



Numéro d'ordre : 00-29

THESE

présentée à

L'UNIVERSITE DE VALENCIENNES ET DU HAINAUT CAMBRESIS

en vue de l'obtention du titre de

DOCTEUR de l'Université de Valenciennes

Spécialité Automatique des Systèmes Industriels et Humains

par

Stéphanie FURON

Ingénieur EIGIP

**CONTRIBUTION A LA MISE EN ŒUVRE DU SOUTIEN LOGISTIQUE :
ELEMENTS METHODOLOGIQUES POUR UNE CONCEPTION FONDEE SUR
UN MODELE DE PRODUIT GLOBAL**

Soutenue le mercredi 20 décembre 2000 devant la commission d'examen :

| | | |
|-----------------|-----------------------|--|
| F. PRUNET | Rapporteur | Professeur de l'Université de Montpellier |
| F. VERNADAT | Rapporteur | Professeur de l'Université de Metz |
| J.-J. DINDELEUX | Examineur | Société ALSTOM Transport |
| R. SOENEN | Examineur | Professeur de l'Université de Valenciennes |
| D. TRENTESAUX | Co-directeur de thèse | Maître de Conférence de l'Université de Valenciennes |
| C. TAHON | Directeur de thèse | Professeur de l'Université de Valenciennes |
| D. ALAMANOS | Invitée | Société Giat Industries |
| C. DHOURY | Invitée | Société Ligeron SA |
| J.-C. LIGERON | Invité | Société Ligeron SA |



Numéro d'ordre : 00-29

THESE

présentée à

L'UNIVERSITE DE VALENCIENNES ET DU HAINAUT CAMBRESIS

en vue de l'obtention du titre de

DOCTEUR de l'Université de Valenciennes

Spécialité Automatique des Systèmes Industriels et Humains

par

Stéphanie FURON

Ingénieur EIGIP

**CONTRIBUTION A LA MISE EN ŒUVRE DU SOUTIEN LOGISTIQUE :
ELEMENTS METHODOLOGIQUES POUR UNE CONCEPTION FONDEE SUR
UN MODELE DE PRODUIT GLOBAL**

Soutenue le mercredi 20 décembre 2000 devant la commission d'examen :

| | | |
|-----------------|-----------------------|--|
| F. PRUNET | Rapporteur | Professeur de l'Université de Montpellier |
| F. VERNADAT | Rapporteur | Professeur de l'Université de Metz |
| J.-J. DINDELEUX | Examineur | Société ALSTOM Transport |
| R. SOENEN | Examineur | Professeur de l'Université de Valenciennes |
| D. TRENTESAUX | Co-directeur de thèse | Maître de Conférence de l'Université de Valenciennes |
| C. TAHON | Directeur de thèse | Professeur de l'Université de Valenciennes |
| D. ALAMANOS | Invitée | Société Giat Industries |
| C. DHOURY | Invitée | Société Ligeron SA |
| J.-C. LIGERON | Invité | Société Ligeron SA |

A Henri.

Remerciements

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été réalisés au sein de l'Equipe Systèmes de Production du Laboratoire d'Automatique et de Mécanique Industrielles et Humaines de l'Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis. Je remercie vivement le Professeur René SOENEN de m'avoir accueillie au sein de son équipe, du soutien qu'il m'a apporté tout au long de ces trois années, et d'avoir accepté de participer à ce jury.

Je remercie également les professeurs François PRUNET, de l'Université de Montpellier et François VERNADAT, de l'Université de Metz, d'avoir accepté d'être les rapporteurs de ce travail.

Que Jean-Jacques DINDELEUX, responsable du service de Sûreté de Fonctionnement de la société ALSTOM Transport, Unité de Valenciennes, trouve ici l'expression de ma gratitude pour m'avoir proposé un contexte d'application et de validation de mes propositions et pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Je remercie Dalva ALAMANOS, de la société Giat Industries, ainsi que Christine DHOURY et Jean-Claude LIGERON de la société LIGERON SA d'avoir accepté de prendre part à ce jury.

Je remercie tout particulièrement le Professeur Christian TAHON, directeur de cette thèse, pour m'avoir guidée et conseillée dans mes recherches.

Je ne peux également que vivement remercier Damien TRENTESAUX, Maître de Conférence au LAMIH, pour avoir su écouter et répondre à mes innombrables questions, et pour son aide précieuse durant ces années.

Je remercie également les membres de l'équipe Systèmes de Production en particulier et les membres du LAMIH en général. En vrac : Pascal, Olivier, Philippe, Frédéric, Dimitri, Arnaud, Christophe, Lionel, Patrick et les autres.

Pour terminer, je ne peux oublier d'exprimer ma reconnaissance envers mon mari, mes parents, ma sœur, ma grand-mère, tout le reste de la famille, sans oublier les amis, pour leur présence à mes côtés et pour leurs encouragements entêtés.

| | |
|--|-----------|
| Introduction générale | 1 |
| Chapitre I. De la performance globale d'un produit | 3 |
| Introduction | 3 |
| I. Système, cycle de vie | 3 |
| I.1. Définition d'un système | 4 |
| I.2. Cycle de vie d'un produit..... | 8 |
| II. Performance et performance globale | 10 |
| II.1. Caractérisation de la performance globale..... | 11 |
| II.2. Performance sur le cycle de vie (P1)..... | 12 |
| II.3. Performance en fonction de la composition et des acteurs (P2) | 14 |
| II.4. Evaluation de la performance globale du produit (E(P1, P2))..... | 15 |
| II.5. Synthèse | 18 |
| II.6. Problématique de la recherche de la performance globale..... | 19 |
| III. Méthodes de conception | 21 |
| III.1. Typologie des méthodes de conception | 21 |
| III.2. Etat de l'art des méthodes de conception | 23 |
| III.3. Synthèse..... | 32 |
| Conclusion..... | 34 |
| Chapitre II. Modèle de produit..... | 35 |
| Introduction | 35 |
| I. Spécification d'un modèle de produit global..... | 35 |
| I.1. Niveau 1 : Représentation du besoin | 39 |
| I.2. Niveau 2 : représentation des exigences fonctionnelles du besoin..... | 42 |

