

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

Par l'équipe Électrosim

Contexte et problématique

- ▶ Le CERN: Organisation européenne pour la recherche nucléaire
 - ▶ Recherche sur les particules fondamentales
 - ▶ Utilisation d'accélérateurs de particules pour créer des collisions à haute énergie (~8TeV total)
 - ▶ Nécessite des alimentations électroniques de haute puissance
- ▶ Le laboratoire du CERN désire remplacer l'alimentation actuelle du Booster du Synchrotron.
 - ▶ Nécessite la conception d'une nouvelle alimentation électronique à haute puissance
 - ▶ La nouvelle alimentation doit permettre une augmentation de puissance et une meilleure efficacité.
 - ▶ Une telle conception requiert un outil de CAO permettant de tester plusieurs configurations

Objectifs

- ▶ Livrer 3 outils de dimensionnement
 - ▶ Convivial
 - ▶ Utilise des paramètres usuels
- ▶ Livrer 3 outils de simulation
 - ▶ Matlab (Simulink), Opal-RT, PSIM
- ▶ Documenter le fonctionnement des outils de dimensionnement et de simulation
 - ▶ Présenter des exemples d'utilisation

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
 - ▶ Multiplateforme

Méthodologie planifiée (2/3)

Réalisation pratique

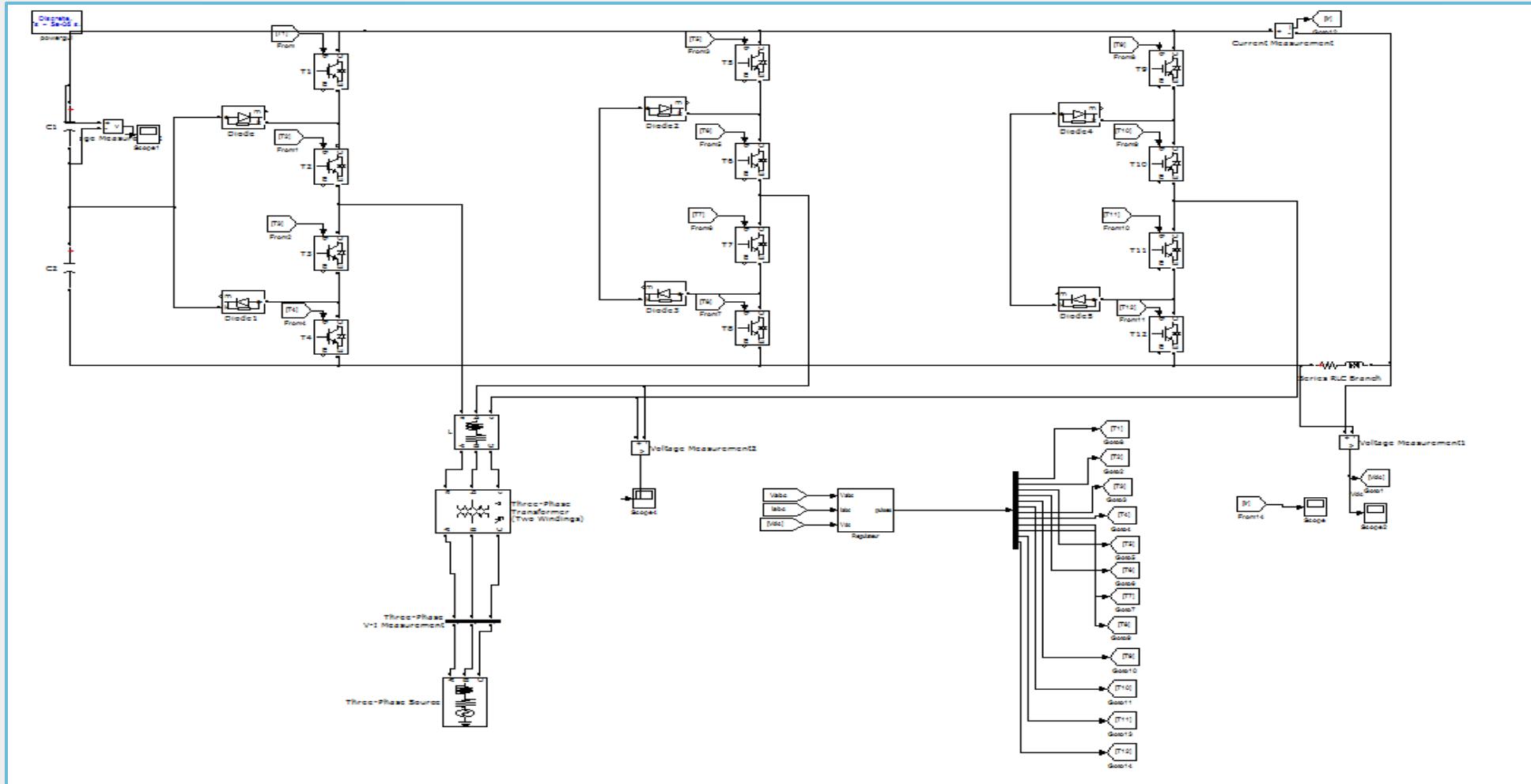
- ▶ Modélisation de chacune des composantes en employant d'abord, les modèles idéaux, puis en y ajoutant des caractéristiques linéaires et non linéaires jusqu'à représenter de manière la plus exacte possible (en prenant en compte les limitations techniques liées à l'exécution de la simulation), le comportement 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)

