

Simulation d'une alimentation des electroaimants d'un accélérateur de particules.

Par l'équipe Électrosim

Contexte et problématique

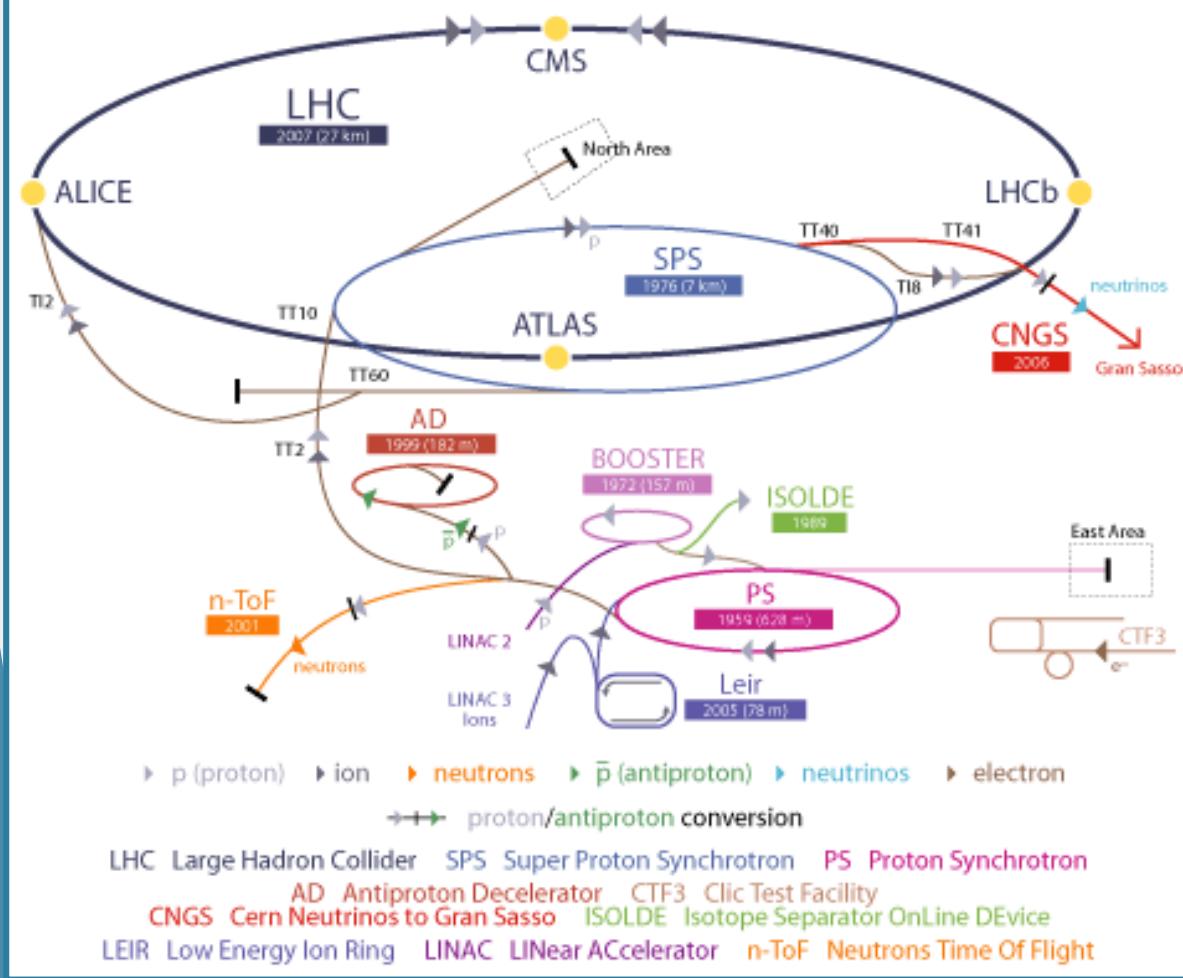
Clients du projet



- ▶ 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 LEEPCL 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 le développement de simulateurs temps réel PC/FPGA

Complexe du CERN

Le complexe d'accélérateurs du CERN



- Le complexe d'accélérateurs du CERN est composé de différentes sous-sections ayant pour objectifs :
 - accélérer des faisceaux de particules jusqu'à la vitesse de la lumière
 - augmenter la masse des particules
 - étudier les collisions jusqu'à ~8 TeV

LHC Large Hadron Collider SPS Super Proton Synchrotron PS Proton Synchrotron

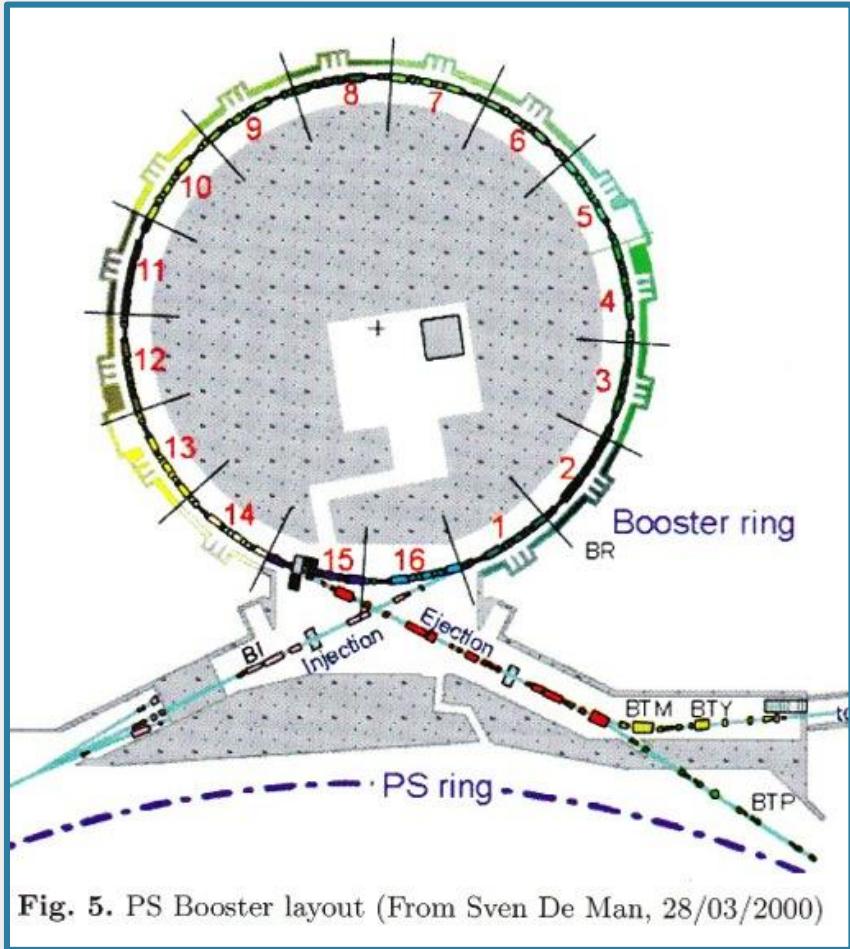
AD Antiproton Decelerator CTF3 Clic Test Facility

CNGS Cern Neutrinos to Gran Sasso ISOLDE Isotope Separator OnLine DEvice

LEIR Low Energy Ion Ring LINAC Linear ACcelerator n-ToF Neutrons Time Of Flight

Source: http://project-integration-accelerateurs.web.cern.ch/project-Integration-Accelerateurs/frame_integration.htm

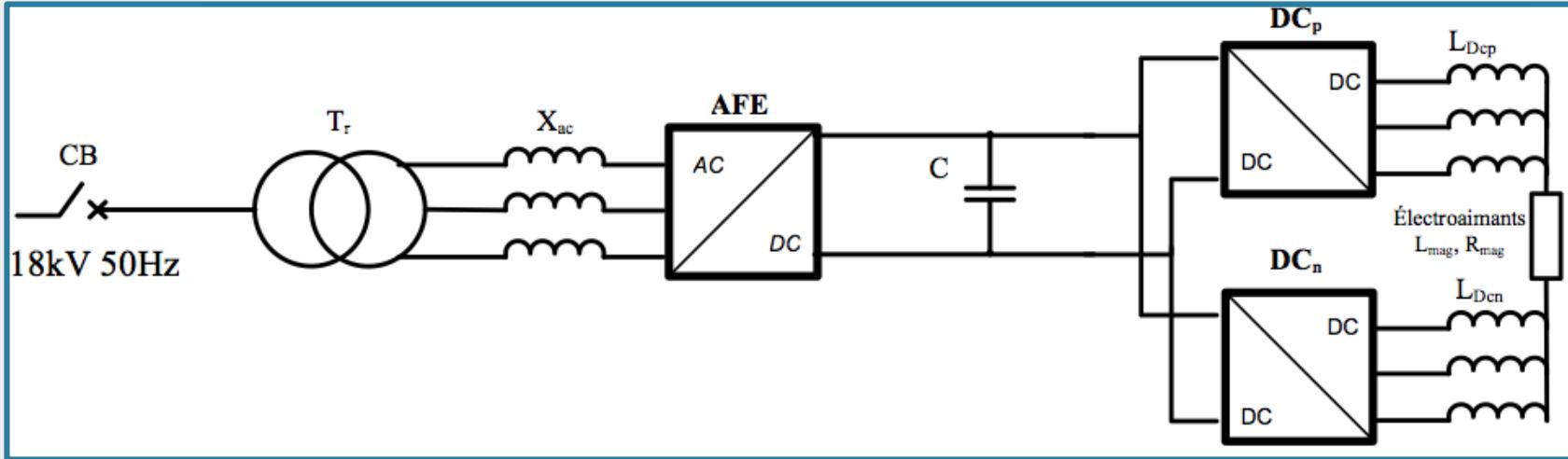
Booster du Synchrotron à protons (PS-Booster)