| | |
|--|------------|
| I.3. Niveau 3 : représentation technologique..... | 46 |
| I.4. Niveau 4 : représentation technique et niveau 5 : représentation détaillée..... | 48 |
| I.5. Synthèse | 50 |
| II. Proposition d'un modèle de produit global..... | 50 |
| II.1. Niveau 1 : Représentation du besoin | 50 |
| II.2. Niveau 2 : représentation des exigences fonctionnelles du besoin..... | 58 |
| II.3. Niveau 3 : représentation technologique | 66 |
| Conclusion | 68 |
| Chapitre III. Processus de conception..... | 69 |
| Introduction..... | 69 |
| I. Processus de conception initial et spécifications | 69 |
| I.1. Méta-modèle d'élaboration des concepts | 69 |
| I.2. Spécification d'un processus de conception..... | 72 |
| II. Proposition d'un processus de conception | 73 |
| II.1. Processus de conception et pilotage | 74 |
| II.2. Processus de conception et projet..... | 76 |
| II.3. Processus de conception | 78 |
| Conclusion | 101 |
| Chapitre IV. Application et validation..... | 103 |
| Introduction..... | 103 |
| I. Application | 103 |
| I.1. Présentation du contexte d'application..... | 103 |
| I.2. Cadrage du système à concevoir..... | 105 |
| I.3. Pilotage de la conception | 113 |
| I.4. Conclusion de la conception | 126 |
| II. Validation | 126 |
| III. Synthèse et perspectives..... | 128 |
| Conclusion | 129 |
| Conclusion générale | 131 |

| | |
|---|------------|
| Bibliographie | 133 |
| Sigles et Abréviations..... | 140 |
| Glossaire..... | 141 |
| Table des matières..... | 145 |
| Table des Illustrations | 150 |
| Liste des tableaux | 153 |
| Annexes | 155 |
| IV. Les outils de la conception | 155 |
| IV.1. L’outil d’adéquation fonctionnelle | 155 |
| IV.2. La Sûreté de Fonctionnement | 155 |
| IV.3. L’Analyse de la Valeur..... | 158 |
| IV.4. Méthode d’Intégration de la Conception et du Soutien ICS : un nouvel outil | 159 |
| V. Les méthodes d’estimations prévisionnelles des caractéristiques de SdF..... | 161 |
| V.1. L’Analyse Préliminaire des Risques, des Dangers (APR, APD)..... | 161 |
| V.2. L’Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE)..... | 161 |
| V.3. L’analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC) | 162 |
| V.4. La Méthode des Combinaisons des Pannes Résumées (MCPR) | 162 |
| V.5. La méthode d’analyse HAZOP (HAZard and OPerability Study) | 163 |
| V.6. La Méthode du Diagramme de Succès ou de Fiabilité (MDS/MDF) | 163 |
| V.7. La Méthode de l’arbre des causes ou de Défaillance (MAC/MAD) | 163 |
| V.8. La méthode de la Table de Vérité et de la Table de Décision (MTV/MTD).. | 164 |
| V.9. La Méthode de l’Arbre des Conséquences ou des Arbres d’Evénements (MACQ/MAE)..... | 164 |
| V.10. La Méthode du Diagramme Causes-Conséquences (MDCC), | 165 |
| V.11. La Méthode de l’Espace des Etats (MEE)..... | 165 |
| VI. Les critères de conception d’un système maintenable | 165 |
| VI.1. Détectabilité / Testabilité..... | 165 |

| | |
|--|-----|
| VI.2. Accessibilité / Identification / Repérage / Visibilité | 166 |
| VI.3. Aptitude à la pose / dépose / Connectique / Démontabilité / Modularité / Interchangeabilité / Standardisation | 166 |
| VI.4. Manutention / Réglages / Etalonnage / Nettoyage | 167 |
| VII. Les Built-in Test ou Tests intégrés | 167 |
| VIII. La Maintenance Basée sur la Fiabilité | 168 |

Introduction générale

La conception de systèmes complexes (train, avion, char, etc.) constitue un problème industriel actuel important. En effet les entreprises doivent fournir des systèmes toujours plus sûrs, de meilleure qualité, dans des délais courts et répondant à l'ensemble des exigences de leurs utilisateurs. Ces contraintes impliquent pour les industriels de fournir des systèmes globalement performants, c'est à dire rentables pour l'entreprise et répondant aux besoins des utilisateurs tout au long du cycle de vie de ces systèmes. Cette caractéristique met intuitivement en évidence l'importance de la conception des systèmes complexes mais aussi de leur soutien logistique durant leur utilisation.

Ces remarques nous ont mené à réfléchir sur la performance globale d'un système et comment l'obtenir. C'est ainsi que, dans le cadre de ce mémoire, nous nous intéressons à la performance globale des systèmes complexes. Plus particulièrement, étant donnée l'importance de la phase de conception, nous nous intéressons à la prise en compte du soutien logistique des systèmes complexes durant cette phase.

Dans le premier chapitre de ce mémoire, nous précisons les concepts fondamentaux – système, cycle de vie et performance globale – sur lesquels s'appuient nos travaux. Dans un second temps, nous présentons un état de l'art des méthodes de conception contribuant à la recherche de la performance globale. L'analyse de ces méthodes montre qu'elles ne sont pas totalement adaptées à la recherche de la performance globale. En effet nous montrons que la plupart d'entre elles ne mettent en œuvre qu'une partie des phases et traitements requis.

C'est pourquoi, dans les deuxième et troisième chapitres, nous développons un modèle de produit et un processus de conception constituant notre proposition de méthode de conception, contribuant à la recherche de la performance globale.

Dans le deuxième chapitre, nous proposons un modèle de produit global. Une première partie décrit le modèle de produit développé au LAMIH sur lequel nous nous sommes appuyés, et parallèlement les spécifications nécessaires à la recherche de la performance globale. Dans une seconde partie, nous développons notre proposition de modèle de produit global intégrant les aspects liés au soutien logistique.