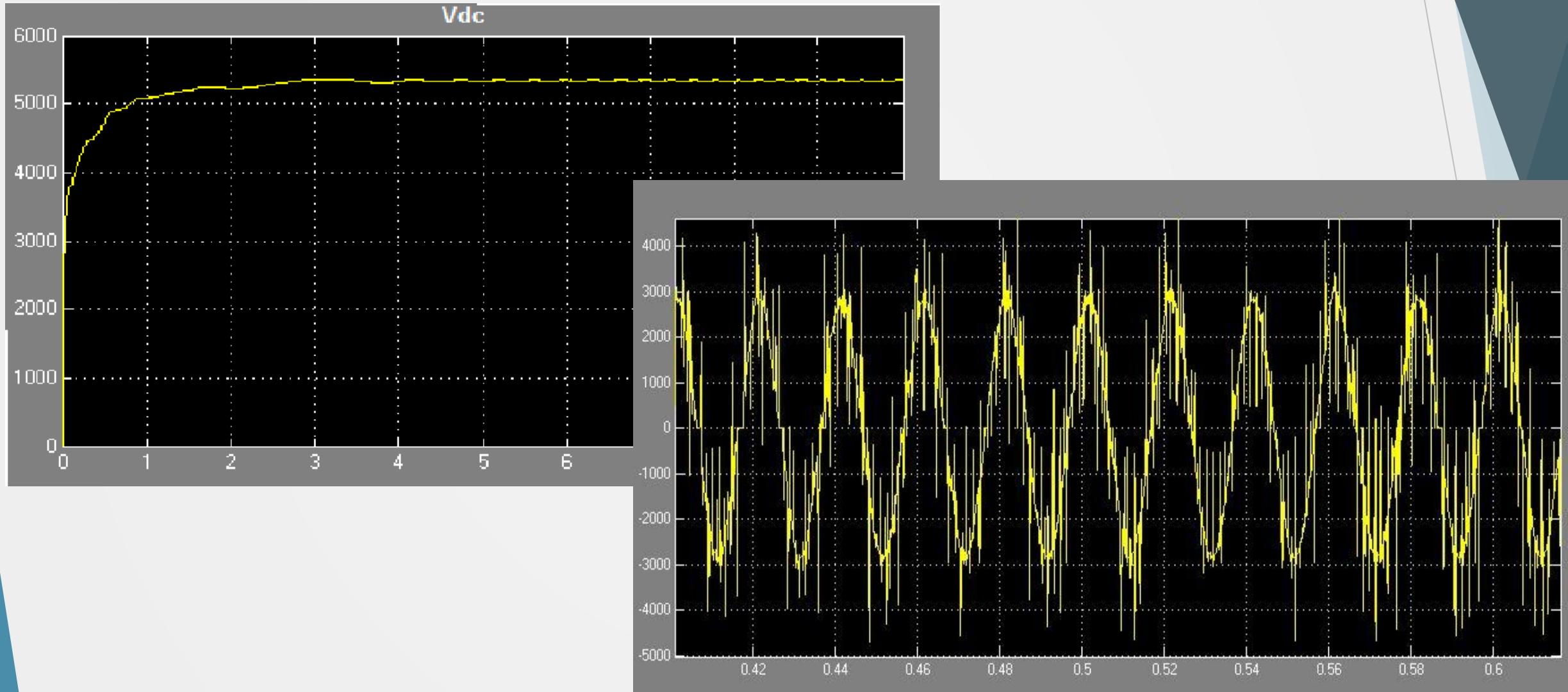


Diagramme de contexte

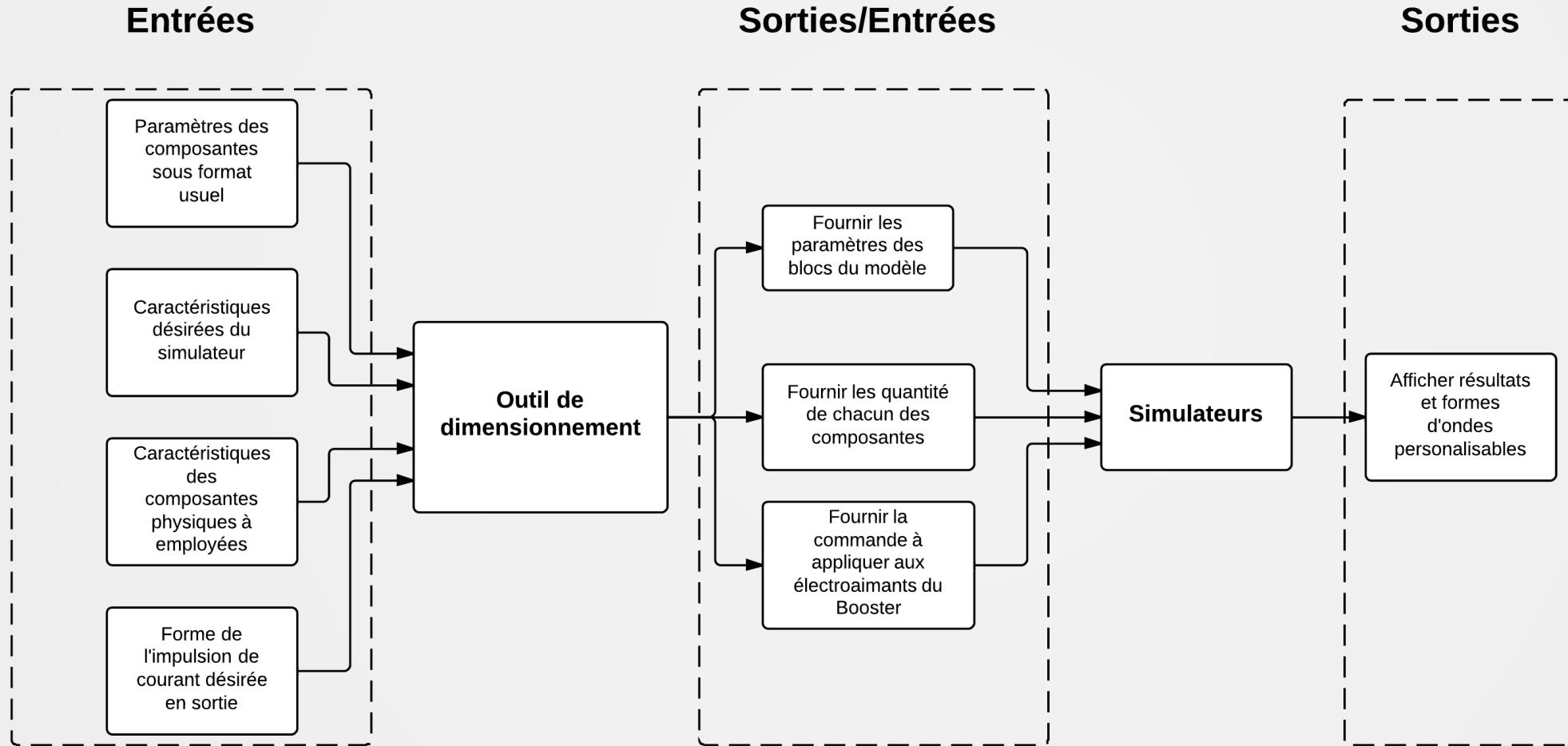


Diagramme des propriétés fonctionnelles

*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 utilisés 