- ▶ Le Booster du Synchrotron à protons (construit en 1972) est constitué de 4 anneaux superposés.
- ▶ Accélère actuellement les particules provenant du Linac-2 jusqu'à 1.4GeV
 - ▶ Les particules sont accélérées avec la combinaison d'un champ électrique pulsé haute fréquence et d'un champ magnétique créé par des électroaimants bipolaires et quadripolaires.
 - ▶ Le projet porte sur l'alimentation des électroaimants.
- ▶ Des travaux sont en cours pour changer l'injecteur (Linac-2 50MeV) vers le Linac-4 160MeV.
- ▶ Le CERN désire augmenter l'énergie des particules à 2GeV
 - ▶ L'alimentation principale des électroaimants doit être changée afin de fournir (6MW en moyenne et 18MW crête)
 - ▶ Les électroaimants de l'accélérateur doivent être modifiés pour remplir la nouvelle spécification

Source: <http://psb-machine.web.cern.ch/psb-machine/>

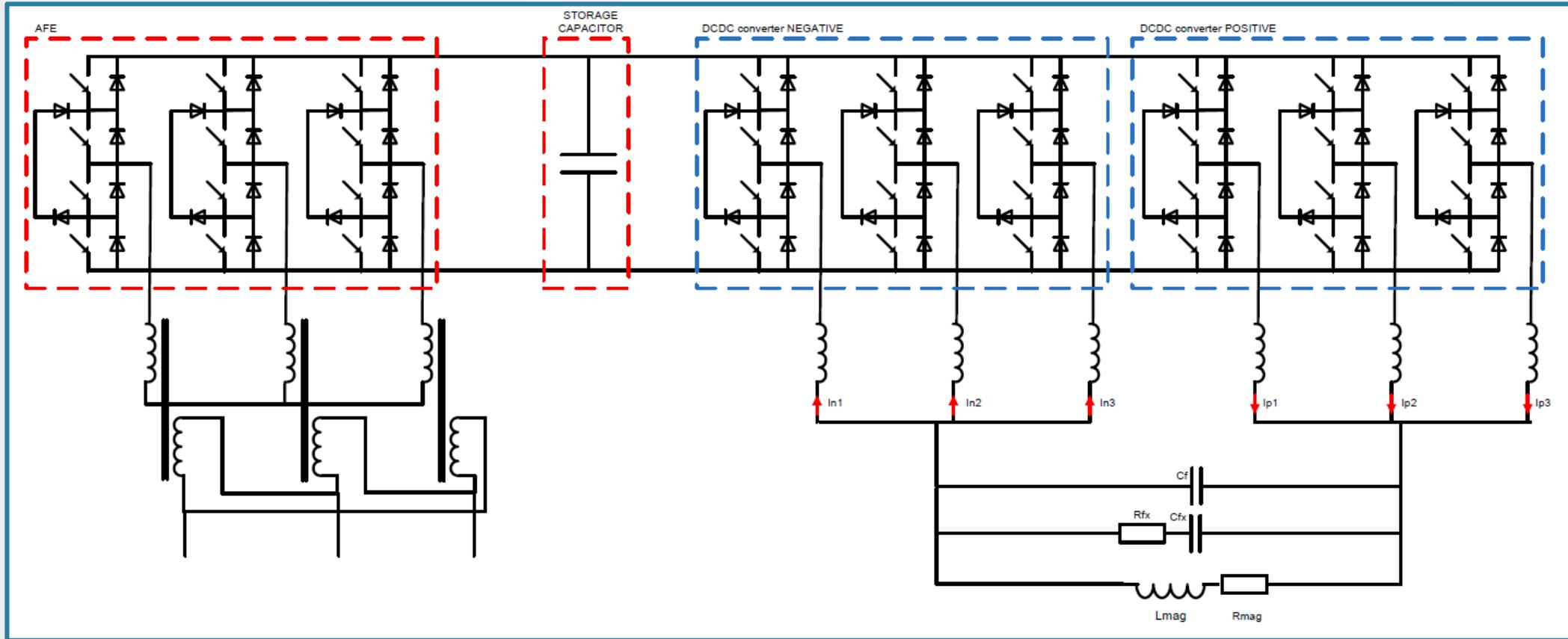
Nouvelle alimentation du PS-Booster



Source P. Viarouge

- ▶ Le réseau alternatif du Booster possède une tension de 18kV qui sera abaissée par un transformateur à 2kV (2.5MVA).
- ▶ L'AFE (Active Front End) est un redresseur constitué de cellules de base NPC (Neutral Point Clamped voir *diapositive suivante*).
- ▶ Le condensateur C est un grand banc de capacités de stockage de 300mF permettant de fournir la puissance excédentaire requise, car le réseau est limité à 3.6MW crête.
- ▶ DC_p et DC_n constituent un convertisseur CC-CC à 4 quadrants permettant d'alimenter les électroaimants du PS-Booster avec forme de courant précise (détailée plus loin). Dois fournir une puissance crête de 18MW à une série d'électroaimants correspondant à une charge de 0.1H et de 0.28Ω.
- ▶ Les 3 phases des cellules NPC du convertisseur CC-CC sont associées par les inductances de découplage (permettant aux différentes cellules d'alimenter simultanément l'électroaimant)

Nouvelle alimentation du PS-Booster



Source P. Viarouge

Cellule NPC de base

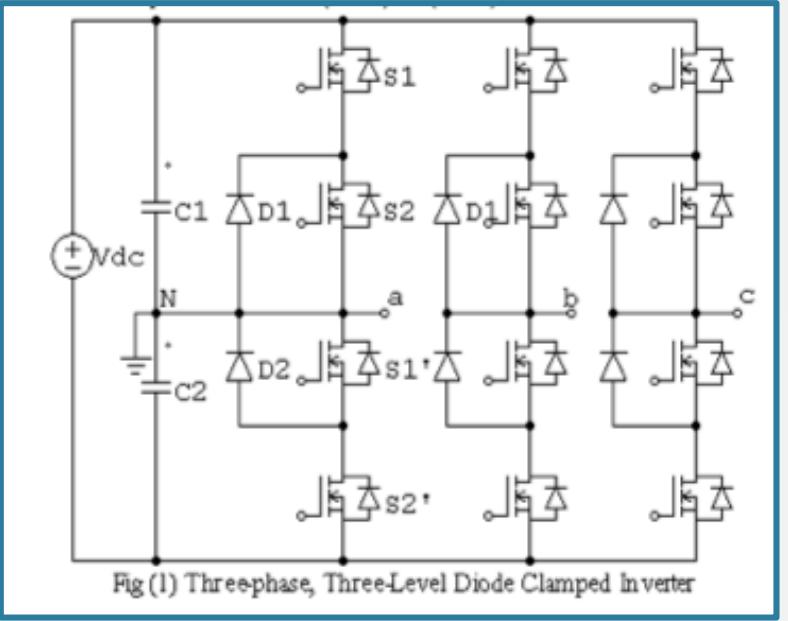


Figure 1 du document Modeling, Simulation and Analysis of Three-Level Neutral Point Clamped Inverter Using Matlab/Simulink/Power System Blockset

- ▶ Les cellules NPC de base employées dans l'alimentation du PS-Booster sont constituées de 3 bras.
 - ▶ Chaque bras est constitué de 4 transistors (IGBT) et de 2 diodes pour obtenir 5 niveaux de tensions distincts (-2Vdc,-Vdc,0,Vdc,2Vdc)
 - ▶ Il est possible de moduler le temps de conduction afin d'interpoler les niveaux (voir figure à gauche)
- ▶ La commande d'une cellule NPC de base utilise une modulation temporelle par vecteurs (voir diapositive suivante)
 - ▶ La fréquence de hachage est limitée à 333Hz, pour des considérations d'usure des composantes.
 - ▶ La fréquence de MLI est de 1kHz
 - ▶ La commande des IGBT est décalée de 120°