Dans le troisième chapitre, nous établissons les spécifications du processus de conception et nous mettons en évidence d'une part les liens organisationnels existant entre un processus, et plus particulièrement un processus de conception, et un projet, et d'autre part l'intérêt de la notion de pilotage de la conception. Dans une seconde partie, nous précisons le modèle de processus de conception permettant l'élaboration du modèle de produit défini dans le deuxième chapitre.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons l'application de nos travaux à un système de transport ferroviaire. Développée au sein de la société Alstom Transport, Unité de Valenciennes, cette étude nous a permis de valider une partie de nos propositions. Toutefois, les gains réels n'ont pu être chiffrés, l'étude industrielle n'étant pas terminée.

Ce travail nous permet de mettre en évidence des perspectives sur lesquelles nous concluons ce mémoire.

Chapitre I.
De la performance globale d'un produit

Introduction

La performance des systèmes industriels – de production, de transport ou d'armement et les produits* ou services qu'ils fournissent – est un enjeu essentiel de la compétitivité des entreprises. Elle constitue un objectif essentiel que nous nous proposons de préciser dans ce chapitre.

Nous consacrons la première partie de ce chapitre à préciser les concepts de système et de cycle de vie auxquels se réfère notre travail.

Nous présentons dans une deuxième partie la notion de performance*. Nous caractérisons la performance globale selon trois axes : le cycle de vie, la composition du produit et les acteurs intervenant au cours du cycle de vie, et enfin son évaluation.

Plusieurs méthodes* de conception* visant à atteindre la performance globale* ont été développées. Nous en présentons un état de l'art et en donnons une synthèse dans la troisième partie.

I. Système, cycle de vie

De nombreuses définitions d'un système* ont été proposées dans la littérature. Nous en présentons quelques-unes dans le paragraphe suivant. Leur analyse nous conduit à proposer une définition adaptée au cadre de nos travaux.

* L'astérisque signifie que le terme est défini dans le glossaire.

I.1. Définition d'un système

I.1.1. Quelques définitions existantes

Un système, selon [Le Moigne-94], est "un objet qui, dans un environnement, doté de finalités, exerce une activité et voit sa structure interne évoluer au fil du temps, sans qu'il perde pourtant son identité unique". Le Moigne exprime cette description générale d'un système de façon plus explicite sous la forme suivante : "quelque chose (n'importe quoi, présumé identifiable) qui *dans* quelque chose (environnement) *pour* quelque chose (finalité ou projet) *fait* quelque chose (activité = fonctionnement) *par* quelque chose (structure = forme stable) qui *se transforme* dans le temps (évolution)."

Pour sa part, [Le Gallou-92] fournit la définition suivante : "un système¹ est un ensemble² d'objets³ organisé⁴ en fonction d'un but⁵ et immergé dans un environnement⁶". Il définit chacun des termes de la façon suivante :

¹Système : outil conceptuel, création de l'esprit...

²Ensemble : ensemble formant une identité ou une unité cohérente et autonome...

³Objets : objets ou éléments réels ou conceptuels (individus, actions...)

⁴Organisé : muni d'un ensemble de relations, d'interrelations mutuelles, d'interactions dynamiques... (organisation ou structure...)

⁵But : ou d'un ensemble de buts, objectifs, projets, finalités ou fonctions de base...

⁶Environnement : environnement, univers ou sur-système, méta-système..."

Une troisième définition est proposée [AFNOR-94] dans la norme RG Aéro 000 40 qui définit un système comme "un ensemble structuré de produits constitutifs et faisant l'objet d'un cycle de vie. Il est constitué du système principal et du système de soutien".

Parce qu'ils permettent de saisir l'importance de l'ensemble des éléments d'un système durant son cycle de vie, nous précisons les concepts de système principal et système de soutien dans les paragraphes suivants.

I.1.2. Système principal

Le système principal est conçu pour accomplir une fonction[♦] requise par son utilisateur qui en spécifie les caractéristiques désirées. Pour que le système principal accomplisse sa mission dans les conditions définies par l'utilisateur et pour que ceci s'inscrive dans la durée, il faut mettre en œuvre un ensemble d'activités désignées par "logistique de soutien". Plus le système est complexe, plus la logistique de soutien prend un sens. Rappelons qu'un système complexe se caractérise par un nombre important de composants, un nombre important de types différents de composants, de nombreuses interactions entre les composants, la présence de perturbations et un environnement dynamique (exemple : train, avion, système de production) [Pesin et al.-97].

I.1.3. Logistique de soutien et système de soutien logistique

La logistique de soutien vise à assurer, dans les meilleures conditions économiques, la disponibilité[♦] des systèmes durant leur cycle de vie en tenant compte des conditions données d'utilisation. L'offre des moyens et prestations mis en œuvre pour atteindre ces objectifs est communément appelée "soutien logistique". NF X60-600 [AFNOR-88].

Le soutien logistique comprend neuf éléments définis par les normes MIL STD 1369 et 1388/1A [Blanchard-92][Prévost et Waroquier-94]. Les éléments du soutien logistique sont des fonctions et ressources regroupées dans trois catégories : la maintenance[♦], la gestion du personnel et l'environnement [Delsaut et al.-2000] (figure 1.1). Ces trois catégories comportent des éléments communs.

- La catégorie "maintenance" regroupe les fonctions de soutien suivantes :
 - la gestion des faits techniques et le plan de maintenance,
 - l'approvisionnement des rechanges,
 - le soutien des moyens informatiques de tests et de soutien,
 - la documentation et la gestion des données d'exploitation et de maintenance,
 - la formation des personnels d'exploitation et de maintenance.

La seule ressource de soutien de la catégorie "maintenance" est constituée par les équipements de tests et de soutien.

- La catégorie "gestion du personnel" regroupe le personnel d'exploitation et de maintenance (ressources), la formation, la documentation et la gestion des données (fonction).
- La catégorie "environnement" regroupe les infrastructures nécessaires à l'exploitation et au soutien du système global (ressource) et les fonctions emballage, manutention, transport, stockage du système.

