

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

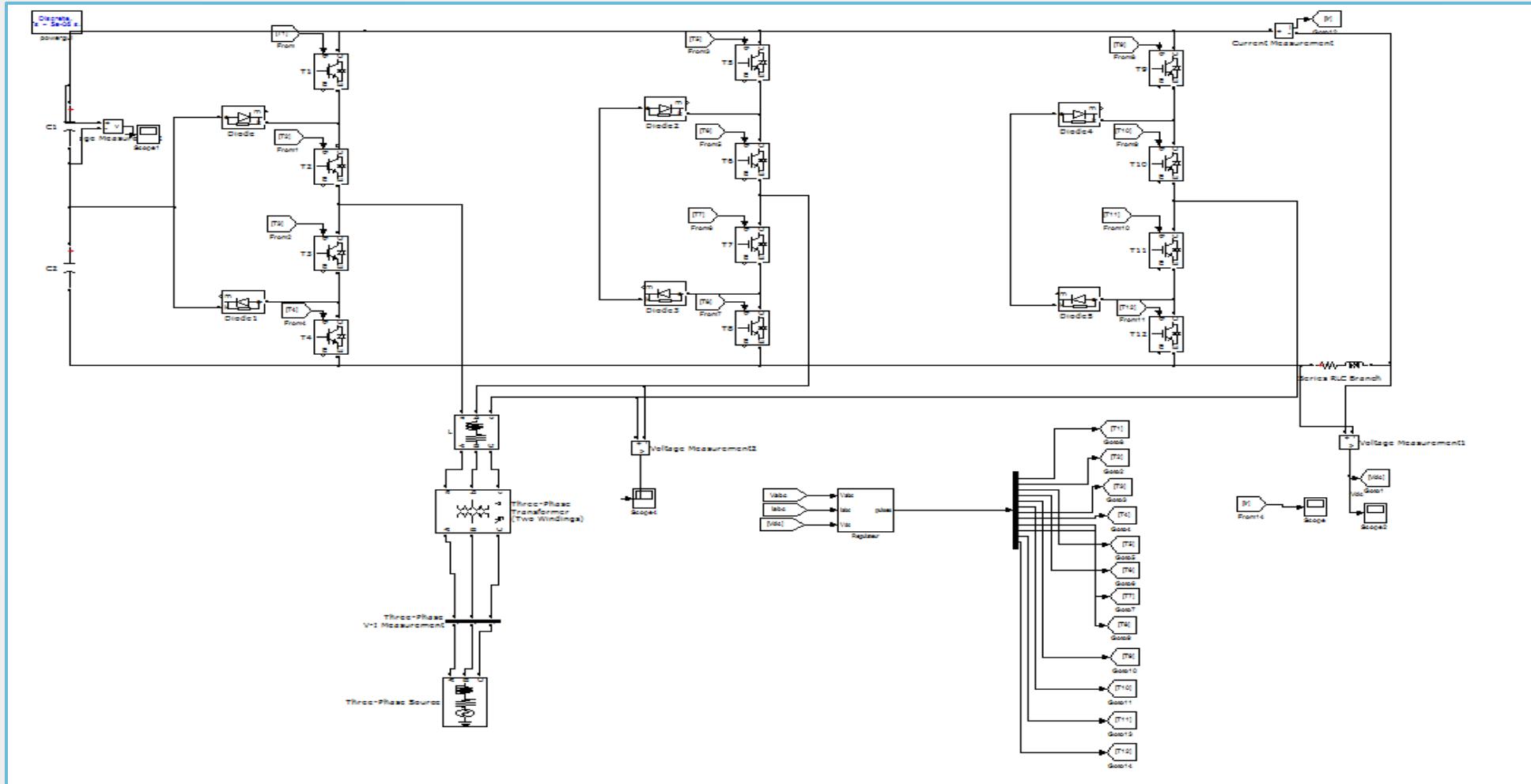
- ▶ Modélisation de chacune des composantes en employant d'abord, les modèles idéaux, puis en y ajoutant des caractéristiques linéaires et non linéaires jusqu'à représenter de manière la plus exacte possible (en prenant en compte les limitations techniques liées à l'exécution de la simulation), le comportement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