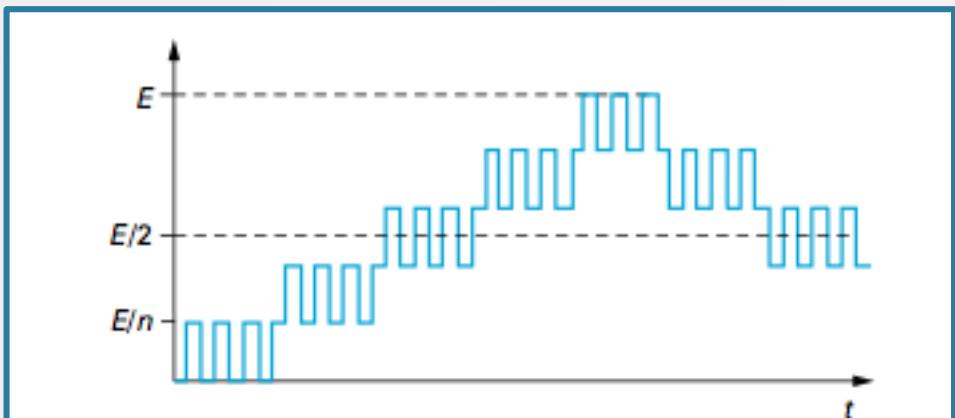


Figure 10 du document D3176, Techniques de l'ingénieur

Commande d'un bloc NPC

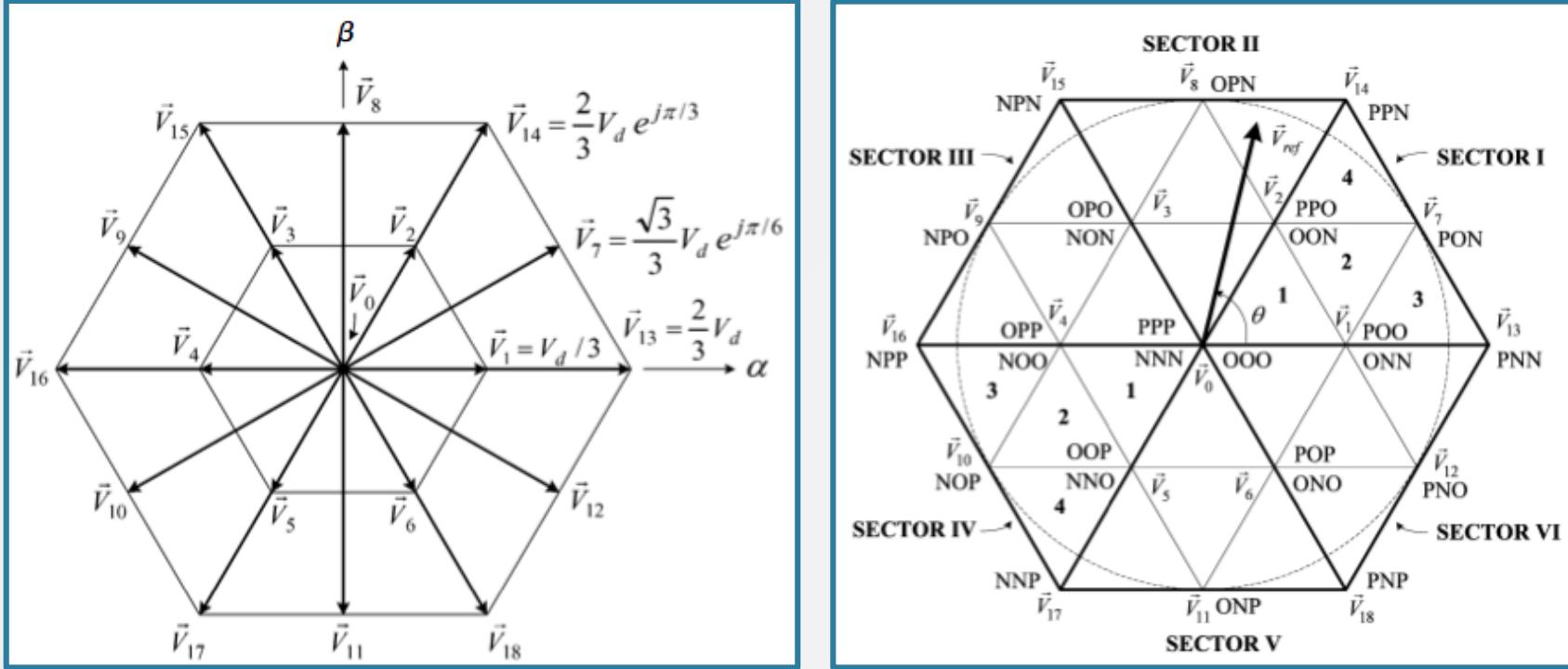
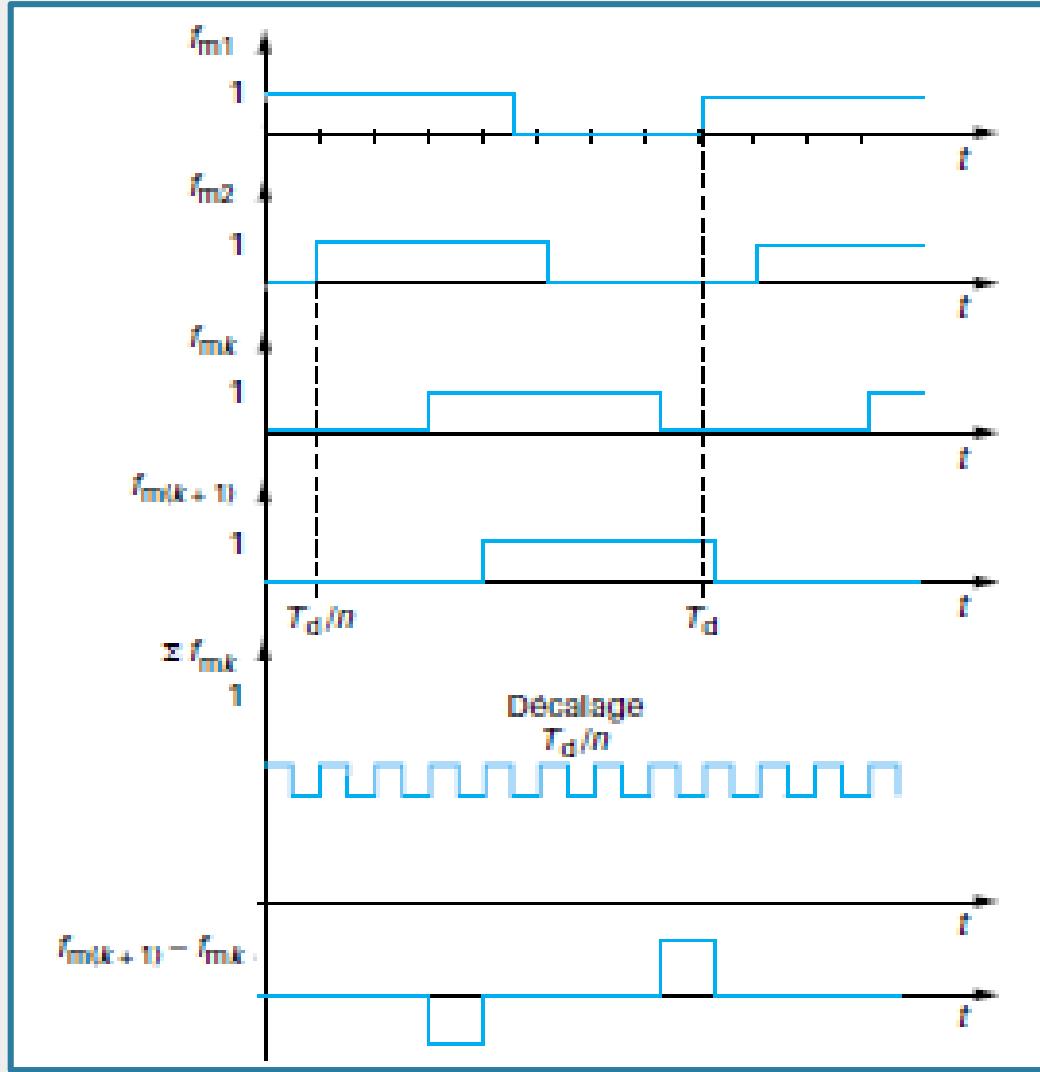


Figure 8.3-1 et 8.3-2 tirées du livre High Power Converters and AC Drives, Bin Wu, éditions IEEE press.

- ▶ Les états P,O,N correspondent à la conduction d'une des paires possibles d'IGBT d'une phase (ABC) donnée
- ▶ Les combinaisons de conductions des paires, combinées à de la modulation temporelle permettent de produire une forme de tension de sortie précise.
- ▶ Ce type de commande offre une très grande diversité de forme d'onde de sortie.

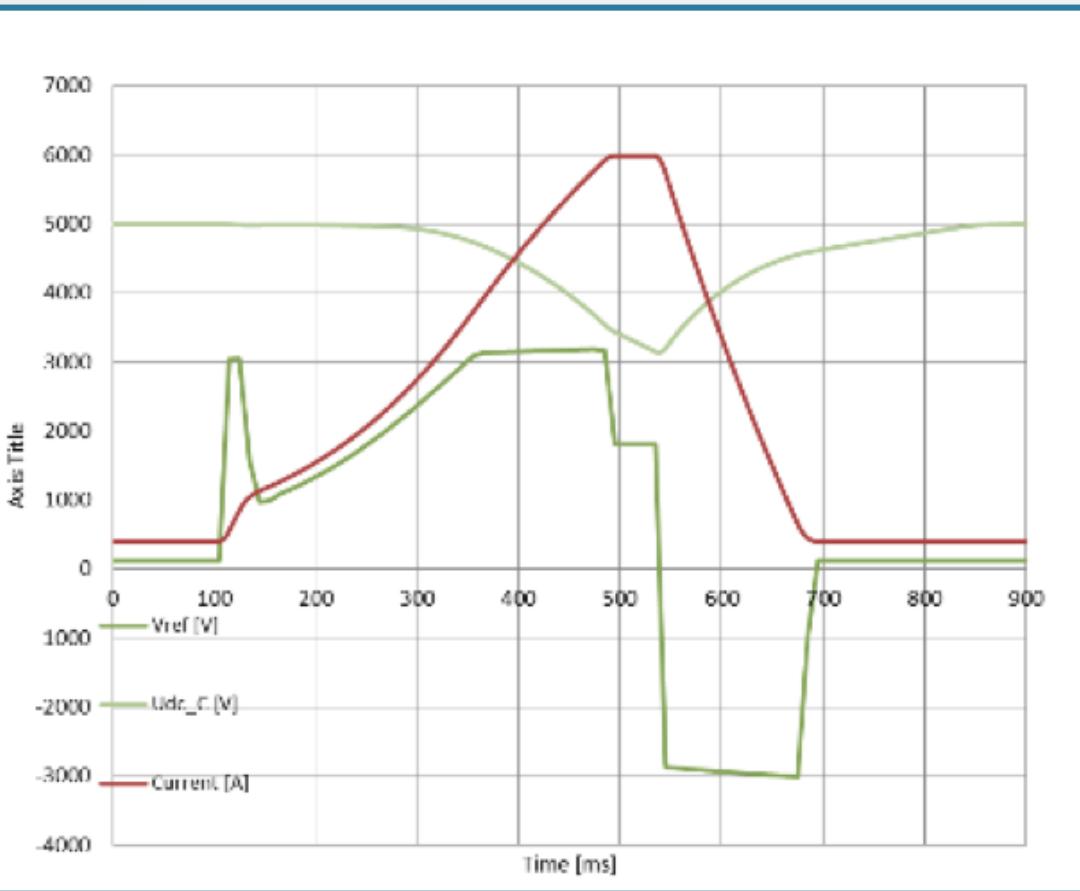
Commande d'un bloc NPC



- ▶ La figure de gauche présente la commande décalée telle qu'appliquée aux bras des onduleurs du projet.
- ▶ On remarque que la fréquence de commutation des IGBT est 3 fois plus petite que la fréquence de modulation en sortie.
- ▶ Si l'on considère la phase A (qui commence à $t=0$), lors de son prochain amorçage, il se sera écoulé 3 combinaisons d'états:
 - ▶ [POO],[PPO],[PPP]
- ▶ Le décalage des commandes permet de tripler la fréquence de sortie, en maximisant la durée de vie des composantes.