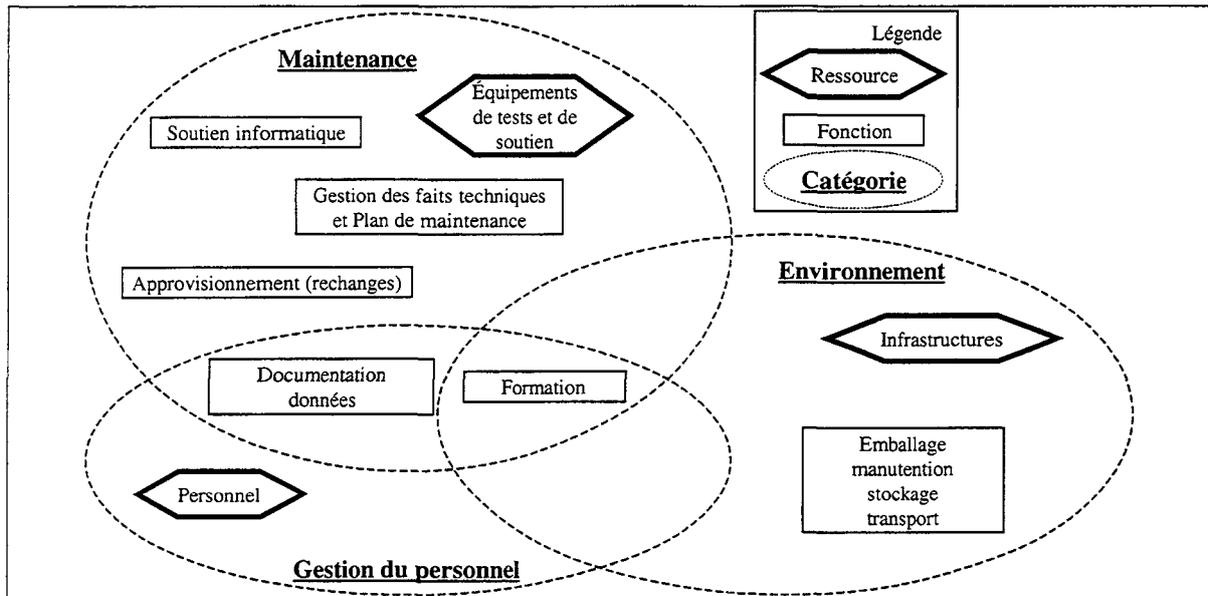


Figure 1.1 : Les fonctions et ressources du soutien logistique.

Le système de soutien constitue l'ensemble des ressources mettant en œuvre l'ensemble des fonctions du soutien logistique.

- Remarque : nous notons qu'un système de soutien peut lui-même nécessiter un système de soutien pour lui permettre d'assurer sa mission. Il constitue alors lui-même un système principal auquel est associé un système de soutien, et ce, de manière itérative, comme le montre la figure 1.2a. Dans le cadre de ce mémoire, nous considérons un couple (système principal, système de soutien) (figure 1.2b).

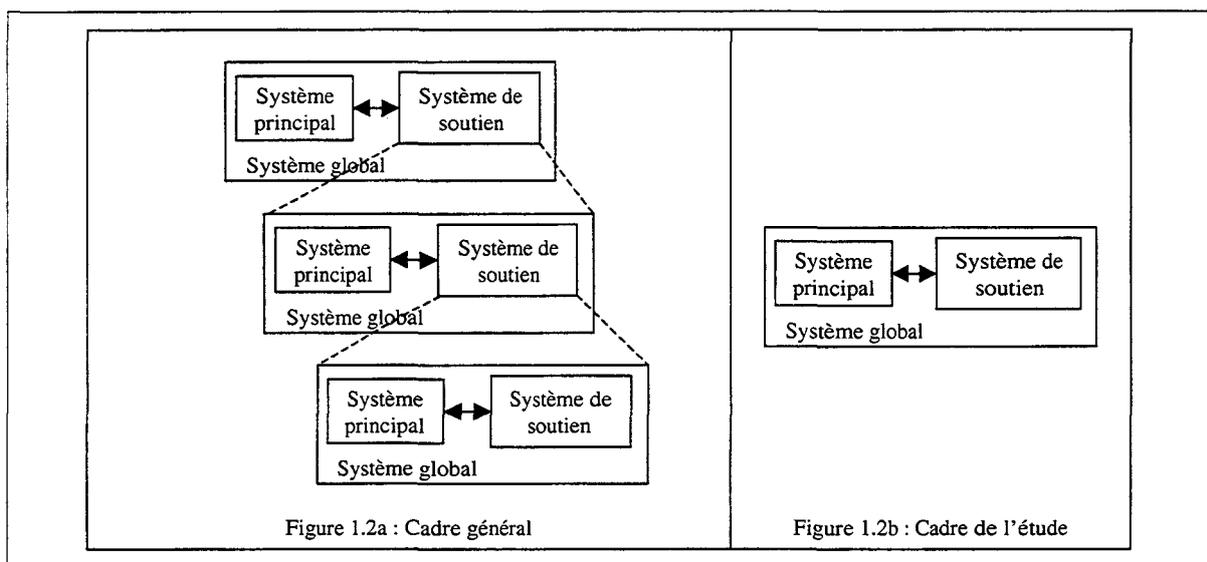


Figure 1.2 : Le processus itératif de décomposition des systèmes principaux et de soutien.

I.1.4. Analyse des définitions

La définition de Le Moigne met en évidence six caractéristiques d'un système, sensiblement différentes de celles utilisées dans la définition de Le Gallou. Chacun des aspects exprimés par Le Gallou est relatif à la composition physique et organisée d'un système dans un environnement. Mais Le Gallou ne fait pas référence à l'activité d'un système. Les six caractéristiques identifiées par Le Moigne sont totalement indépendantes les unes des autres, et présentent aussi bien la composition du système que sa fonction. C'est l'ensemble des caractéristiques qui définit un système. La norme RG Aéro 000 40 définit un système en référence au terme "produit" par rapport à un cycle de vie et à une décomposition en système principal et système de soutien.