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)

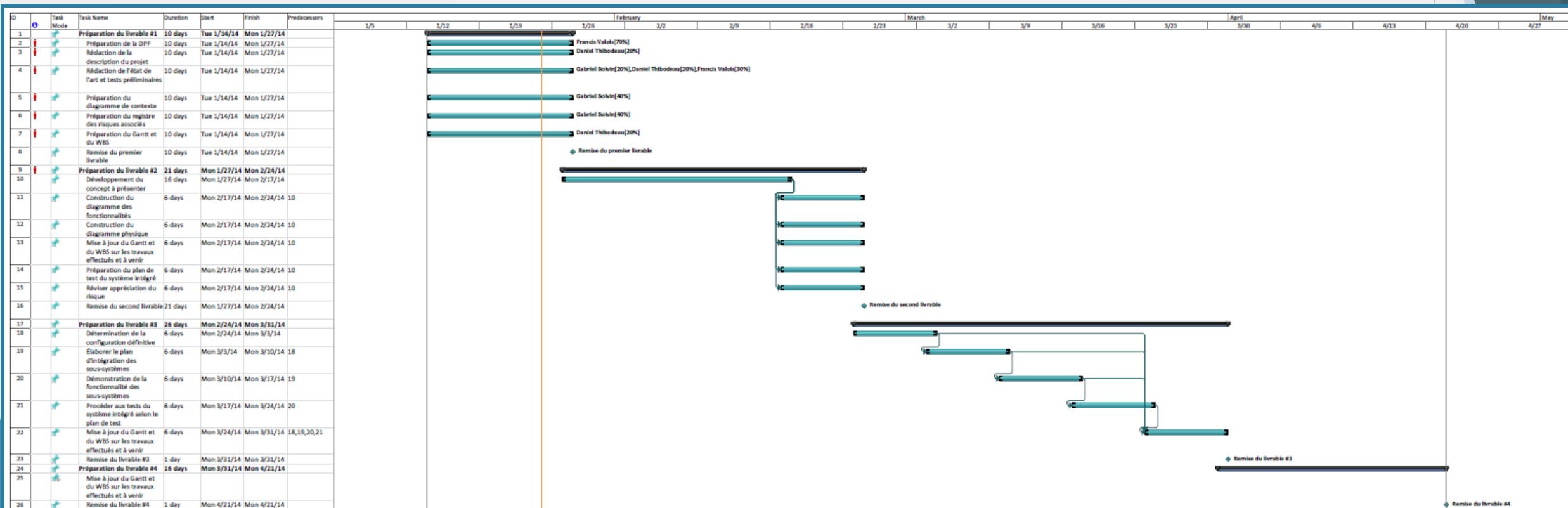
Type de risque	Niveau de priorité (1 faible, 5 élevé)	Conséquence de l'occurrence du risque	Coût en performance associé au risque	Probabilité d'occurrence	Plan de réduction du risque	Responsable du risque
Pertes des données liées aux simulateurs	5	Retard sur le projet mineur s'il existe une révision 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)