Figure 16 du document D3176, Techniques de l'ingénieur

Convertisseur CC-CC 4 quadrants



Source P.Viarouge

- ▶ La figure de gauche présente une impulsion envoyée aux électroaimants
- ▶ La courbe rouge présente le courant dans l'électroaimant contrôlé par le convertisseur CC-CC 4 quadrants.
 - ▶ On remarque que le courant est strictement positif
- ▶ La courbe vert foncé représente la tension aux bornes de l'aimant
 - ▶ On remarque que l'aimant absorbe de la puissance pendant la phase de montée du courant et réinjecte de la puissance dans le condensateur lors de la phase de descente du courant.
- ▶ La courbe vert pâle représente la tension aux bornes du condensateur
 - ▶ Quand le réseau ne suffit plus à fournir la puissance, le condensateur se décharge afin de fournir la puissance excédentaire

Objectifs

- ▶ Livrer 3 outils de dimensionnement
 - ▶ Convivial
 - ▶ Utilise des paramètres usuels
- ▶ Livrer 3 outils de simulation
 - ▶ Vont valider que la conception choisie est fonctionnelle
 - ▶ Vont comparer différents paramètres de dimensionnement
 - ▶ Matlab (Simulink)
 - ▶ Outil de simulation générique. Permet de simuler tout type de circuits, toutefois ce côté générique cause des temps de simulation beaucoup plus longs pour une même précision comparée à des simulateurs spécifiques. Problématique au niveau des variations rapides.
 - ▶ PSIM
 - ▶ PSIM est spécialement conçu pour les circuits d'électronique de puissance et des contrôles de moteur tandis que les simulateurs génériques sont conçus pour les circuits électriques de base. Ceci permet une meilleure rapidité et une meilleure précision.
 - ▶ Opal-RT
 - ▶ Simulateur en temps réel, permet une comparaison directe avec le procédé implanté. Meilleur pour les tests d'intégration (Pas de simulation : > 10 µs dans le cas du HYERSIM). Permet de réaliser une simulation en temps réel à partir d'un fichier de simulation Matlab.
 - ▶ Implantation du procédé de façon pratique (comme un circuit électrique) au lieu d'une résolution d'équation mathématique comme les simulateurs hors-ligne.

Objectifs

- ▶ Documenter le fonctionnement des outils de dimensionnement et de simulation
 - ▶ Présenter des exemples d'utilisation
- ▶ Implanter une validation croisée des 3 simulateurs
 - ▶ Permet de compenser les faiblesses de chacun des simulateurs
 - ▶ Simulateur Temps-Réel :
 - ▶ Meilleure comparaison avec le procédé réel du fait de sa structure de simulation
 - ▶ Simulateur hors-ligne (Simulink, PSIM):
 - ▶ Permet de valider les modèles mathématiques utilisés dans la conception de l'alimentation
 - ▶ Possibilité de différences marquées entre les deux types de simulateurs
 - ▶ Choix de la meilleure implantation à l'aide de tests pratiques.

Exigences du client (1/2)

- ▶ Modéliser une cellule de base d'un onduleur triphasé à 3 niveaux de type NPC
- ▶ Modéliser la commande dans le cas de l'onduleur de type AFE.
- ▶ Implanter le modèle de la configuration de base d'un onduleur triphasé à 3 niveaux NPC dans un simulateur
- ▶ Implanter le modèle de la commande dans le cas de l'onduleur de type AFE dans un simulateur
- ▶ Fournir un outil de dimensionnement pour l'onduleur de type AFE
- ▶ Modéliser un convertisseur CC-CC à 4 quadrants à l'aide de plusieurs cellules de type onduleur NPC
- ▶ Modéliser la commande d'un convertisseur CC-CC à 4 quadrants

Exigences du client (2/2)

- ▶ 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
- ▶ Implanter le modèle de la commande d'un convertisseur CC-CC à 4 quadrants alimentant la charge spécifiée dans un simulateur
- ▶ Fournir un outil de dimensionnement pour le convertisseur CC-CC à 4 quadrants
- ▶ Implanter le modèle complet de l'alimentation du Booster
- ▶ Effectuer la validation croisée des configurations implantées à l'aide de 3 simulateurs (PSIM, SimPowerSystems, Opal-RT)
- ▶ Livrer une documentation pédagogique pour les divers outils de dimensionnement et de simulation

Méthodologie planifiée (1/3)

Gestion

- ▶ Réunions hebdomadaires
- ▶ Tâches de chacun des membres sont tenues à jour au moyen d'un fichier excel de gestion hebdomadaire
 - ▶ Gain en souplesse et en efficacité de gestion
 - ▶ Adapté pour la taille de l'équipe
 - ▶ Maximise l'efficacité des réunions
- ▶ Mise à jour de révision et suivi effectué au moyen de la plateforme GitHub
 - ▶ Données sécurisées sur un serveur privé
 - ▶ Permet le travail collaboratif
 - ▶ Multi-plateforme

Méthodologie planifiée (2/3)

Réalisation pratique

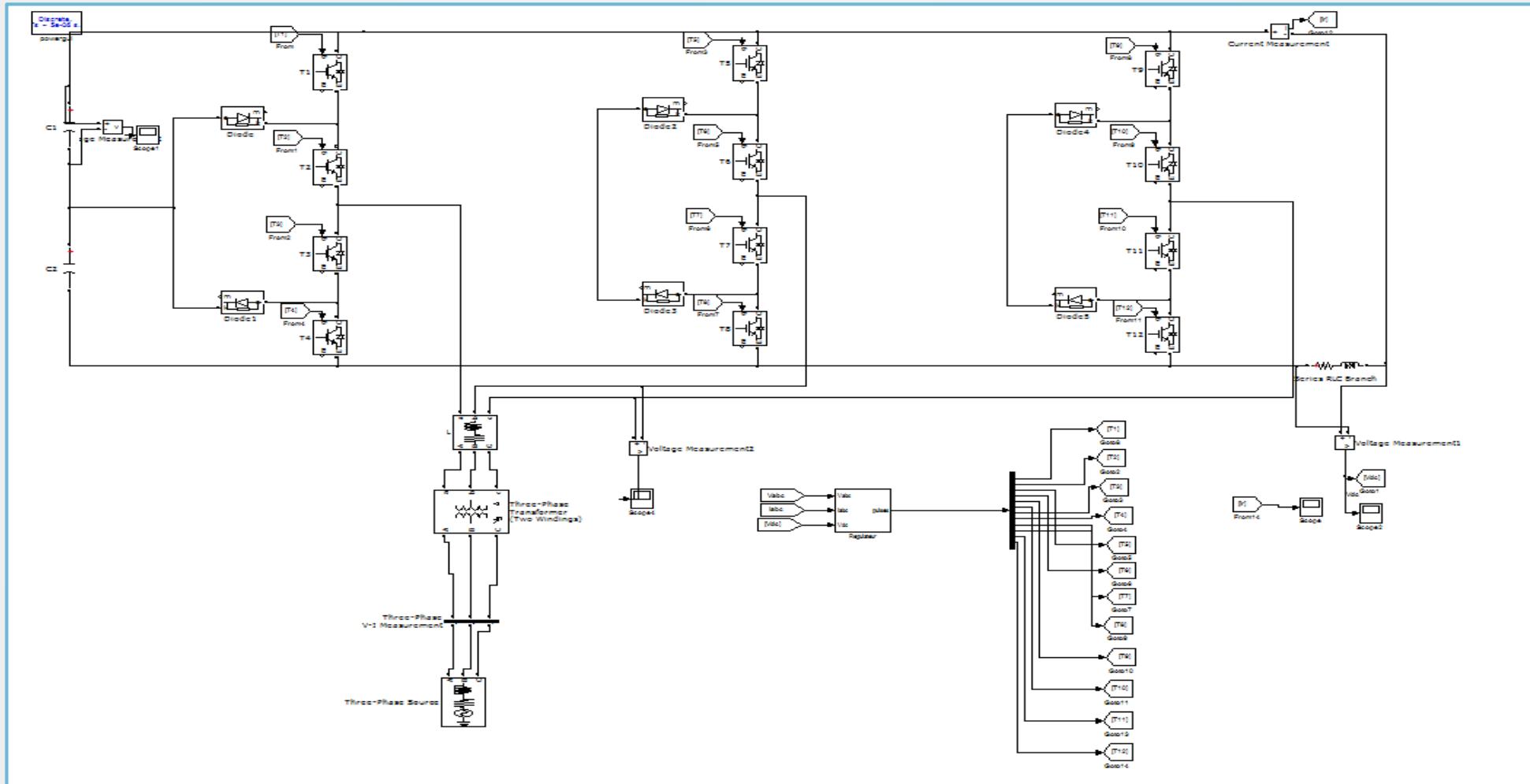
- ▶ Modélisation de chacune des composantes en employant d'abord les modèles idéaux, puis en y ajoutant des caractéristiques linéaires et non linéaires jusqu'à représenter, de manière la plus exacte possible (en prenant en compte les limitations techniques liées à l'exécution du simulation), le comportement de la composante en question
- ▶ Intégration du modèle de composante dans un sous-bloc paramétrable et aisément duplicable
 - ▶ Essais sur les différents simulateurs pour valider le comportement
- ▶ Intégration des différents modèles de composantes de manière à réaliser le redresseur NPC
- ▶ Modélisation d'une commande “Multilevel Space Vector PWM” et intégration au redresseur NPC
 - ▶ Essais sur les différents simulateurs pour valider le comportement

Méthodologie planifiée (3/3)

- ▶ Réalisation d'une boucle de contrôle permettant de maintenir la tension aux bornes de la banque de condensateurs constante selon l'appel de puissance
 - ▶ Essais sur les différents simulateurs pour valider le comportement
- ▶ Adaptation du redresseur de manière à le convertir en onduleur pour le convertisseur 4 cadrans
- ▶ Adaptation de la commande pour le convertisseur 4 cadrans
- ▶ Réalisation d'une boucle de contrôle globale permettant de réinjecter la puissance des électroaimants dans le réseau
 - ▶ Essais sur les différents simulateurs pour valider le comportement

État de la situation (1/2)

Schéma d'un redresseur NPC à 3 niveaux de base



État de la situation (2/2)