Suite à cette analyse et compte tenu des objectifs de ce mémoire, nous nous intéressons plus particulièrement aux trois aspects suivants d'un système : l'activité du système, sa structure, sa fonction. C'est pourquoi nous retenons la définition suivante : "un système est une entité conçue dans un but défini (accomplir une mission requise par son utilisateur), et dans un environnement défini. Tout système comprend un système principal et un système de soutien en interaction".

En outre dans le cadre de ce mémoire, nous posons les hypothèses suivantes :

- nous nous plaçons dans le cadre de la recherche de la performance globale des systèmes complexes.
- un système peut être soit une entité génératrice (usine, ligne de fabrication...) d'un produit, soit une entité générée (système produit : produit manufacturé, service...) par un système générateur. Dans le cadre de ce mémoire, nous nous intéressons aux systèmes générés c'est à dire aux produits au sens de la norme NF X 50-150 qui définit un produit comme "ce qui est (ou sera) fourni à un utilisateur, pour répondre à son besoin. Le produit, résultat d'une activité, peut être un matériel, un service, un système, un ouvrage, un processus industriel ou administratif ou toute combinaison de ceux-ci" [AFNOR-94].

Ainsi, dans la suite de ce mémoire, nous considérons les systèmes produits complexes composés d'un système principal et d'un système de soutien. Nous utiliserons le terme "produit" pour désigner un système produit complexe.

Naturellement, un produit est "vivant" et évolue dans le temps. Les définitions précédentes doivent être complétées par la description de cette évolution, c'est à dire prendre en compte son cycle de vie.

I.2. Cycle de vie d'un produit

Le cycle de vie* d'un produit comporte plusieurs phases regroupant différentes activités [Gormand-86][Sénéchal-96][Meinadier-98] (cf. figure 1.3).

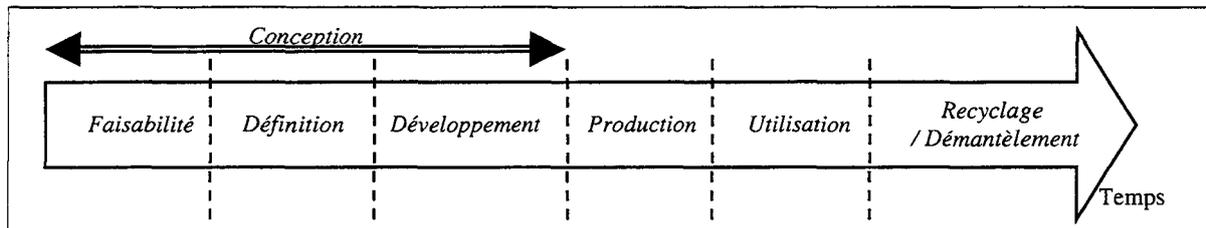


Figure 1.3 : Cycle de vie d'un produit [Deneux et al.-2000].

- Phase de conception : elle permet de traduire le besoin exprimé par un utilisateur en termes de caractéristiques technologiques, techniques, logistiques et économiques. La phase de conception comporte plusieurs étapes : faisabilité, définition et développement. Ces étapes sont définies par un ensemble de normes [MIL-STD 499, 499A et 499B (1994), EIA ANSI 632 (1997), IEEE 1220 (1995), RG AERO 00040] et du projet de norme ISO 15288 cités entre autres dans [Bellut-90][Petitdemange-91][AFNOR-94][Bourdichon-94]. Nous décrivons brièvement ces différentes étapes.
 - Phase de faisabilité : elle permet :
 - de formaliser le besoin du demandeur sous la forme d'un Cahier des Charges Fonctionnel* (CdCF) figé (dit de référence) et une version préliminaire de la Spécification Technique du Besoin (STB) (plus particulièrement STB au "niveau système"),
 - de présenter chaque concept étudié dans un avant-projet associé à une proposition financière (coûts et délais) pour la phase de définition,
 - d'évaluer la faisabilité technique et industrielle et de mettre en évidence les éléments critiques de chaque concept (performances, coûts, délais, aptitude technique et économique à l'exploitation).
 - Phase de définition du projet : elle permet :
 - d'approfondir l'étude des solutions techniques retenues précédemment, de comparer leurs performances et les risques correspondants,
 - de figer les STB au "niveau système",
 - d'établir la STB de premier niveau et si possible l'arborescence (organigramme technique) à respecter pour l'ensemble des spécifications,
 - de choisir la solution à développer,
 - de constituer le dossier de lancement du développement.

- Phase de développement propre du produit : elle consiste à étudier en détail la solution retenue à l'issue de la phase de définition afin d'aboutir à une définition qualifiée et productible en série des matériels livrables nécessaires à l'exploitation opérationnelle et au soutien du produit. Elle comprend les tâches* permettant d'obtenir la définition complète du produit et de chacun de ses constituants. Démarré au cours de cette phase, le processus* de qualification* doit permettre de démontrer que le produit défini répond au besoin spécifié et qu'il est productible (qu'on peut le produire).
- Phase de production : elle consiste à réaliser et à fournir à l'utilisateur le produit conforme à la définition. Cette phase est la phase de concrétisation du produit. Elle correspond à la mise en place complète des moyens et méthodes de production et leur validation, et à la fabrication du produit incluant les approvisionnements nécessaires et la fourniture des produits.

Nous remarquons que les phases de développement et de production peuvent être regroupées en une seule phase dans le cas où le programme aboutirait à une réalisation unitaire ou en très petites quantités. Cette phase est parfois appelée "stade de réalisation" et est alors précédée par la rédaction d'un "dossier de lancement de réalisation".

- Phase d'utilisation : c'est la phase de vie effective du produit. Pendant cette phase, le produit et les moyens nécessaires à l'exécution de la mission opérationnelle sont mis en service, utilisés et soutenus.
- Phase de recyclage / démantèlement (retrait de service) : cette phase consiste à préparer et à réaliser de façon coordonnée et conformément aux dispositions réglementaires en vigueur, la cessation totale ou partielle de l'utilisation du produit et le démantèlement des produits et des moyens associés. Cette phase commence par une décision de retrait de service total ou partiel. Les matériels démantelés peuvent être détruits, stockés, transformés ou réaffectés à d'autres utilisations dans le cadre d'autres programmes.