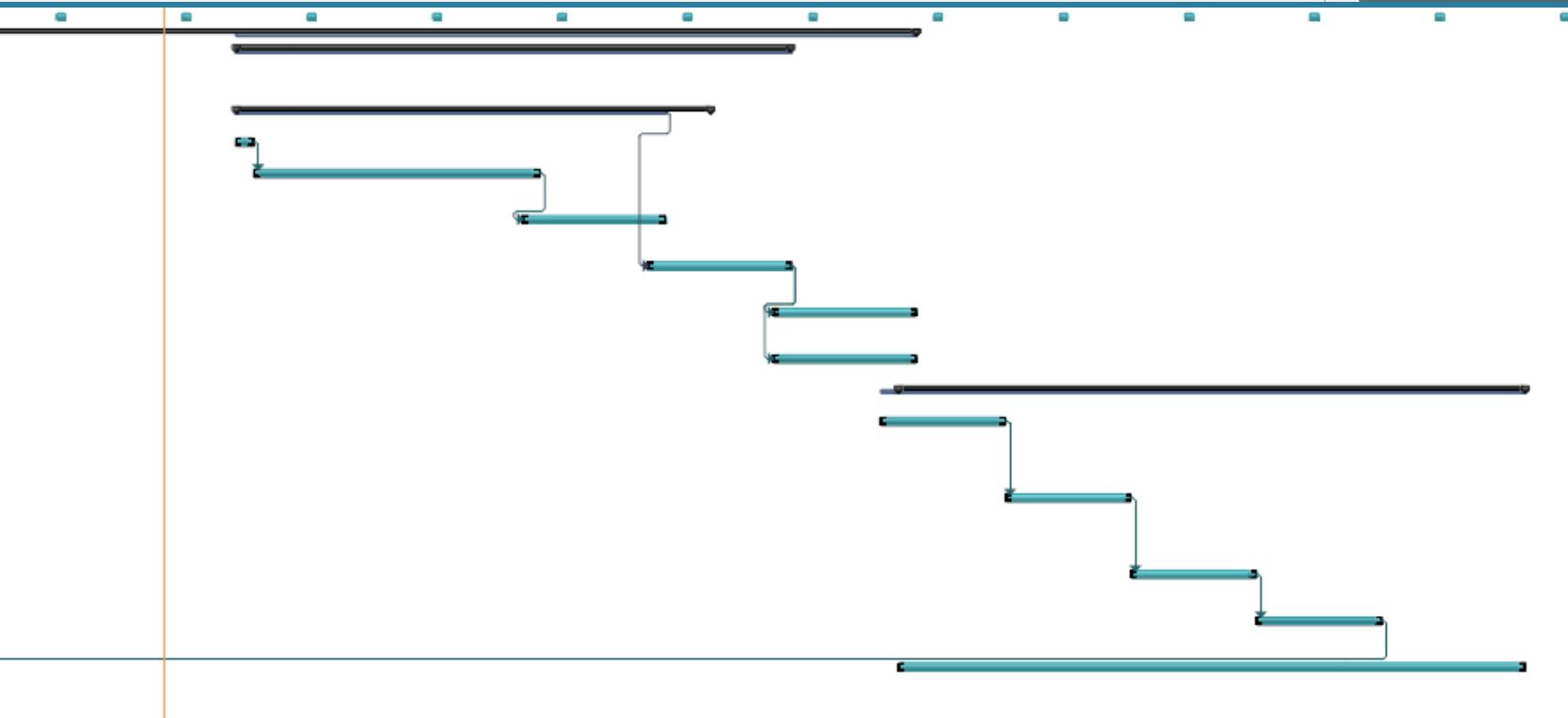
*Voir les dernières pages du PDF pour plus de précision



Gantt (2/2)