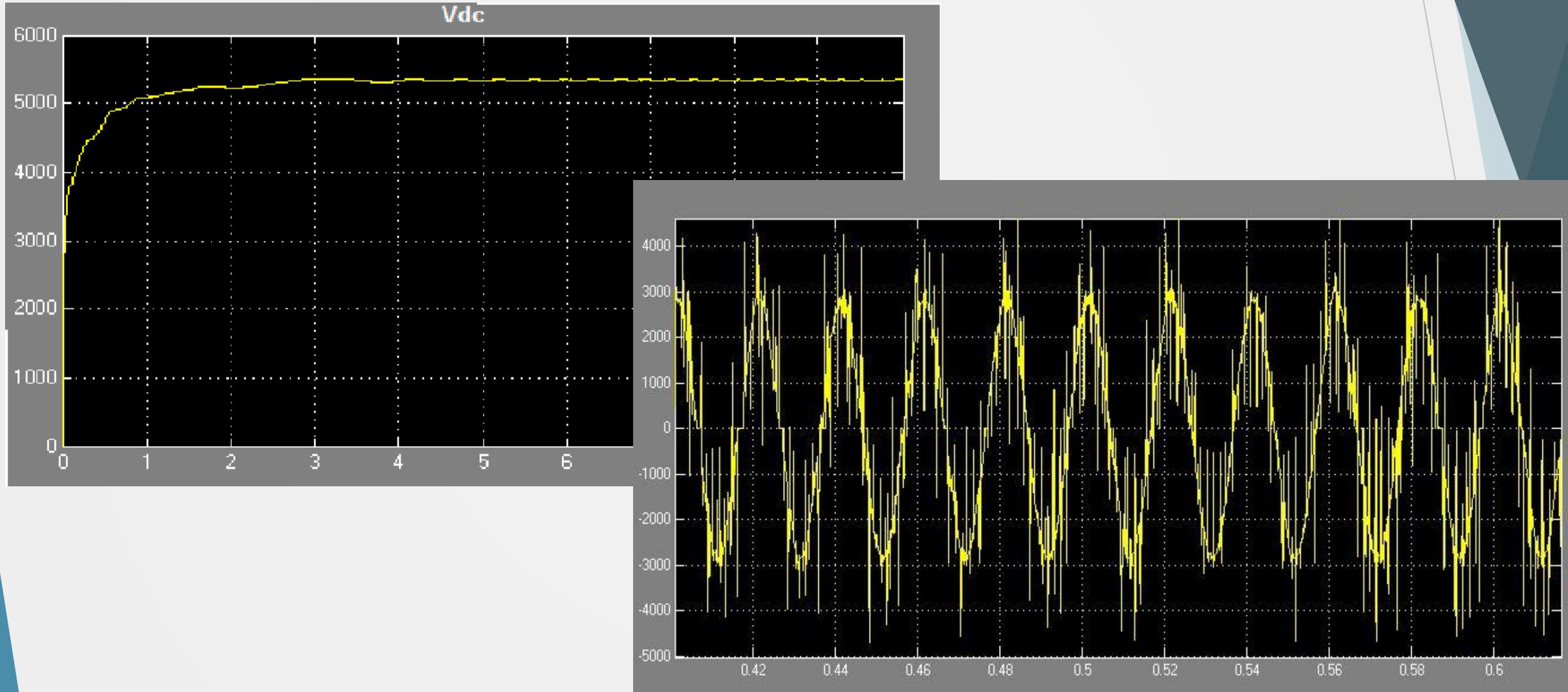


Diagramme de contexte

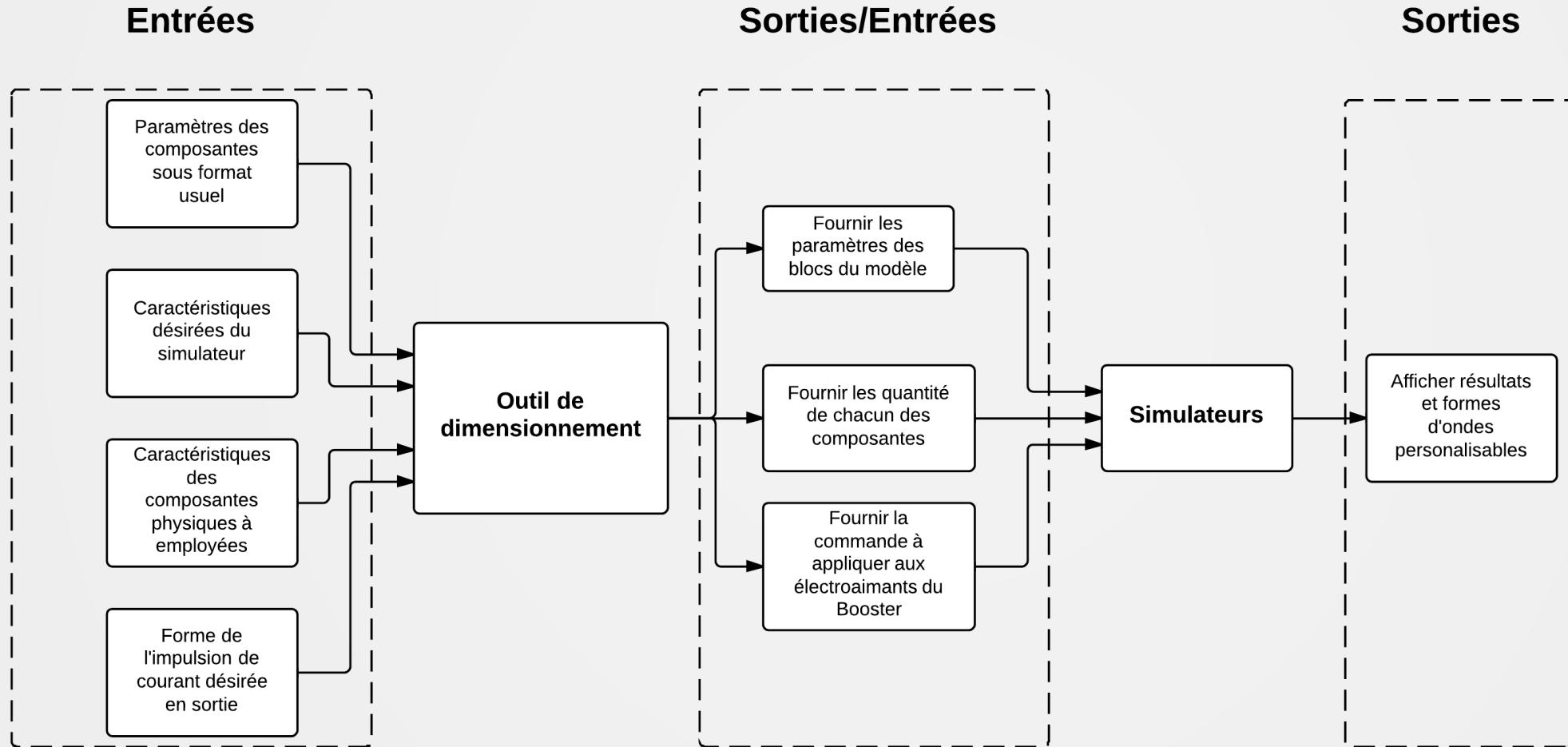


Diagramme des propriétés fonctionnelles

*Version complète à la fin

- ▶ Fonctionnalités rattachées au simulateur (1/2)
 - ▶ Accepter des paramètres de modélisation
 - ▶ Abaisser la tension du réseau alternatif
 - ▶ Rendement (%), Ratio (%)
 - ▶ Redresser le signal d'entrée à la sortie du transformateur
 - ▶ Ondulation de tension (%)
 - ▶ Niveau moyen (kV)
 - ▶ Rendement (%)
 - ▶ Puissance moyenne (MW)
 - ▶ Puissance crête (MW)

Diagramme des propriétés fonctionnelles

*Version complète à la fin

- ▶ Fonctionnalités rattachées au simulateur (2/2)
 - ▶ Commander un onduleur triphasé de type NPC
 - ▶ Effort du contrôleur (% par seconde de la variation de la commande)
 - ▶ Charger un banc de condensateur
 - ▶ Temps de charge (s)
 - ▶ Commander un convertisseur CC-CC à quatre quadrants multicellules
 - ▶ Effort du contrôleur (% par seconde de la variation de la commande)
 - ▶ Alimenter les électroaimants de l'accélérateur de particules
 - ▶ Rendement (%)
 - ▶ Ondulation de courant (%)
 - ▶ Ondulation de tension (%)
 - ▶ Puissance moyenne (MW)
 - ▶ Puissance crête (MW)
 - ▶ Afficher les résultats de simulation personnalisés
 - ▶ Convivialité (1 à 5)

Diagramme des propriétés fonctionnelles

*Version complète à la fin

► Outil de dimensionnement

- ▶ Accepter des paramètres de dimensionnement usuels
 - ▶ Choix disponibles (1 à 5)
- ▶ Déterminer le nombre de composantes nécessaires dans les cellules de type NPC
- ▶ Déterminer les valeurs des condensateurs utilisés dans les cellules de type NPC
- ▶ Déterminer les valeurs des inductances de découplage
- ▶ Déterminer le nombre de cellules de type NPC nécessaire
- ▶ Fournir les paramètres de modélisation utilisé par le simulateur
 - ▶ Convivialité et choix disponibles (1 à 5)

Diagramme des propriétés fonctionnelles

*Version complète à la fin

► Documentation

- ▶ Présenter le fonctionnement de l'outil de dimensionnement de chacun des simulateurs
 - ▶ Précision de l'information et convivialité (1 à 5)
- ▶ Présenter les modèles mathématiques utilisés dans chacun des simulateurs
- ▶ Présenter l'utilisation de chacun des simulateurs
 - ▶ Précision de l'information et convivialité (1 à 5)
- ▶ Présenter les procédures de validation croisées de chacun des simulateurs
 - ▶ Présentation de l'information et convivialité (1 à 5)

Diagramme des propriétés fonctionnelles

- ▶ Objectifs de performances
 - ▶ Minimiser le temps de simulation
 - ▶ Maximiser la précision des simulations
 - ▶ Minimiser la complexité d'utilisation du simulateur et de l'outil de dimensionnement
 - ▶ Maximiser la qualité et la précision de la documentation

Registre des risques (1/3)

