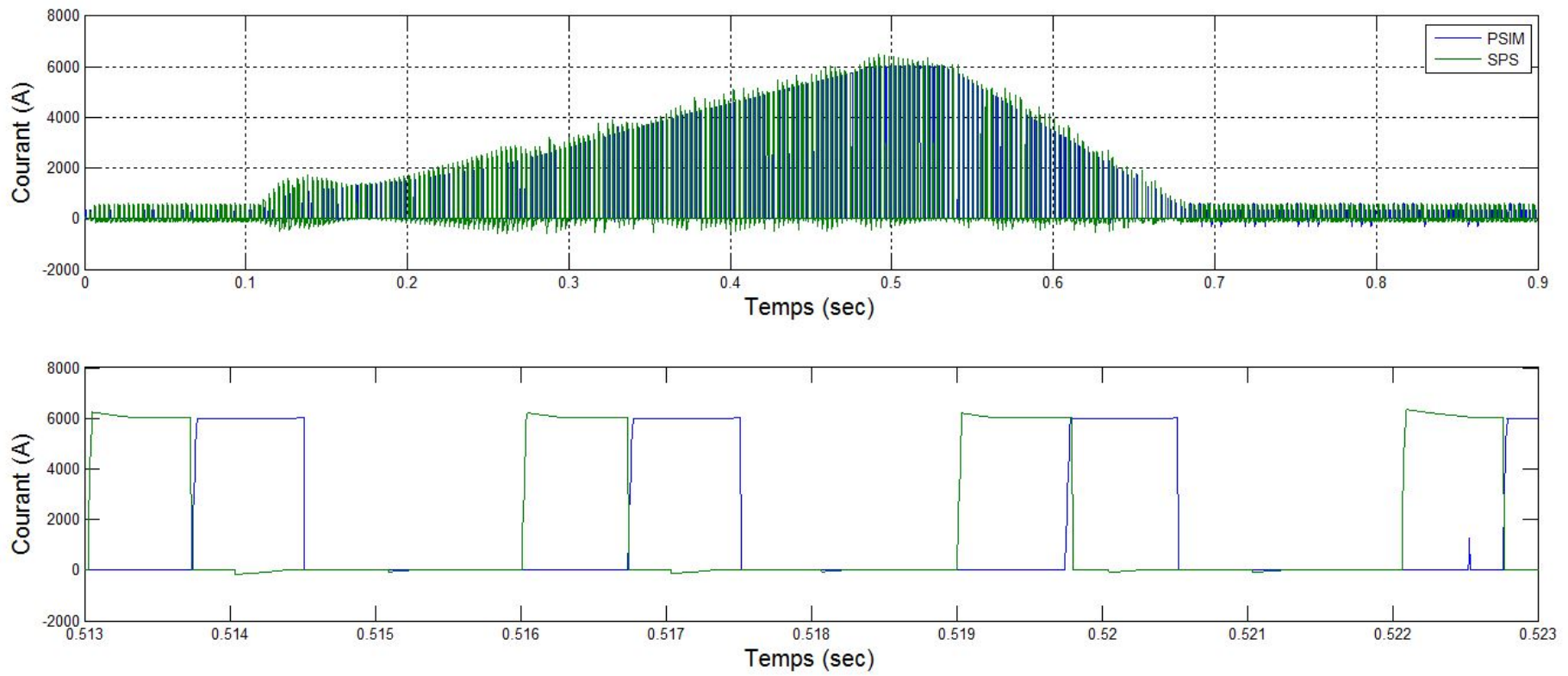
# Validation croisée (Tension bus CC)