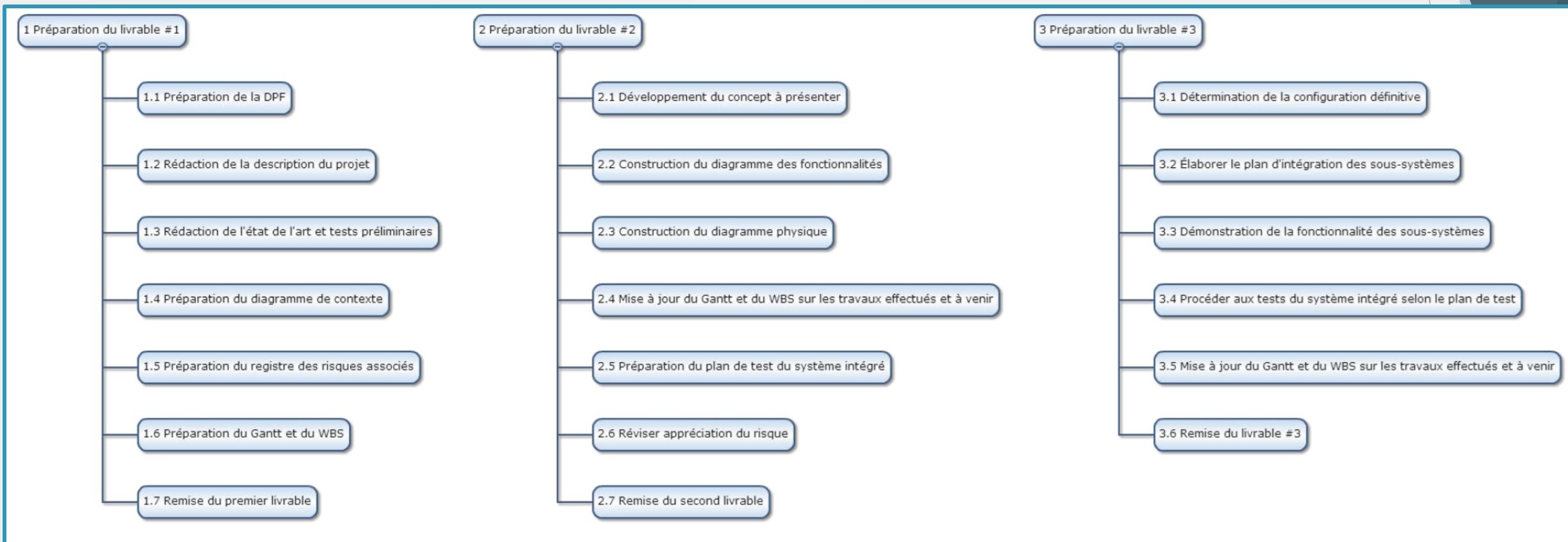
**Voir les dernières pages du PDF pour plus de précision*

27		Réunion hebdomadaire	65 days	Sun 1/19/14	Sun 4/20/14	
42		Réaliser les simulateurs	39 days	Tue 1/14/14	Fri 3/7/14	
43		Alimenter les électroaimants de l'accélérateur de particules	23 days	Wed 1/29/14	Fri 2/28/14	
44		Charger un banc de condensateur	3.7 wks	Wed 1/29/14	Mon 2/24/14	
45		Abaisser la tension du réseau alternatif	1 day	Wed 1/29/14	Wed 1/29/14	
46		Redresser le signal d'entrée à la sortie du transformateur	2.4 wks	Thu 1/30/14	Fri 2/14/14	45
47		Commander un onduleur triphasé de type NPC	1.2 wks	Fri 2/14/14	Fri 2/21/14	46
48		Commander un convertisseur CC-CC à 4 quadrants multicellules	1.2 wks	Fri 2/21/14	Fri 2/28/14	44
49		Afficher des résultats de simulation personnalisés	1.2 wks	Fri 2/28/14	Fri 3/7/14	48
50		Accepter les paramètres de modélisation	1.2 wks	Fri 2/28/14	Fri 3/7/14	48
51		Programmer les outils de dimensionnement	25 days	Fri 3/7/14	Thu 4/10/14	
52		Déterminer le nombre de composantes nécessaire dans les convertisseurs de type NPC	5 days	Thu 3/6/14	Wed 3/12/14	
53		Déterminer les valeurs des condensateurs utilisés dans les convertisseurs de type NPC	5 days	Thu 3/13/14	Wed 3/19/14	52
54		Déterminer les valeurs des inductances de découplage	5 days	Thu 3/20/14	Wed 3/26/14	53
55		Déterminer le nombre de cellules de type NPC nécessaire	5 days	Thu 3/27/14	Wed 4/2/14	54
56		Accepter des paramètres de dimensionnement usuels	25 days	Fri 3/7/14	Thu 4/10/14	