Type de risque	Niveau de priorité (1 faible, 5 élevé)	Conséquence de l'occurrence du risque	Coût en performance associé au risque	Probabilité d'occurrence	Plan de réduction du risque	Responsable du risque
Maladies ou incapacité d'un membre à continuer le projet	1	Travail en surplus à exécuter	Retard sur le projet	10%	Répartir le travail dans l'équipe	Daniel Thibodeau
Délai de livraison du simulateur en temps réel non respecté	5	Impossibilité de faire la simulation en temps réel	Échéancier du projet non respecté	10%	Maintenir une communication efficace avec le LEEPCL dans l'optique de se servir du simulateur dès son arrivée	Gabriel Boivin
Pertes des données liées aux simulateurs	5	Retard sur le projet mineur s'il existe une révision récente et retards majeurs dans le cas échéant	Certains objectifs ne seront pas atteints dans les temps initiaux prescrits	20%	S'assurer de bien maintenir les révisions à jour, travaille collaboratif mis fréquemment à jour et dont les changements sont réversibles au moyen d'une synchronisation sur un serveur web protégé (GitHub)	Francis Valois

Registre des risques (2/3)

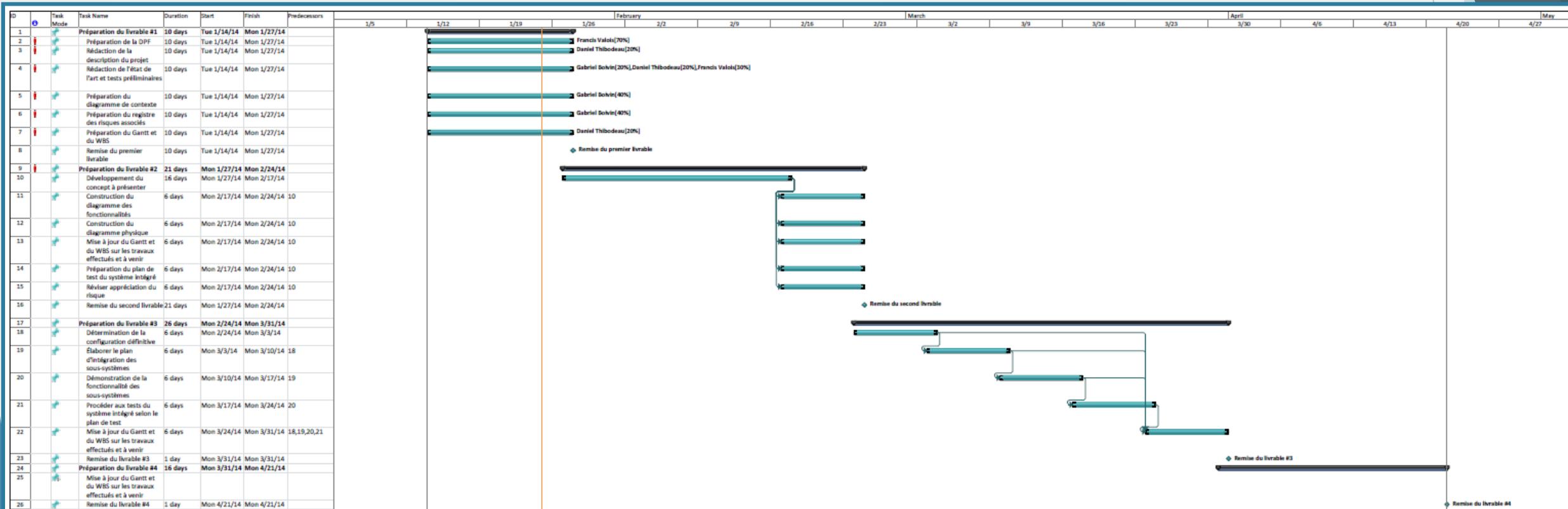
Type de risque	Niveau de priorité (1 faible, 5 élevé)	Conséquence de l'occurrence du risque	Coût en performance associé au risque	Probabilité d'occurrence	Plan de réduction du risque	Responsable du risque
Pertes des données liées aux simulateurs	5	Retard sur le projet mineur s'il existe une révision récente et retards majeurs dans le cas échéant	Certains objectifs ne seront pas atteints dans les temps initiaux prescrits	20%	S'assurer de bien maintenir les révisions à jour, travaille collaboratif mis fréquemment à jour et dont les changements sont réversibles au moyen d'une synchronisation sur un serveur web protégé (GitHub)	Francis Valois
Versions de développement et d'utilisation différentes de Matlab	4	Certaines fonctionnalités du simulateur en temps réel ne pourraient pas concorder, certains modules de simulink ou certaines fonctionnalités de Matlab pourraient ne pas être compatibles	Incapacité de fournir un simulateur fonctionnant explicitement comme décrit dans la documentation, besoin d'effectuer des modifications internes importantes, du côté du client, pour maintenir le fonctionnement désiré du simulateur	15%	Faire des tests à partir de différentes plateformes et à partir de différents systèmes d'exploitation de manière à s'assurer l'homogénéité dans le fonctionnement de Matlab	Francis Valois

Registre des risques (3/3)

Type de risque	Niveau de priorité (1 faible, 5 élevé)	Conséquence de l'occurrence du risque	Coût en performance associé au risque	Probabilité d'occurrence	Plan de réduction du risque	Responsable du risque
Disconcordance dans les versions de PSIM	3	Certaines fonctionnalités du simulateur implanté sur PSIM pourraient être différentes selon la version employée.	Différence dans les résultats produits à partir du simulateur implanté sur PSIM, il se peut que les résultats ne concordent plus avec les autres simulateurs	10%	Tester le simulateur sur le plus de versions différentes de PSIM	Gabriel Boivin
Utilisation entraînant une modification non désirée sur les simulateurs	3	Les simulations ne fonctionnent plus correctement	Le simulateur ne s'amorce plus correctement, les affichages ne sont plus fonctionnels, les données ne concordent plus	20%	Toujours garder plusieurs copies de la simulation à différentes étapes du projet et limiter l'utilisateur dans les manipulations potentiellement néfastes pour le fonctionnement du simulateur (avertissements dans la documentation)	Daniel Thibodeau

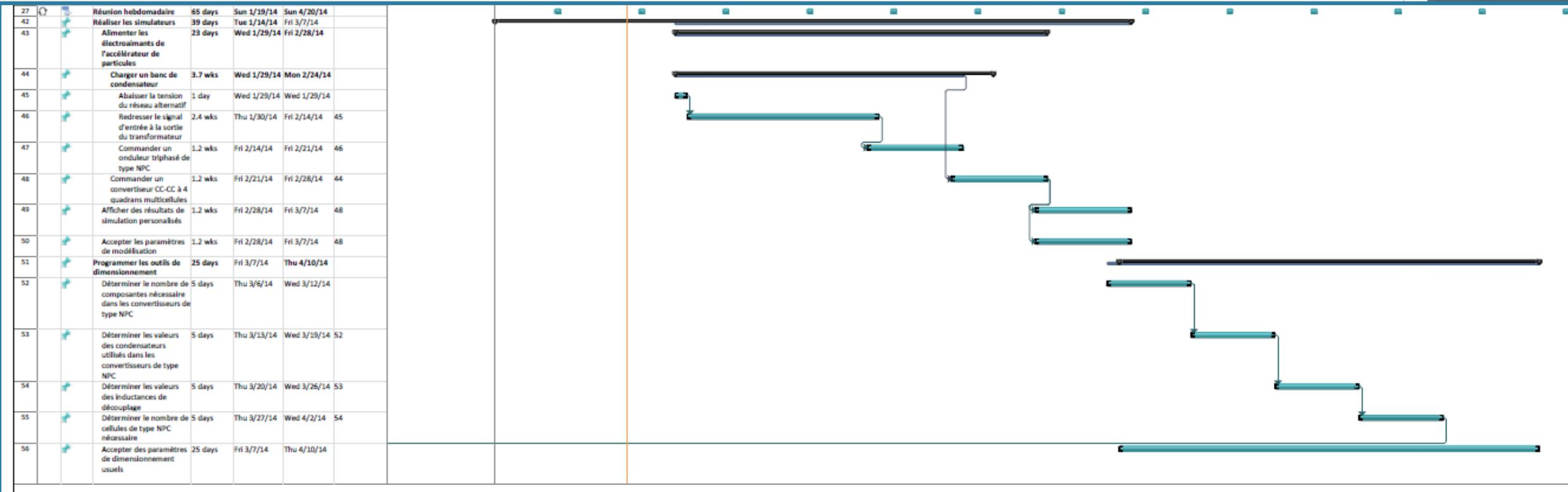
Gantt (1/2)

*Voir les dernières pages du PDF pour plus de précision



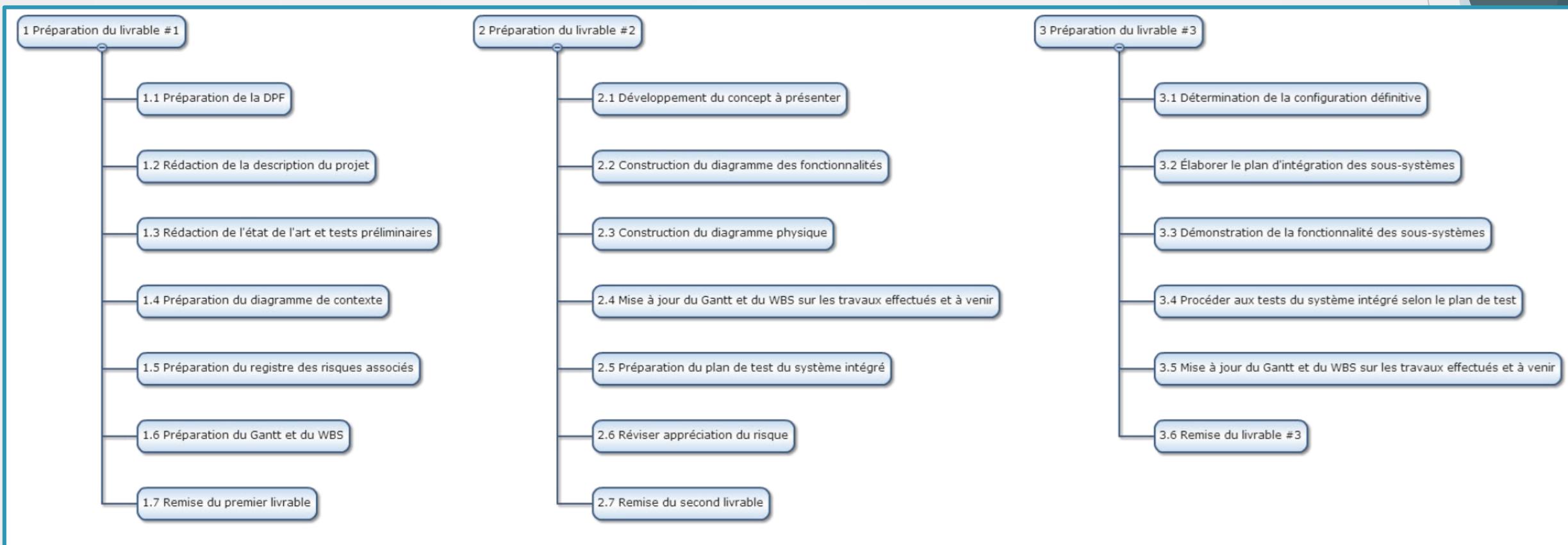
Gantt (2/2)