Pour répondre aux besoins de son utilisateur et de l'entreprise qui le génère, le produit doit tout au long du cycle de vie, présenter un certain niveau de performance. Dans le paragraphe suivant, nous caractérisons les notions de performance et de performance globale d'un produit.

II. Performance et performance globale

Bien que de nombreux auteurs aient travaillé à déterminer ce qu'elle recouvre, tous s'accordent à dire qu'il n'existe pas de définition explicite de la performance et de la performance globale [Gandois-92], [Jacot et Micaelli-96], [Berrah-97], [Neubert-97], [Ducq-99]. D'autre part, la plupart de ces auteurs se sont essentiellement intéressés à la performance globale et ont défini des critères de performance relatifs à l'entreprise.

[Berrah-97] a analysé un certain nombre de définitions de la performance industrielle issues des dictionnaires classiques de langue française, ainsi que celles proposées par [Boisvert-95], [Lebas-95], [Jacot-95]. Dans cette analyse, nous remarquons l'utilisation des concepts d'efficacité, de pertinence, d'efficience, ou d'effectivité. Ces concepts étant parfois utilisés dans des acceptations différentes de celles citées, nous ne les utilisons pas.

Concernant la performance d'un produit, certains auteurs [Azambre et Audoussert-92] parlent de "performances requises pour la réussite d'une mission". Ils estiment que "la mission [allouée au produit] a toutes les chances d'être réussie si tous les composants de l'assurance qualité sont réunis, à savoir : fiabilité[♦] en conception, maintenabilité[♦] en conception, aptitude au soutien logistique intégré, sécurité[♦] opérationnelle, ergonomie, adéquation des fonctions du produit au profil de mission".

La notion de performance globale fait, elle aussi, l'objet de définitions diverses. Certains la définissent "comme un mot d'ordre, un thème fédérateur qui souligne que "tout se tient" (technologie, organisation, marché, formation, recherche, financement, etc.), tant au sein des entreprises qu'entre les entreprises et leur environnement économique et même plus généralement la société" [Gandois-92][Jacot et Micaelli-96]. De même [Jacot et Micaelli-96] expliquent que selon eux, la notion de performance globale ne peut être clarifiée que par une déglobalisation de ce qu'elle recouvre. Ils tentent "d'effectuer une taxinomie des critères de performance de l'entreprise industrielle en s'appuyant sur la différenciation de quatre niveaux d'évaluation, correspondant aux quatre niveaux hiérarchisés de décision que l'on peut distinguer dans tout produit finalisé : niveau stratégique, niveau tactique, niveau opérationnel et niveau métropolitique". Par ailleurs, [Jacot-97] précise que la déglobalisation repose sur la distinction de trois niveaux d'évaluation, à savoir, un niveau physique (correspondant à la recherche de la productivité), un niveau marchand (recherche de la compétitivité) et un niveau financier (recherche de la rentabilité).

La performance globale est une notion trop complexe pour être simplement et exhaustivement définie. Sa définition dépend fortement du point de vue considéré. C'est pourquoi, compte tenu du cadre de notre étude, nous proposons un référentiel permettant de caractériser la performance globale d'un produit.

II.1. Caractérisation de la performance globale

Nous proposons de caractériser la performance globale selon trois axes (figure 1.4) que nous détaillons par la suite.

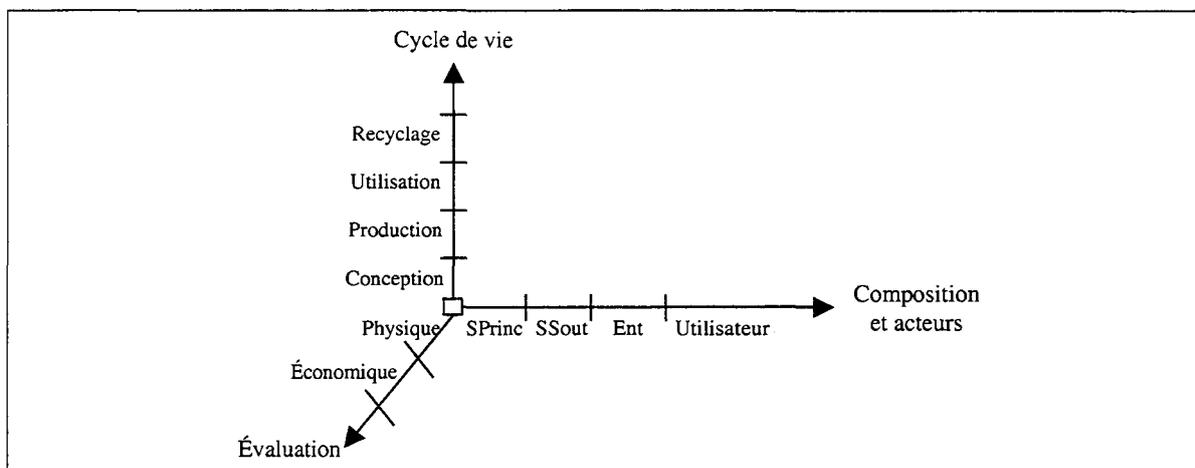


Figure 1.4 : Caractérisation de la performance globale.

II.1.1. Axe cycle de vie

Le premier axe concerne la performance sur le cycle de vie. Pour que la performance soit globale, il faut dans un premier temps qu'elle soit considérée sur l'ensemble du cycle de vie du produit. Ce qui signifie que chacune des phases du cycle de vie doit contribuer à la performance globale du produit. Il faut donc rechercher la performance du produit localement (pendant la phase en cours), mais dans l'objectif d'une performance sur la totalité du cycle de vie.

Nous pouvons traduire cette première caractéristique par la relation (1) suivante :

$$P1 = f(\text{Conc}, \text{Prod}, \text{Util}, \text{Rec}) \quad (1)$$

Où : P1 = performance selon le premier axe,

Conc : phase de conception,

Prod : phase de production,

Util : phase d'utilisation,

Rec : phase de recyclage / démantèlement.