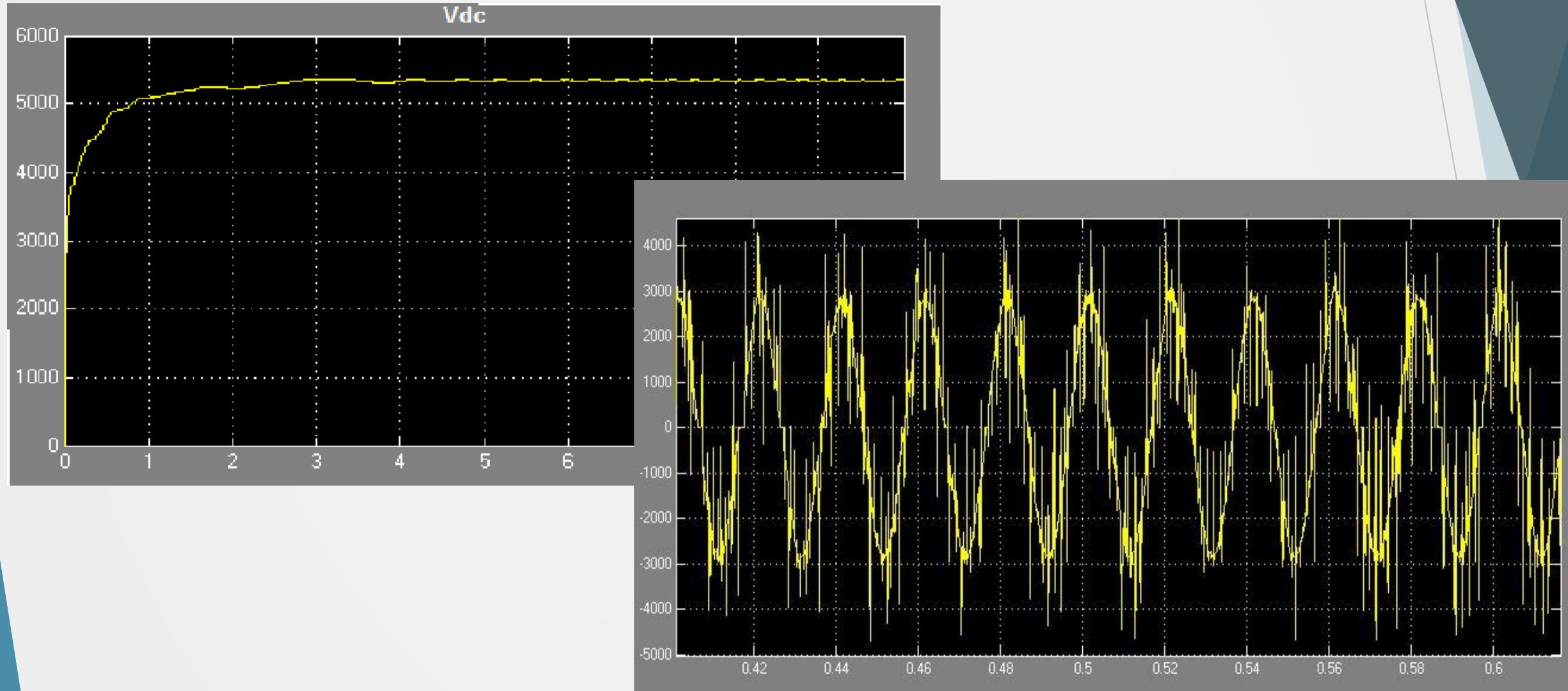


Diagramme de contexte

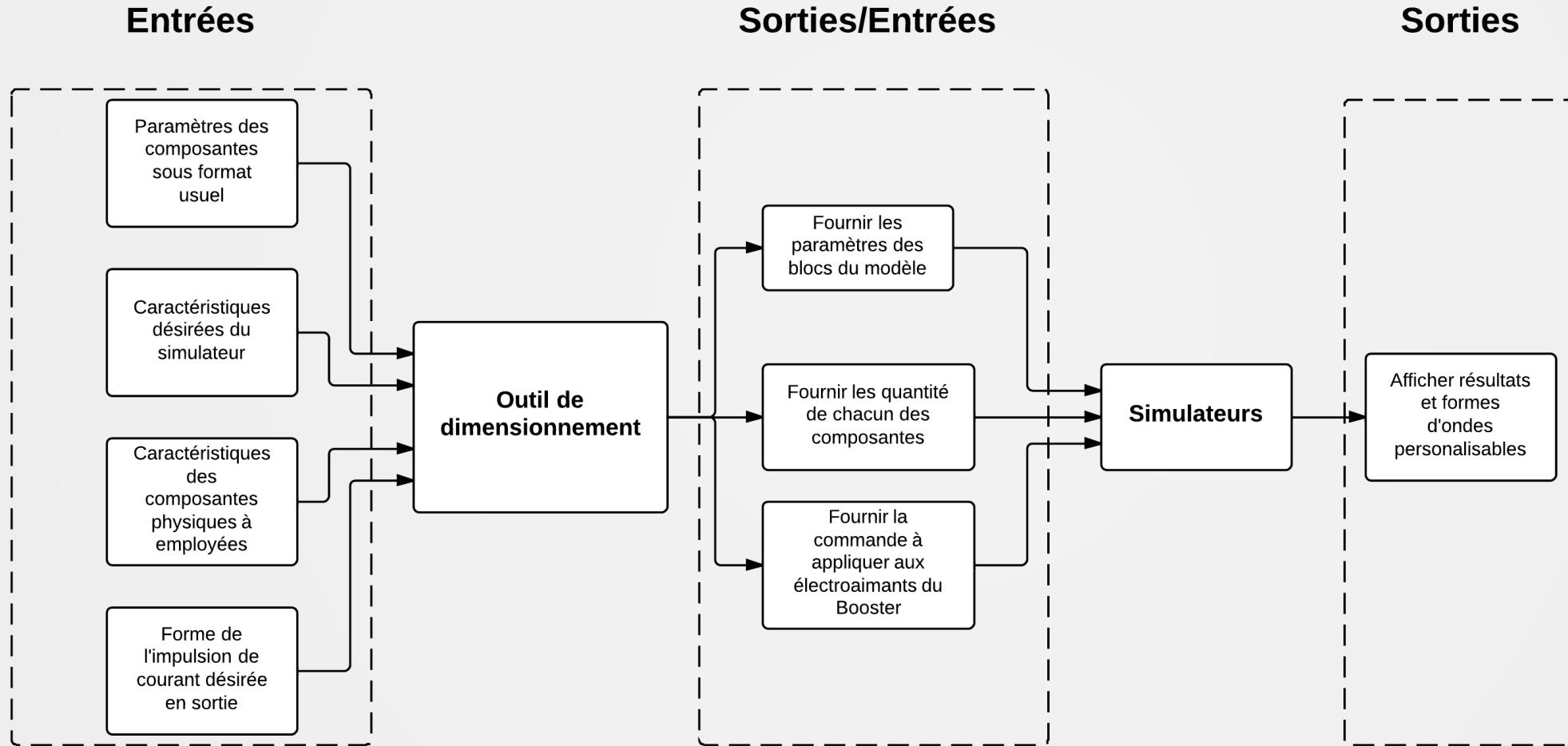


Diagramme des propriétés fonctionnelles

*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)

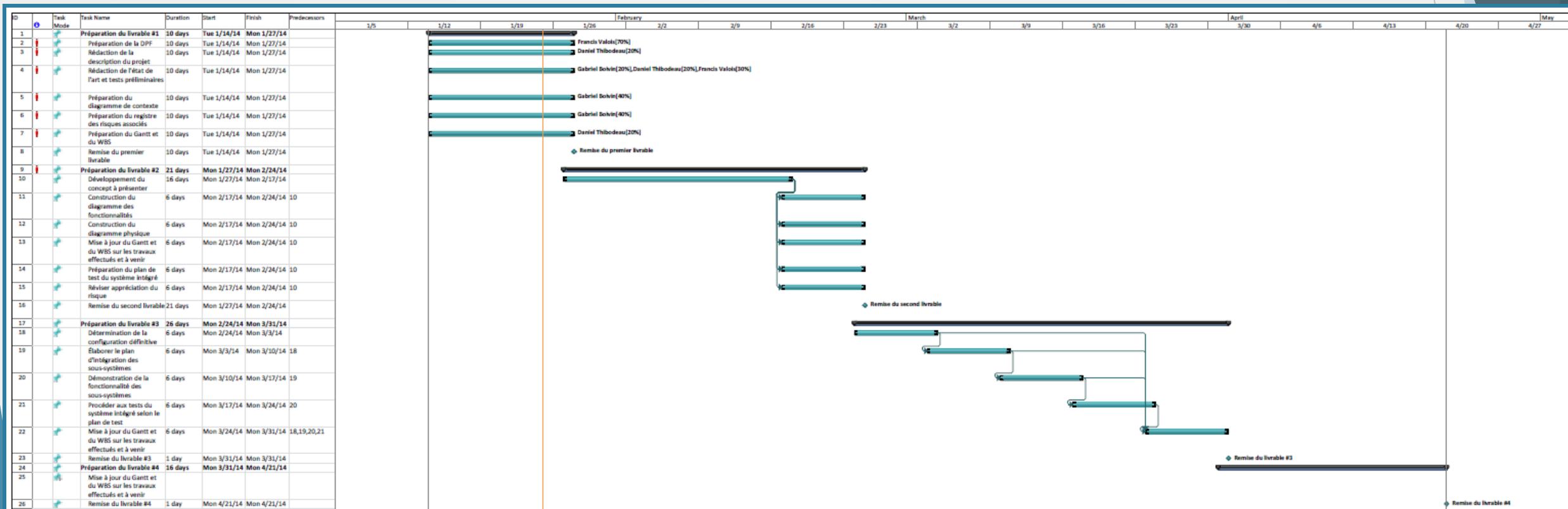
| Type de risque | Niveau de priorité (1 faible, 5 élevé) | Conséquence de l'occurrence du risque | Coût en performance associé au risque | Probabilité d'occurrence | Plan de réduction du risque | Responsable du risque |
|--|---|---|--|--------------------------|---|-----------------------|
| Pertes 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)