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 quadrans 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

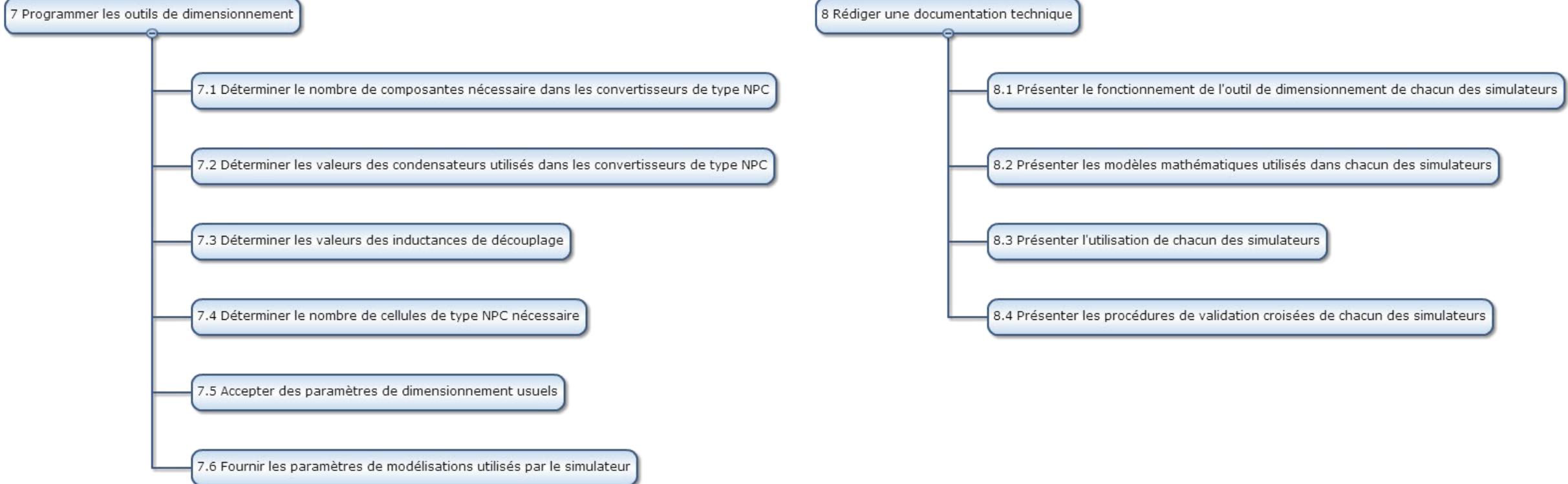
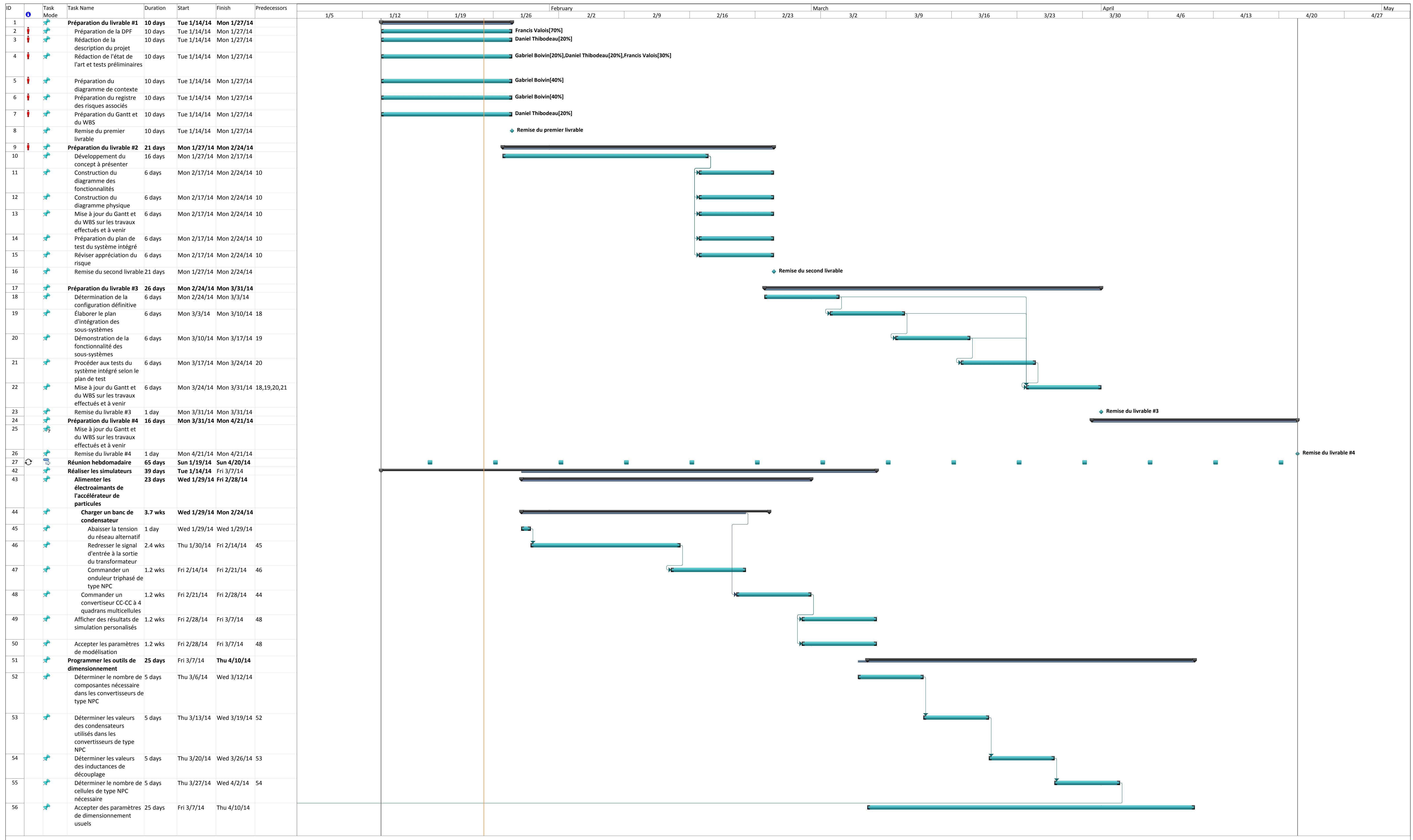


Diagramme des propriétés fonctionnelles

Exigences du client	Fonctionnalités																	
	Simulateurs																	
	Accepter des paramètres de modélisation	Abaisser la tension du réseau alternatif		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				Afficher des résultats de simulation personnalisés	
		Rendement (%)	Ratio (%)	Ondulation de tension (%)	Niveau moyen (kV)	Rendement (%)	Puissance moyenne (MW)	Puissance crête (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 (%)	Ondulation de tension (%)	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	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		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	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		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	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 de la commande d'un convertisseur CC-CC 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	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	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 croisée de chacun des simulateurs			
Exigences du client	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)	
	Modéliser une cellule de base d'un onduleur triphasé à 3 niveaux de type NPC	5	5	5	3	5	3			5			
	Modéliser la commande dans le cas de l'onduleur de type AFE.	5	5	5	3	5	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	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	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			5			
	Modéliser la commande d'un convertisseur CC-CC à 4 quadrants	5	3	3	5	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	3	3	5	5	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	3	3	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	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