II.1.2. Axe composition et acteurs intervenants

Le second axe concerne le triplet formé par le produit, l'entreprise et l'utilisateur. Les relations existant entre le produit, l'entreprise qui le conçoit et son utilisateur sont mises en évidence par la définition du cycle de vie. Par ailleurs nous avons considéré qu'un produit est composé d'un système principal et d'un système de soutien. Pour la performance globale d'un produit, il faut donc dans un second temps, tenir compte simultanément du système principal et du système de soutien, de l'entreprise qui les génère et de l'utilisateur. Si nous désignons SPrinc : le système principal, SSout : le système de soutien, Ent : l'Entreprise, Util : l'Utilisateur et P2 : la performance caractérisée suivant le second axe, nous pouvons écrire la relation (2) suivante :

$$P2 = f (SPrinc, SSout, Ent, Util) \quad (2)$$

Cette relation permet de considérer la globalité de la performance suivant le point de vue de la composition du produit et des acteurs intervenant au cours de son cycle de vie.

II.1.3. Axe évaluation

La performance globale d'un produit ne prend de sens que si elle est évaluée. Pour cela, il faut qu'elle soit mesurée et que les résultats soient comparés aux objectifs fixés. La mesure de la performance globale constitue le troisième axe de caractérisation. Cette évaluation doit être faite selon les deux axes précédemment définis.

La performance globale PG est ainsi fonction de l'évaluation des performances P1 et P2 (cf. relation (3)) :

$$PG = f (E (P1, P2)) \quad (3)$$

Nous reprenons et détaillons chacun de ces axes dans les paragraphes suivants.

II.2. Performance sur le cycle de vie (P1)

Nous avons décrit précédemment les phases du cycle de vie d'un produit et leur contenu. Il est clair que les décisions concernant le produit, prises en phases de conception et de production, ont un impact sur les phases suivantes. En effet ces phases doivent garantir que le futur produit répondra au cahier des charges et aux besoins de l'utilisateur pendant les phases d'utilisation et, éventuellement, de recyclage / démantèlement (cf. figure 1.5).

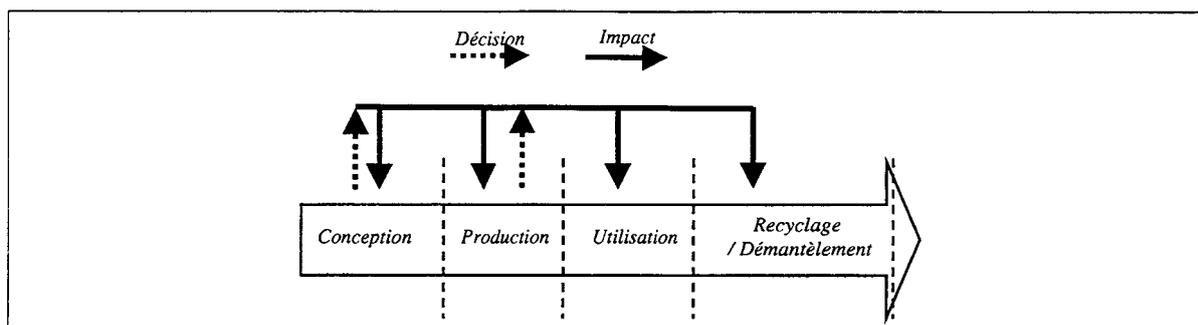


Figure 1.5 : Impact des décisions prises en phases de conception et de production sur le cycle de vie.

Nous décrivons l'impact de chacune des phases du cycle de vie sur la performance du produit, et des décisions prises à chacune de ces phases.

Durant la phase de conception, les études doivent considérer la totalité du cycle de vie du produit à la fois du point de vue de l'utilisateur et du point de vue de l'entreprise qui le génère. En effet, l'objectif de cette phase est :

- d'assurer que le produit répondra au besoin de son utilisateur pendant les phases d'utilisation,
- d'assurer qu'il répondra aux normes liées au recyclage et au démantèlement,
- de préparer sa production.

Elle permet également à l'entreprise d'estimer sa propre performance.

Durant la phase de production, l'entreprise assure la réalisation du produit dans le respect de la définition réalisée au cours de la phase de conception. Elle doit garantir que les performances estimées deviennent réelles.

Au cours de ces deux phases, l'entreprise, par sa propre performance, doit assurer la performance du produit dont elle assure la conception et la réalisation.

Au cours de la phase d'utilisation, la performance du produit s'exprime par sa capacité à remplir la mission pour laquelle il a été conçu et ainsi à répondre au besoin de son utilisateur.

La performance en phase de recyclage / démantèlement caractérise l'impact du produit en fin de vie sur l'environnement notamment écologique (récupération, recyclage écologique).

Il est possible de déterminer à chacune de ces phases la performance du produit, caractérisée en fonction de critères spécifiques. Mais la performance d'un produit évaluée en utilisation sera peut être différente de la performance prévue en conception. En effet si lors de la production, une machine est défectueuse ou un composant n'est pas exactement

de la qualité souhaitée, la performance du produit s'en trouve amoindrie. C'est pourquoi la somme des performances locales ne constitue pas la performance globale. En outre, il est important qu'à chacune de ces phases, la performance du produit soit estimée par rapport à la performance attendue aux phases suivantes et sur l'ensemble du cycle de vie. Les phases du cycle de vie ont donc chacune leur importance dans la construction de la performance globale mais pour cela il faut que leur rôle soit positionné sur la totalité du cycle de vie.

C'est aussi pourquoi nous pensons qu'il est indispensable de définir la globalité de la performance sous l'angle de la composition du produit et des acteurs intervenants au cours de son cycle de vie.

II.3. Performance en fonction de la composition et des acteurs (P2)

Pour que le produit réponde au besoin de performance défini par l'utilisateur, il faut que l'entreprise qui le génère soit, elle aussi, globalement performante. Inversement si le produit satisfait son utilisateur, il représente un atout pour son entreprise. La performance du produit a donc également un impact sur le système de production qui l'a généré.