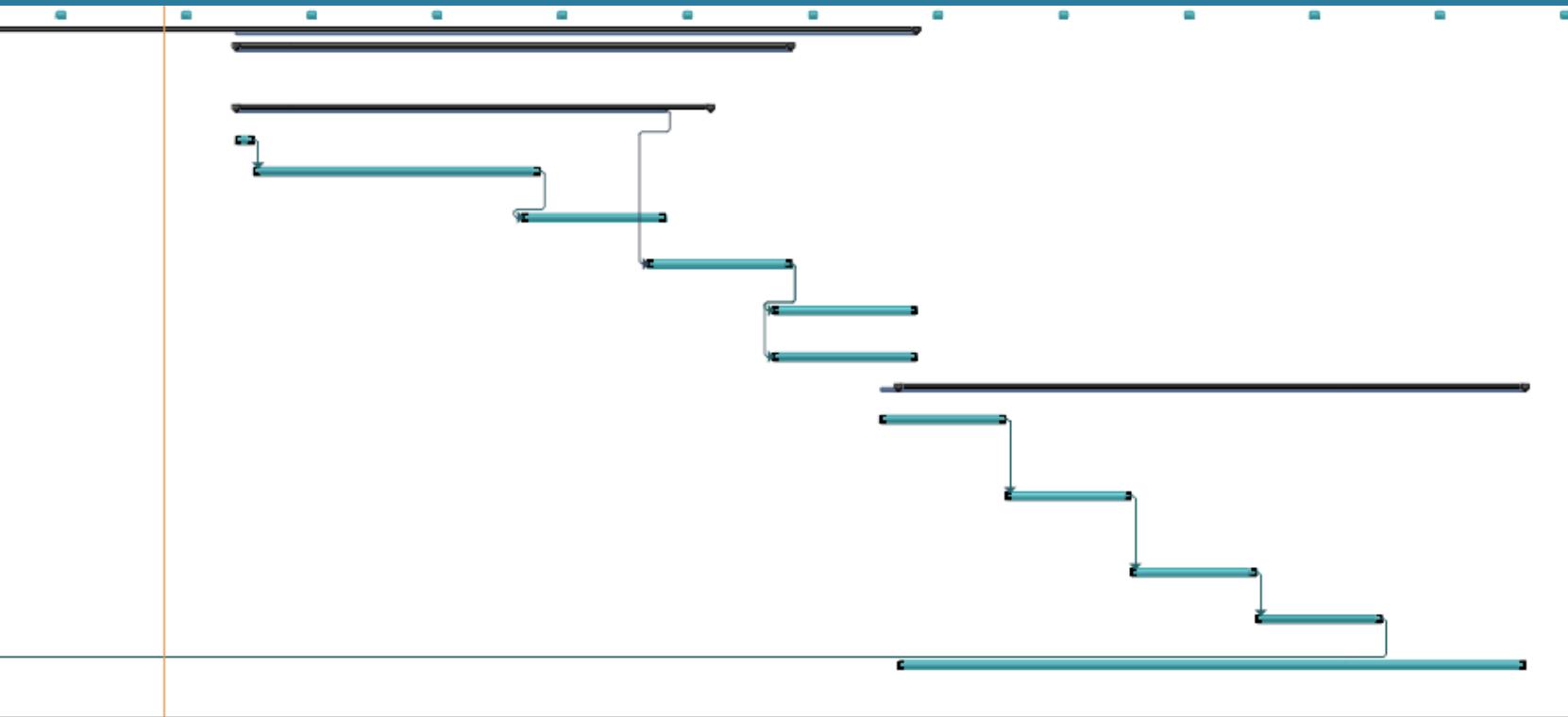
*Voir les dernières pages du PDF pour plus de précision