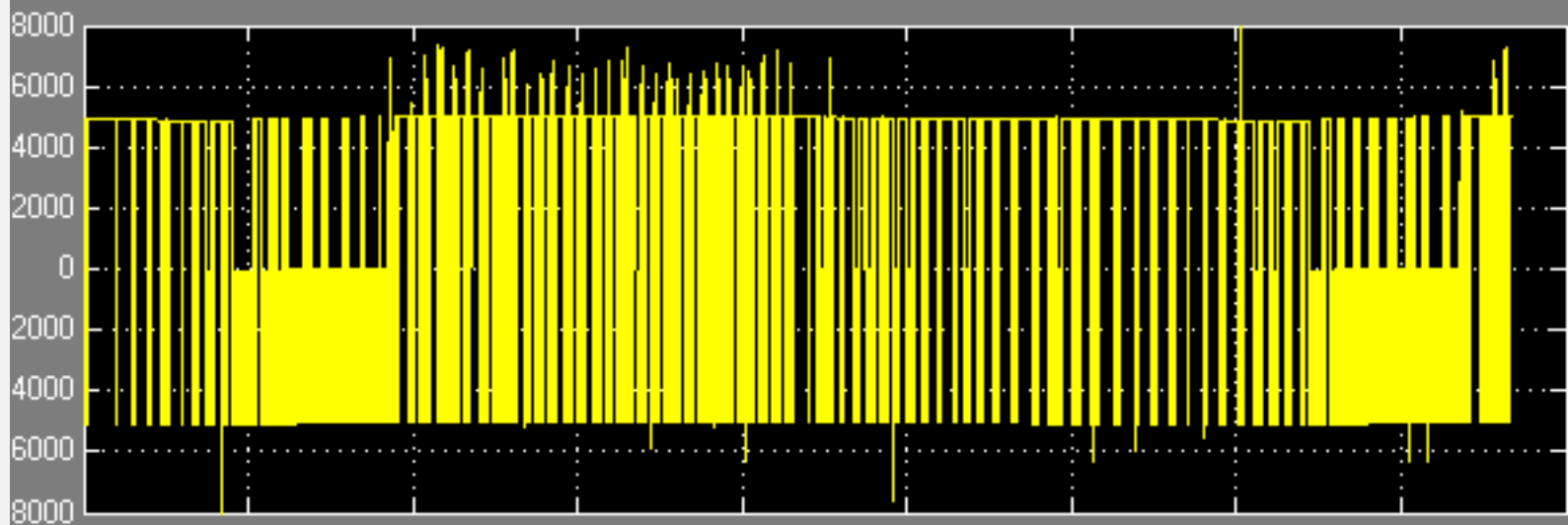
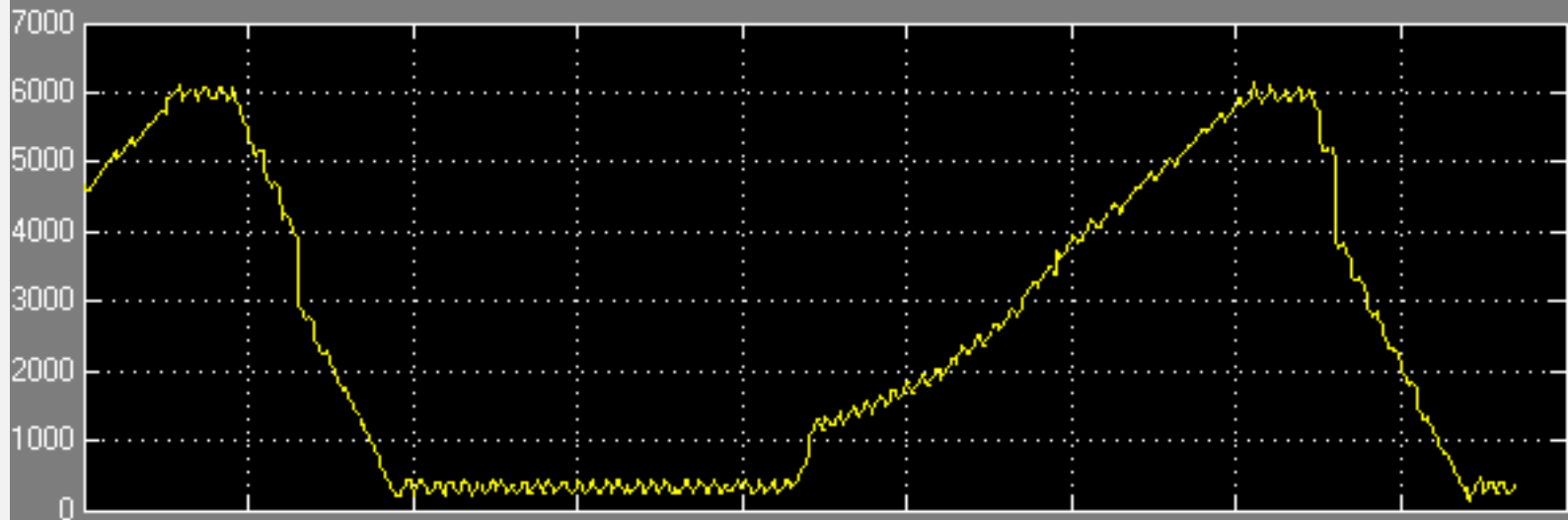
# Validation croisée (Courant Charge)