**Voir les dernières pages du PDF pour plus de précision*



WBS (1/3)

*Voir les dernières pages du PDF pour plus de précision



4 Préparation du livrable #4

- 4.1 Mise à jour du Gantt et du WBS sur les travaux effectués et à venir
- 4.2 Remise du livrable #4

5 Réunion hebdomadaire

- 5.1 Réunion hebdomadaire 1
- 5.2 Réunion hebdomadaire 2
- 5.3 Réunion hebdomadaire 3
- 5.4 Réunion hebdomadaire 4
- 5.5 Réunion hebdomadaire 5
- 5.6 Réunion hebdomadaire 6
- 5.7 Réunion hebdomadaire 7
- 5.8 Réunion hebdomadaire 8
- 5.9 Réunion hebdomadaire 9
- 5.10 Réunion hebdomadaire 10
- 5.11 Réunion hebdomadaire 11
- 5.12 Réunion hebdomadaire 12
- 5.13 Réunion hebdomadaire 13
- 5.14 Réunion hebdomadaire 14

6 Réaliser les simulateurs

- 6.1 Alimenter les électroaimants de l'accélérateur de particules
 - 6.1.1 Charger un banc de condensateur
 - 6.1.1.1 Abaisser la tension du réseau alternatif
 - 6.1.1.2 Redresser le signal d'entrée à la sortie du transformateur
 - 6.1.1.3 Commander un onduleur triphasé de type NPC
 - 6.1.2 Commander un convertisseur CC-CC à 4 quadrants multicellules
- 6.2 Afficher des résultats de simulation personnalisés
- 6.3 Accepter les paramètres de modélisation

WBS (1/3)

*Voir les dernières pages du PDF pour plus de précision

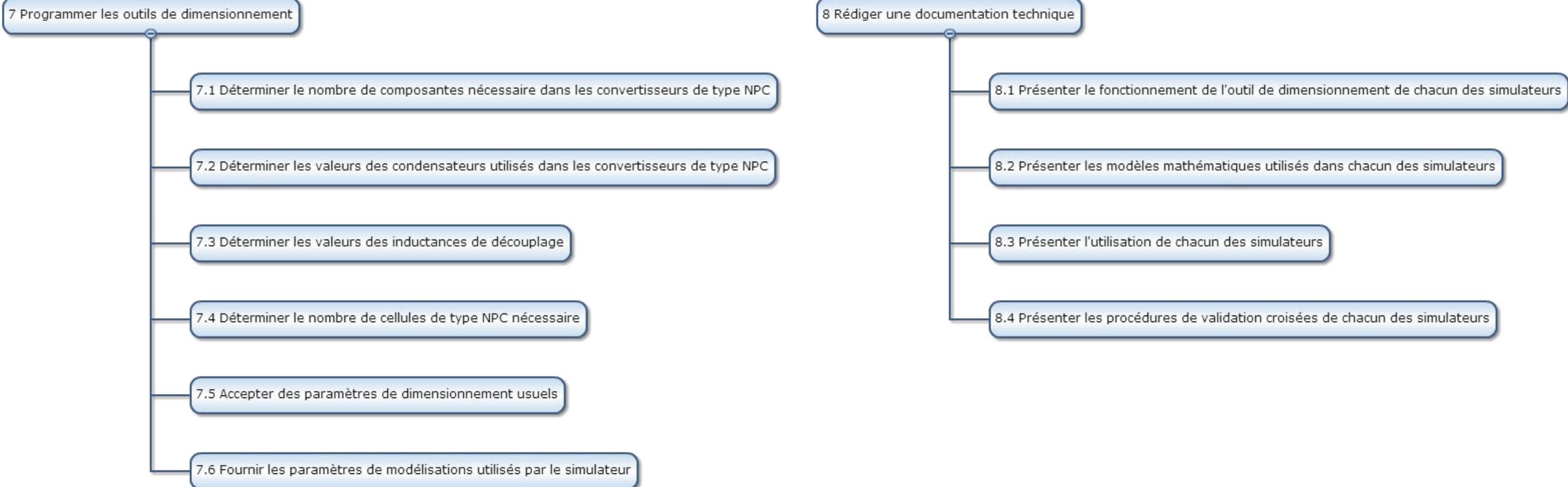
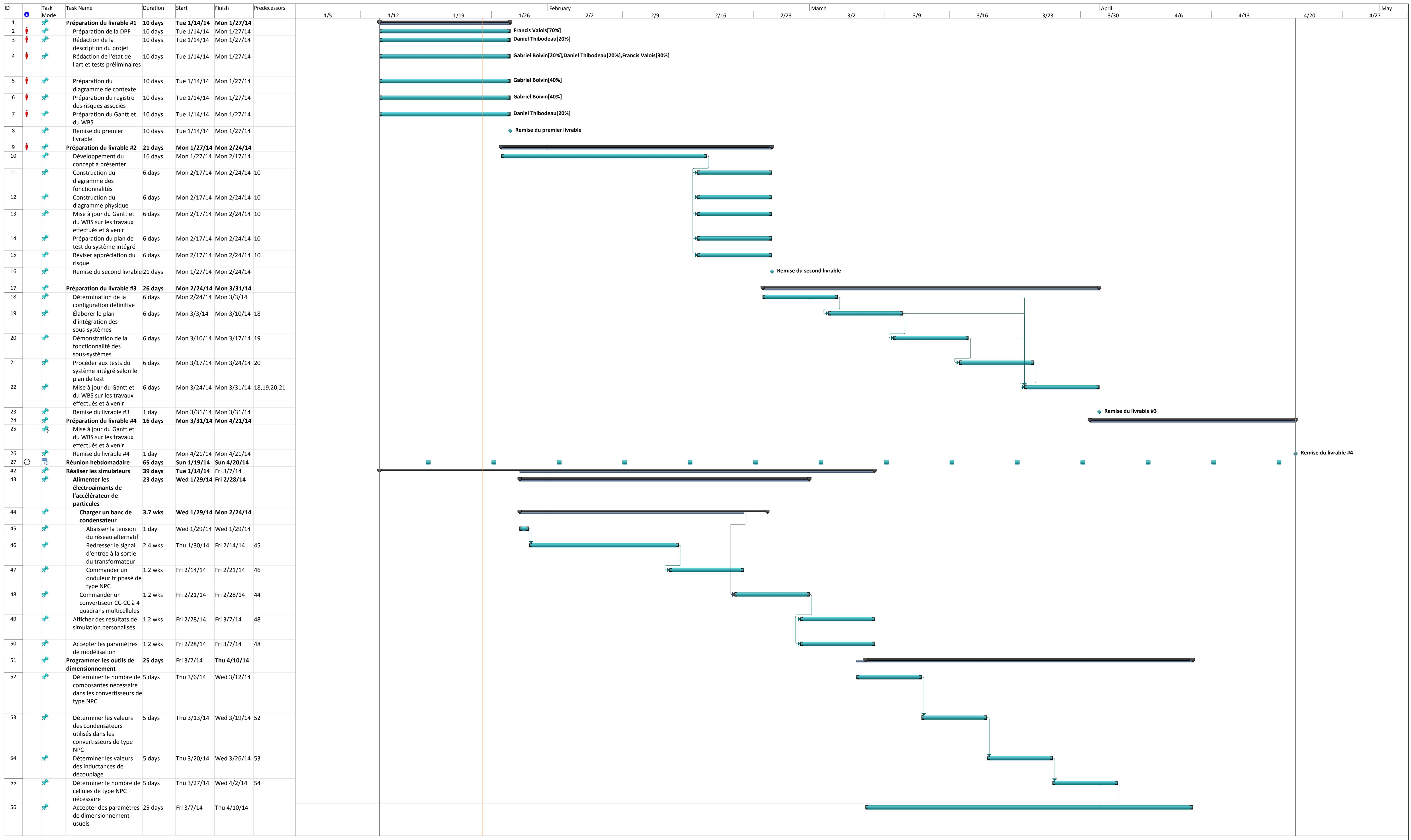