Gantt (2/2)

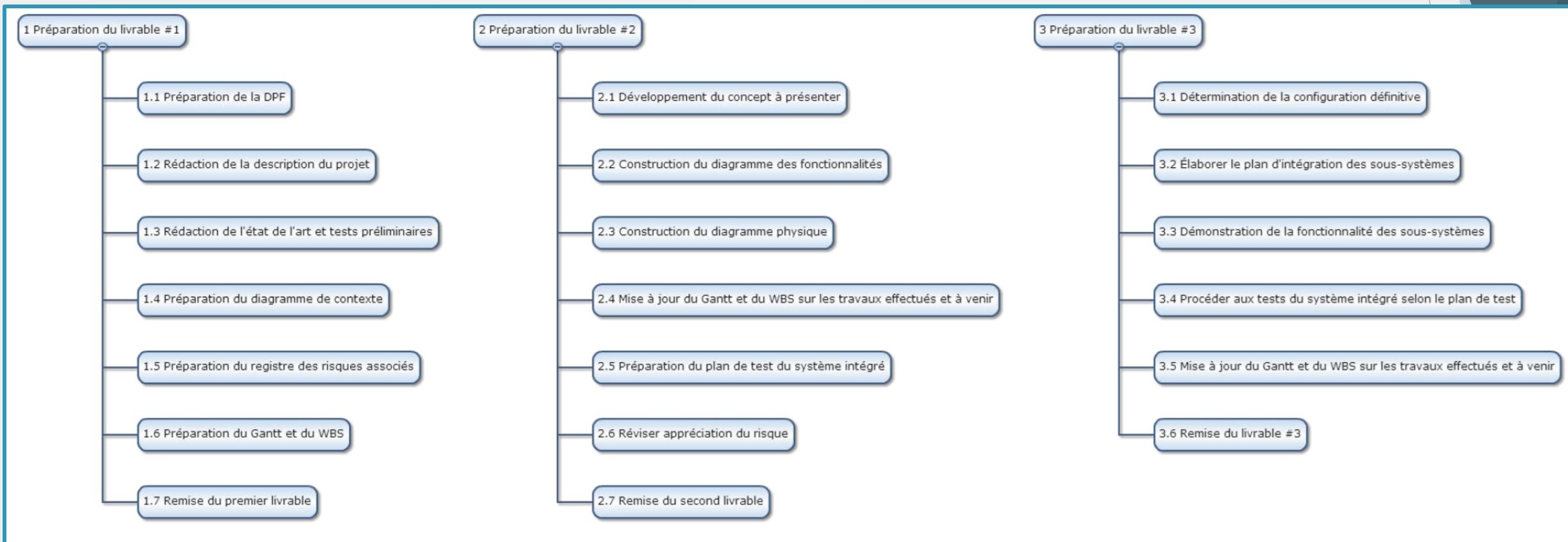
**Voir les dernières pages du PDF pour plus de précision*

| | | | | | | |
|----|--|---|---------|-------------|-------------|----|
| 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