# Validation croisée (Courant IGBT DCP-DCN)



# Opal-RT - Présentation



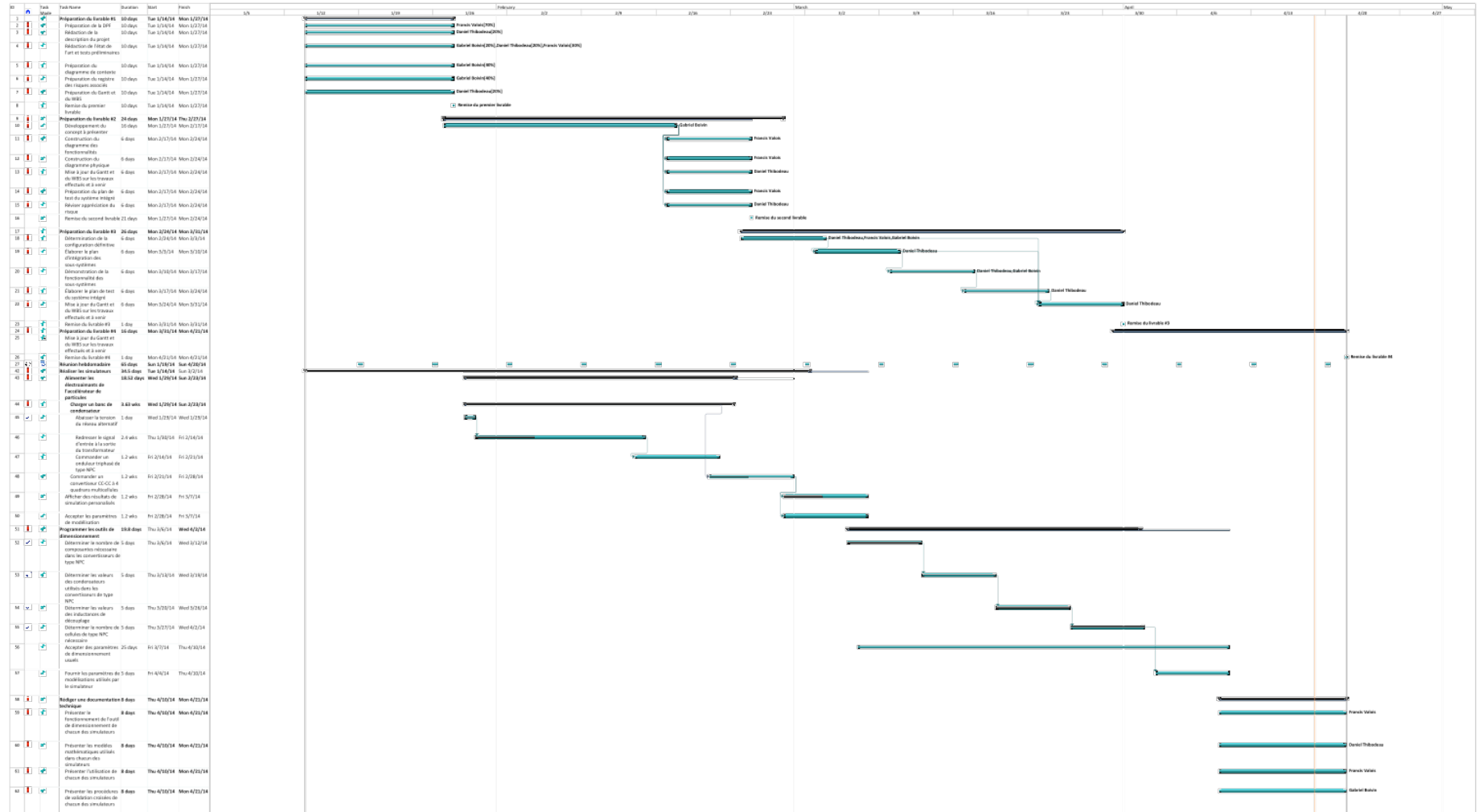
# Plan de test du système intégré

| Niveau   | Sous-niveau   | Méthode de vérification                                     | Méthode d'analyse   | Spécification  |
|--|---|---|---|--|
| 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   | $\Delta I \leq 25A$  |
|  | 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   | $\Delta I \leq 25A$  |
|  | 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                             | $\Delta I \leq 25A$  |
|  | 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  | $t \leq 2s$ ,<br>$P_{max} \leq 3.6MW$ ,<br>$P_{moy} = 2.7MW$ |
|  | 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 | $\Delta V_{max} \leq 50V$ ,<br>$\Delta \Phi \leq 2^\circ$    |
| 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?   |  |