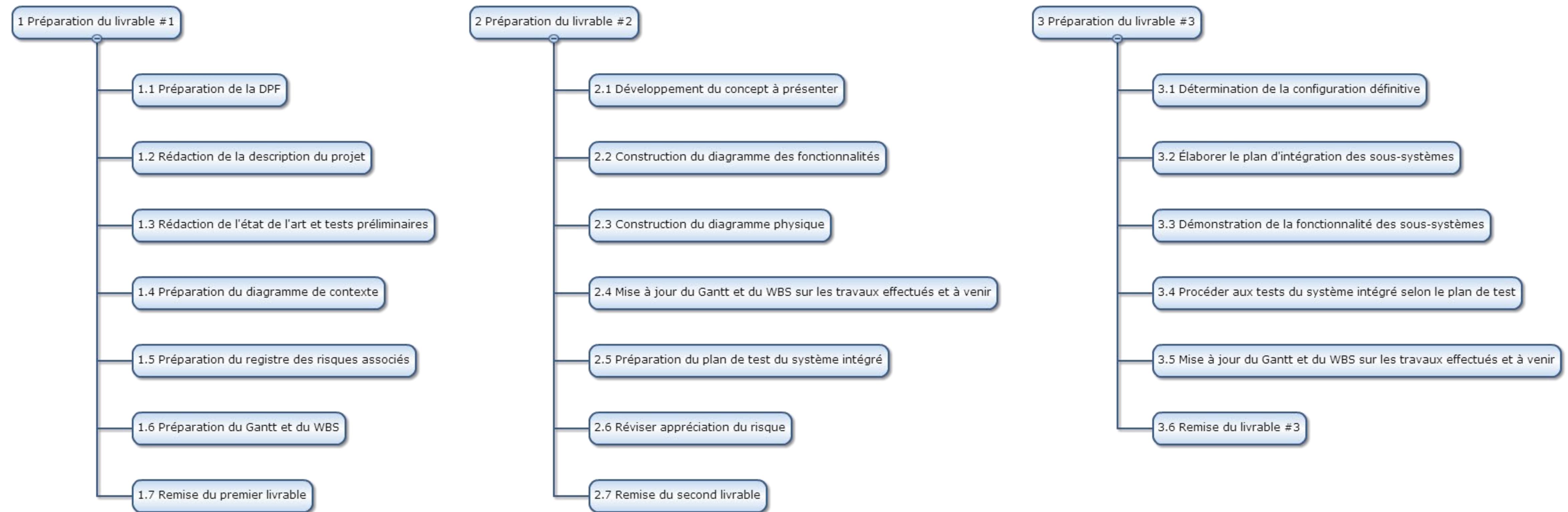
Diagramme des propriétés fonctionnelles

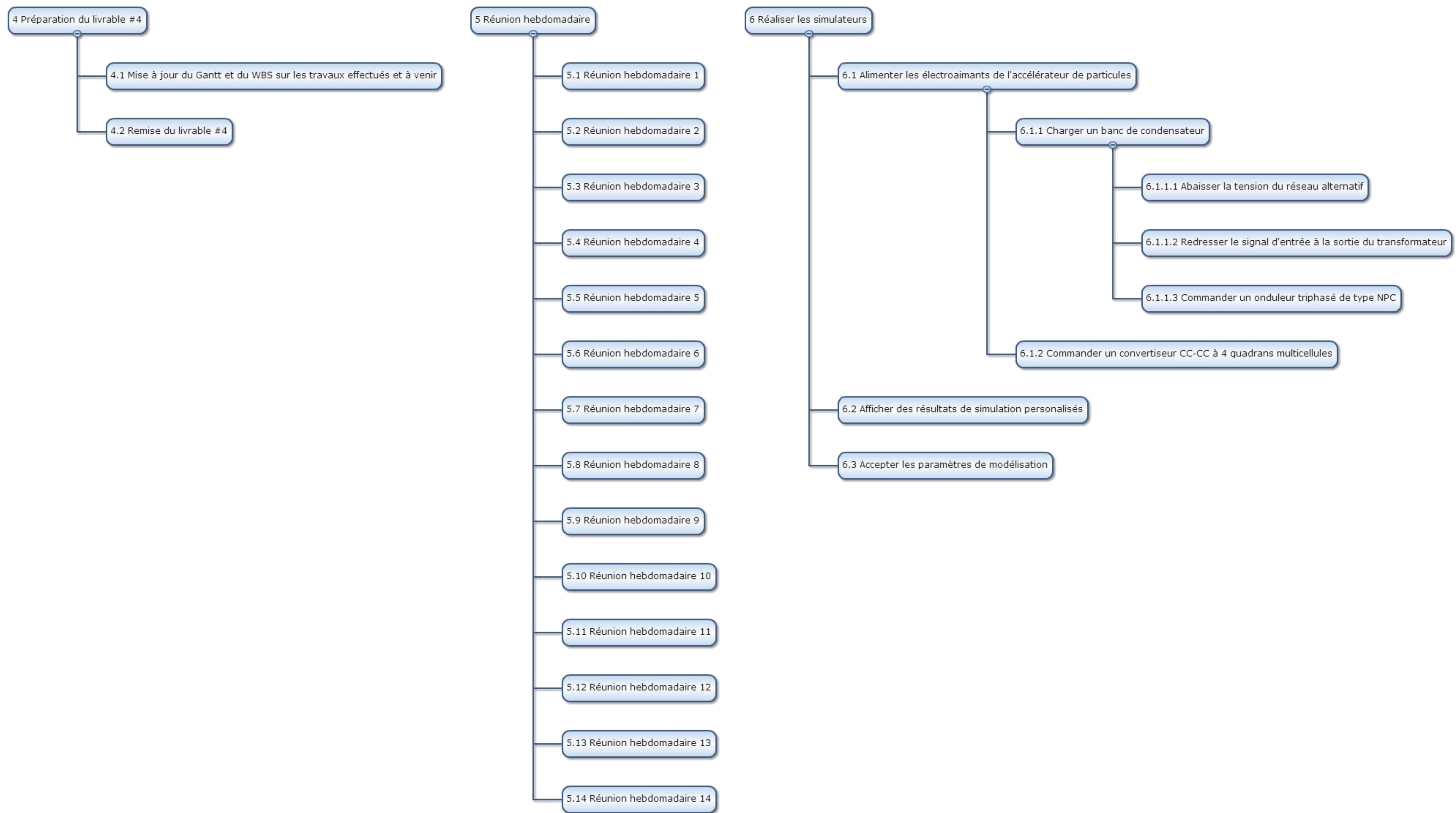
Exigences du client	Fonctionnalités																
	Simulateurs																
	Accepter des paramètres de modélisation	Abaissier la tension du réseau alternatif 18KV à 2KV		Redresser le signal d'entrée à la sortie du transformateur					Commander un onduleur triphasé de type NPC	Charger un banc de condensateur	Commander un convertisseur CC-CC à 4 quadrants multicellules	Alimenter les électroaimants de l'accélérateur de particules 0.5H et Rmag = 0.28Ω				(Lmag = Afficher des résultats de simulation personnalisée)	
Rendement (%)	Ratio (%)	Ondulation de tension (%)	Niveau moyen (5KV)	Rendement (%)	Puissance moyenne (2.7 MW)	Puissance crête (3.6 MW)	Effort du contrôleur (%/s de Variation de la commande)	Temps de charge (s)	Effort du contrôleur (%/s de Variation de la commande)	Rendement (%)	Ondulation de courant (0-6000A)(600ms)	Ondulation de tension (-3 à 3KV)(600ms)	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	3	3		
Modéliser la commande dans le cas de l'onduleur de type AFE.	5			5	5	5	5	5		5	3	3	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	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	3	3		
Fournir un outil de dimensionnement pour l'onduleur de type AFE	2			2	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	5	5		
Modéliser la commande d'un convertisseur CC-CC à 4 quadrants	5									5	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	5	5		
Implanter le modèle d'un convertisseur CC-CC à 4 quadrants à 4 quadrants alimentant la charge spécifiée dans un simulateur	5									5	5	5	5	5	5		
Fournir un outil de dimensionnement pour le convertisseur CC-CC à 4 quadrants	2								2	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	5	5	
Effectuer la validation croisée des configurations implantées à l'aide de 3 simulateurs (PSIM, SimPowerSystems, Opal-RT)	5	3	3	5	5	5	5	5	3	5	5	5	5	5	5	5	
Livrer une documentation pédagogique pour les divers outils de dimensionnement et de simulation	4															4	

Exigences du client	Fonctionnalités												
	Outil de dimensionnement						Documentation						
	Accepter des paramètres de dimensionnement usuels	Déterminer le nombre de composantes nécessaires dans les convertisseurs de type NPC	Déterminer les valeurs des condensateurs utilisés dans les convertisseurs de type NPC	Déterminer les valeurs des inductances de découplage	Déterminer le nombre de cellules de type NPC nécessaire	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)	Choix disponibles (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)	Précision de l'information (1 à 5)	Convivialité (1 à 5)	Précision de l'information (1 à 5)	
Modéliser une cellule de base d'un onduleur triphasé à 3 niveaux de type NPC	5	5	5	3	5	3	3	5					
Modéliser la commande dans le cas de l'onduleur de type AFE.	5	5	5	3	5	3	3	5					
Implanter le modèle de la configuration de base d'un onduleur triphasé à 3 niveaux NPC dans un simulateur	3	4	4	3	5	5	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	4	4	3	5	5	5	3	3	4	4	4	4
Fournir un outil de dimensionnement pour l'onduleur de type AFE	5	5	5	5	5	5	5	5					
Modéliser un convertisseur CC-CC à 4 quadrants à l'aide de plusieurs cellules de type onduleur NPC	5	3	3	5	5	3	3						
Modéliser la commande d'un convertisseur CC-CC à 4 quadrants	5	3	3	5	5	3	3						
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	3	3	5	5	5	5	3	3	4	4	4	4
Implanter le modèle d'un convertisseur CC-CC à 4 quadrants à 4 quadrants alimentant la charge spécifiée dans un simulateur	3	3	3	5	5	5	5	3	3	4	4	4	4
Fournir un outil de dimensionnement pour le convertisseur CC-CC à 4 quadrants	5	5	5	5	5	5	5	5					
Implanter le modèle complet de l'alimentation du Booster dans un simulateur	3	3	3	5	5	5	5	3	3	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	4	5	5	5	5	5









7 Programmer les outils de dimensionnement

- 7.1 Déterminer le nombre de composantes nécessaire dans les convertisseurs de type NPC
- 7.2 Déterminer les valeurs des condensateurs utilisés dans les convertisseurs de type NPC
- 7.3 Déterminer les valeurs des inductances de découplage
- 7.4 Déterminer le nombre de cellules de type NPC nécessaire
- 7.5 Accepter des paramètres de dimensionnement usuels
- 7.6 Fournir les paramètres de modélisations utilisés par le simulateur

8 Rédiger une documentation technique

- 8.1 Présenter le fonctionnement de l'outil de dimensionnement de chacun des simulateurs
- 8.2 Présenter les modèles mathématiques utilisés dans chacun des simulateurs
- 8.3 Présenter l'utilisation de chacun des simulateurs
- 8.4 Présenter les procédures de validation croisées de chacun des simulateurs