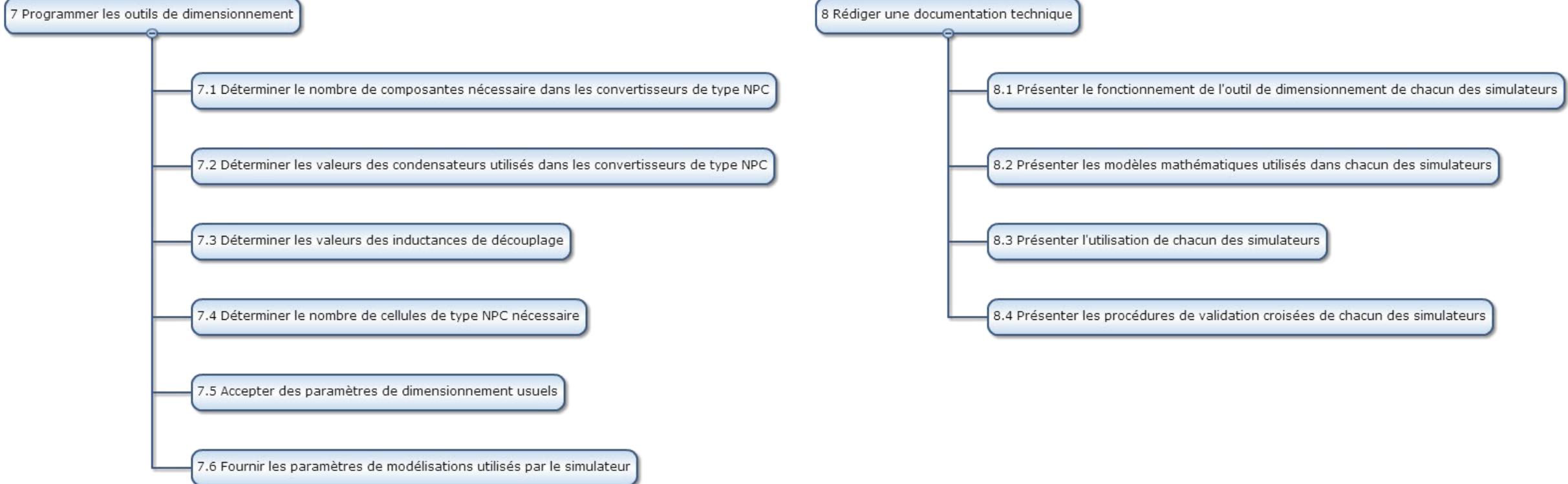
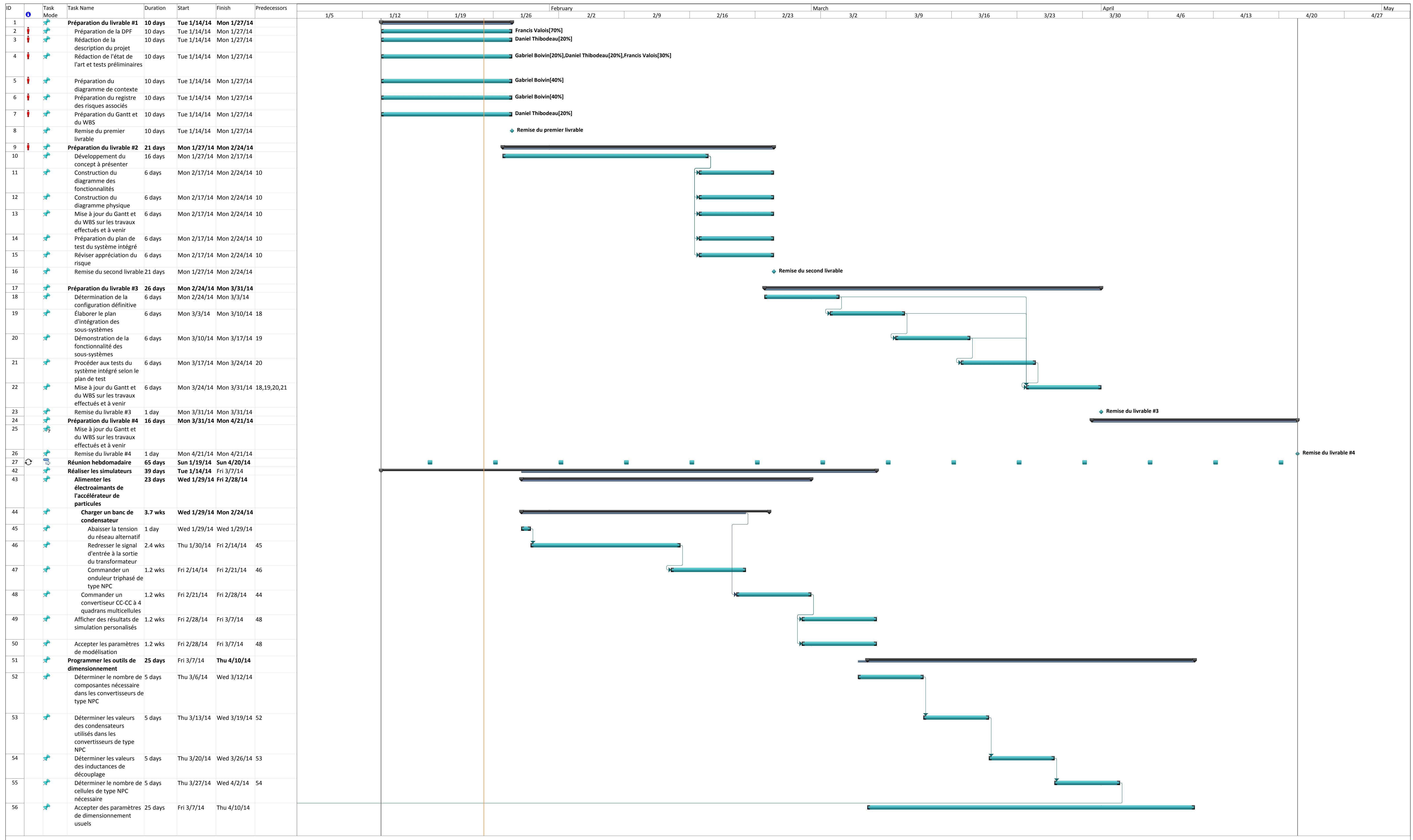