# Matrice de vérification des exigences

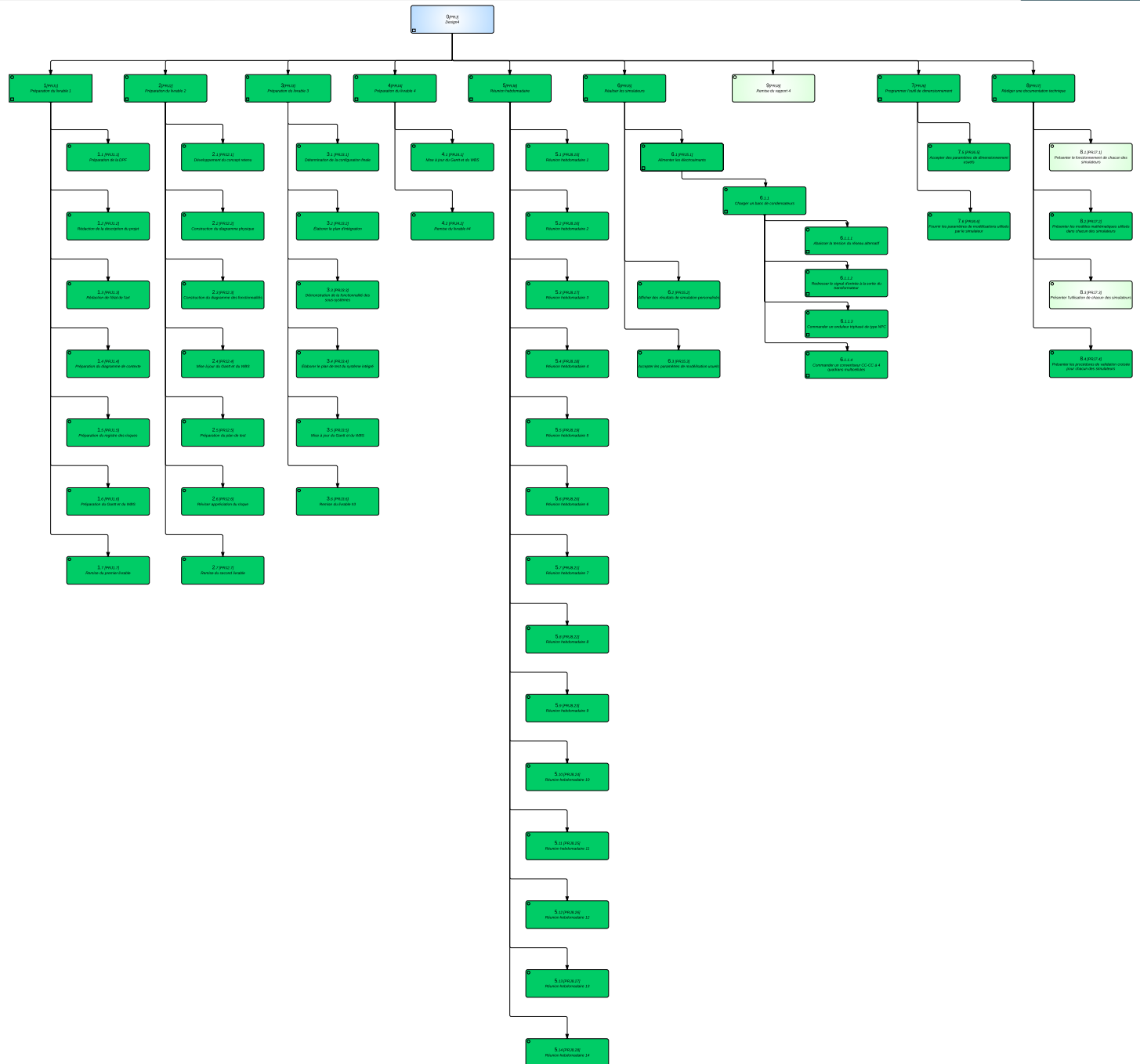
| Niveau   | Sous-niveau   | Méthode d'analyse   | Spécification   | Performance   | Marge  | Commentaires  |
|--|---|---|---|---|--|---|
| Phase 1: Modélisation convertisseur 4 quadrants de base  | Commander un convertisseur CC-CC à 4 quadrants                            | Comparaison du courant dans la charge par rapport au courant de référence   | $\Delta I \leq 25A$                                       | $\pm 10A$   | $\pm 15A$  | Superposition du courant à la charge sur SPS et PSIM, amplitude et fréquence                          |
|  | Accepter des paramètres de modélisation                                   | 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                                | Comparaison du courant dans la charge par rapport au courant de référence   | $\Delta I \leq 25A$                                       | $\pm 10A$   | $\pm 15A$  |   |
|  | Alimenter les électroaimants de l'accélérateur de particules              | Comparaison du courant dans la charge par rapport au courant de référence et comparaison de la tension moyenne avec courbe de référence                             | $\Delta I \leq 25A$                                       | $\pm 15A$   | $\pm 10A$  |   |
|  | Afficher des résultats de simulation personnalisés                        | 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   | Courbe de charge stable avec temps de charge minimal  | $t \leq 2s$ , $P_{max} \leq 3.6MW$ , $P_{moy} \leq 2.7MW$ | $t = 0.31s$ , $P_{moy} = 2.53MW$ et $P_{max} = 3.55MW$ pour PSIM, $P_{moy} = 2.58MW$ et $P_{max} = 3.56MW$ pour SPS | $\Delta t = 1.69s$ , $\Delta P_{moy} = -0.17MW$ , $\Delta P_{max} = -0.04MW$ | 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                | 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 | $\Delta V_{max} \leq 50V$ , $\Delta \Phi \leq 2^\circ$    | $\Delta V_{max} = 0.2$ , $\Delta \phi = 0.3$  | $49.8V$ , $1.7^\circ$  |   |
| Phase 4: Outil de dimensionnement  | Accepter des paramètres de dimensionnement usuels                         | Oui/Non le critère est-il rempli?   |   | Oui   |  |   |
|  | Fournir les paramètres de modélisation utilisés par le simulateur         | Oui/Non le critère est-il rempli?   |   | Oui   |  |   |
| Phase 5: Documentation technique   | Présenter les procédures de validation croisées de chacun des simulateurs | Oui/Non le critère est-il rempli?   |   | Oui   |  |   |
|  | Présenter l'utilisation de chacun des simulateurs                         | Oui/Non le critère est-il rempli?   |   | Oui   |  |   |
|  | Présenter les modèles mathématiques utilisés dans chacun des simulateurs  | Oui/Non le critère est-il rempli?   |   | Oui   |  |   |

# Gantt





# WBS



# Améliorations proposées

- ▶ Méthode de contrôle RST à investiguer pour obtenir une précision similaire au CERN
- ▶ Optimisation de la commande pour l'AFE 3 niveaux (contrôle du courant maximal et contrôle de phase)
- ▶ Intégration du convertisseur (CA/CC) au niveau charge