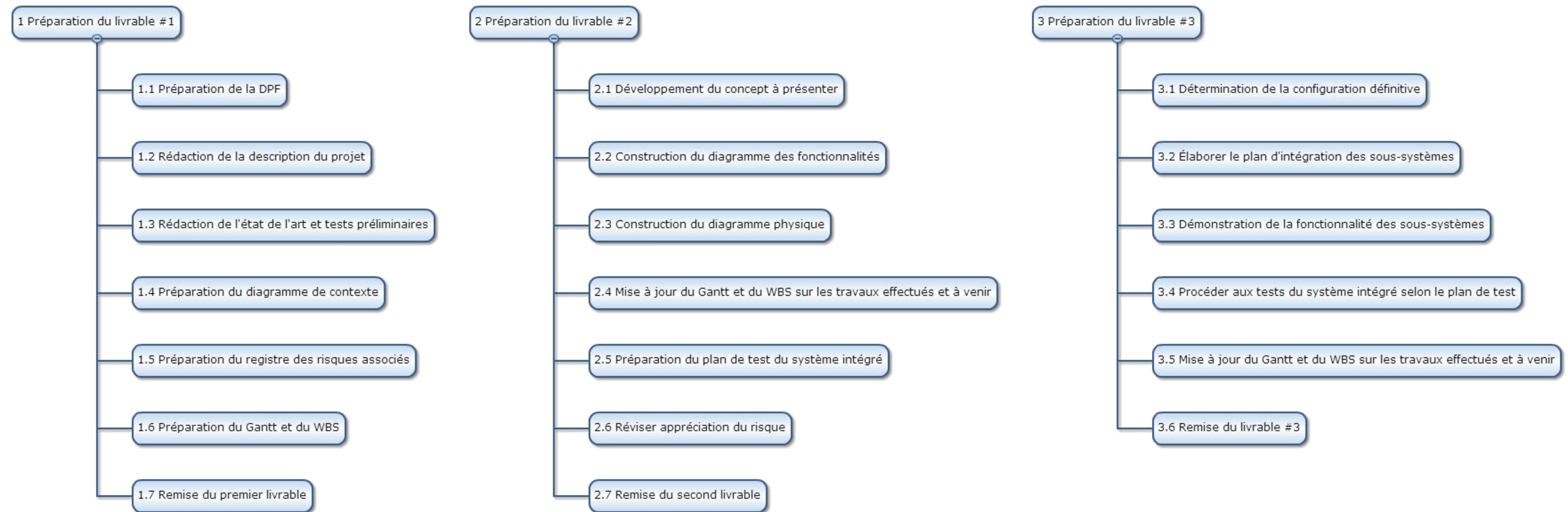
Diagramme des propriétés fonctionnelles

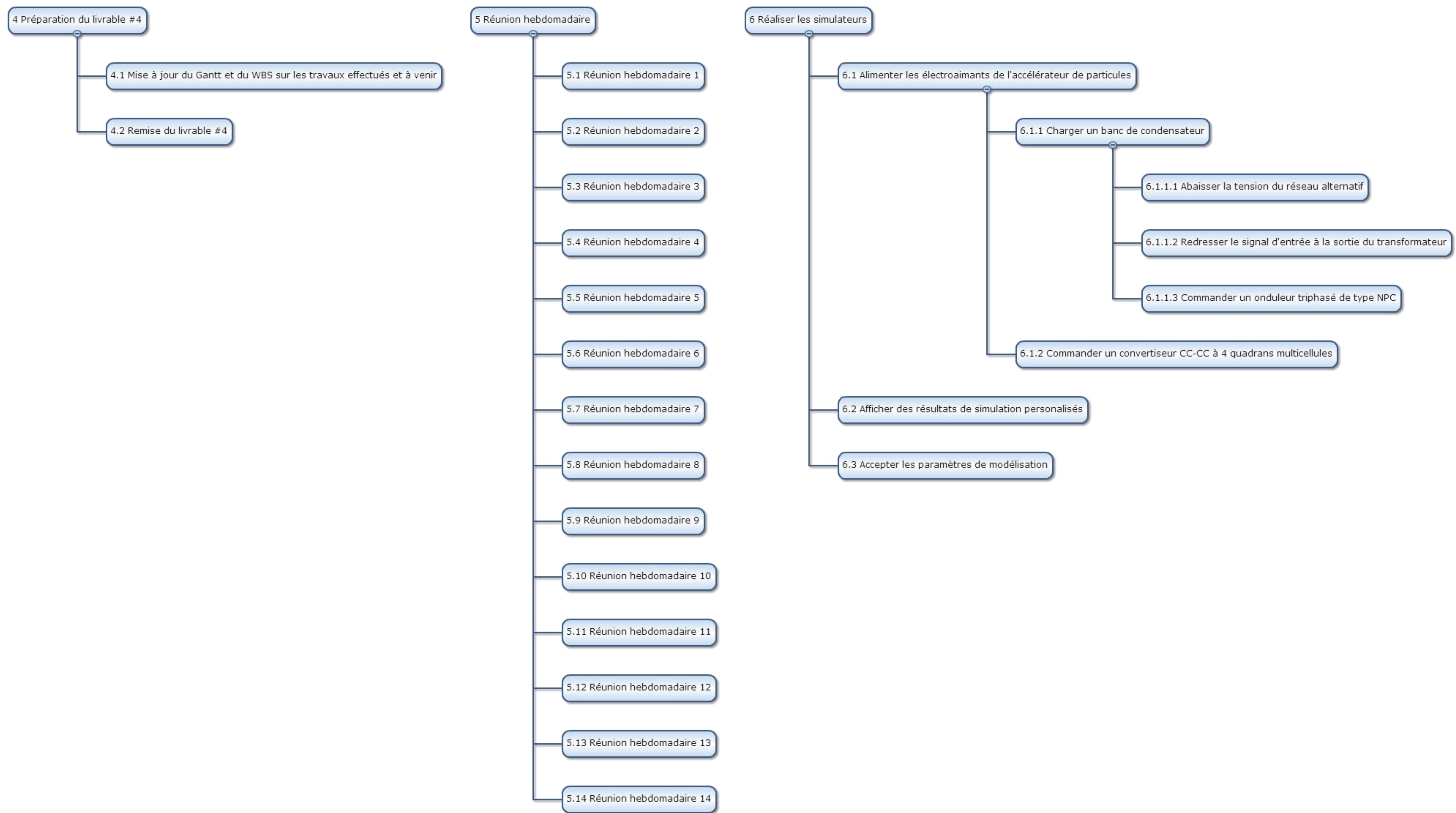
| Exigences du client | Fonctionnalités | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|---|--|-----------|--|-------------------|---------------|------------------------|----------------------|--|---------------------------------|--|--|---------------------------|---------------------------|------------------------|--|----------------------|
| | Simulateurs | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Accepter des paramètres de modélisation | Abaïsser 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 | | | |
| Choix disponibles (1 à 5) | 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) | 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) | |
| | 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 | 3 | 3 | | 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 |
| | 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 | | 5 | | | |
| | Modéliser la commande d'un convertisseur CC-CC à 4 quadrants | 5 | 3 | 3 | 5 | 5 | 3 | 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 |
| | 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 |
| | 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 |
| | 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