A ce propos, [Berrah-97] définit les notions de performance interne et performance externe de l'entreprise. "La performance externe est déclinée à travers d'une part le jugement de l'utilisateur au regard du produit qu'il reçoit (selon les délais de prise de commande, la qualité du produit...), d'autre part à travers le jugement du fournisseur en amont (de l'entreprise) (selon le nombre de retours, la vitesse à laquelle les factures sont payées,...). La performance interne concerne essentiellement l'efficacité des ressources utilisées. Les performances interne et externe ne sont pas indépendantes" [Berrah-97].

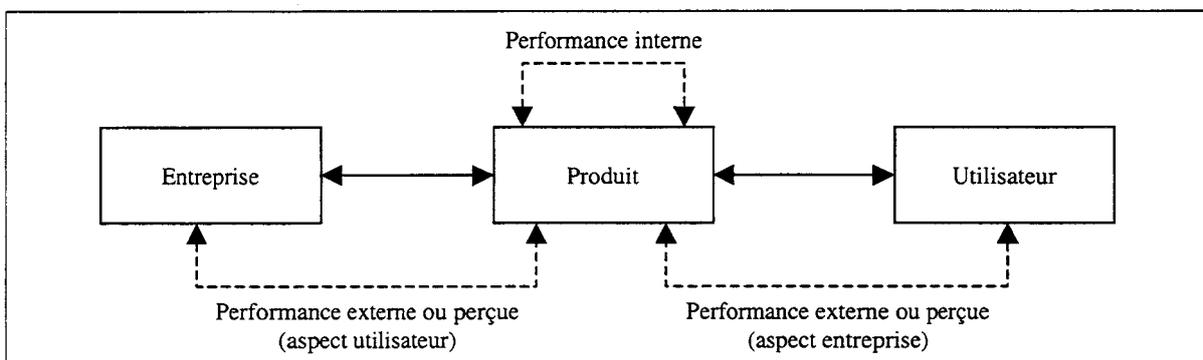


Figure 1.6 : Performance externe et performance interne.

Ces notions peuvent être appliquées au système produit. Ainsi la performance globale d'un produit dépend de sa performance interne et de sa performance externe (cf.

figure 1.6). La performance externe dépend d'une part de la performance de l'entreprise qui le génère et d'autre part de son utilisateur. La performance interne du produit dépend de la performance du système principal et du système de soutien.

Comme toute performance, la performance globale doit être mesurée et évaluée.

II.4. Evaluation de la performance globale du produit ($E(P1, P2)$)

L'évaluation de la performance globale passe par une mesure de cette performance et la comparaison par rapport aux objectifs prévus. Ces objectifs sont fixés par l'utilisateur mais aussi par l'entreprise. En effet le produit doit répondre au besoin de son utilisateur et donc aux objectifs qu'il a déterminés. Mais la performance du produit est également liée à la performance de l'entreprise.

[Manata-96] a caractérisé la performance globale d'un produit par une triple adéquation fonctionnelle, technique et économique. Les termes de cette triple adéquation forment deux aspects distincts de la performance globale. En effet l'adéquation fonctionnelle et technique se mesure sur des critères physiques du produit. Ces critères doivent permettre de mesurer la satisfaction de l'utilisateur relativement aux caractéristiques physiques intrinsèques du produit. Ces caractéristiques définies en conception sont matérialisées en phase de production. Par exemple, la fiabilité intrinsèque d'un composant du produit peut être altérée si le composant est mal agencé lors de la conception (proximité de composants gênants) ou si le composant est manipulé ou installé de façon brutale lors de la production. D'autre part, l'adéquation économique correspond à la composante économique de la performance du produit et de son système de production.

Nous décrivons dans les paragraphes suivants, les différentes notions associées aux composantes physiques et économiques de la performance globale.

II.4.1. La composante physique de la performance globale

La composante physique de la performance globale d'un produit (que nous désignons par la suite "performance physique", pour plus de simplicité) résulte selon [Crauet-96] de la mise en œuvre de trois ingénieries :

- l'ingénierie de conception,
- l'ingénierie logistique,
- l'ingénierie de sûreté de fonctionnement.

L'ingénierie de conception correspond aux activités de la phase de conception du produit. Cette ingénierie est essentiellement l'activité de l'entreprise (même dans le cas de l'ingénierie concourante mettant en jeu plusieurs acteurs). Elle détermine la performance

du produit avant sa mise en service. Elle met en jeu les performances du système de production (qu'il existe ou non avant la conception du système-produit).

L'ingénierie logistique correspond à la conception et à la mise en œuvre du système de soutien. Sa mise en œuvre doit permettre d'assurer la disponibilité opérationnelle du produit en utilisation au meilleur coût.

L'ingénierie de sûreté de fonctionnement constitue la "science des défaillances". Elle correspond à l'aptitude d'un produit, au maintien dans le temps de la qualité du service qu'il délivre. Elle consiste à connaître, évaluer, prévoir, mesurer et maîtriser les défaillances d'un produit [Zwingelstein-96]. Il s'agit d'un concept global qui comprend principalement les caractéristiques de fiabilité (aptitude à la non-défaillance), de maintenabilité (aptitude à la réparation), de disponibilité (aptitude à l'emploi) et de sécurité (aptitude à la non-agression des individus et de l'environnement) [Villemeur-88][Prévoist et Waroquier-94][Aoussat-96][Bétourné et Van der Vliet-98](voir annexe). Mise en œuvre pendant la conception, l'ingénierie de sûreté de fonctionnement permet de déterminer les caractéristiques intrinsèques du système principal à partir desquelles la mise en œuvre de l'ingénierie logistique permet de déterminer les caractéristiques du système de soutien. Nous considérons que les caractéristiques de sûreté de fonctionnement sont des indicateurs de la performance physique du produit. En effet la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la sécurité du produit résultent d'une part de sa conception et d'autre part de la mise en œuvre de l'ingénierie logistique. Ces caractéristiques de la performance physique du produit sont définies et estimées en conception puis évaluées en utilisation. Les caractéristiques de sûreté de fonctionnement ne sont pas les seuls indicateurs de la performance physique. C'est le cas notamment de l'ergonomie du produit.

II.4.2. La composante économique de la performance globale

La composante économique de la performance globale du produit (ou performance économique) correspond à l'évaluation de son coût global. Le coût global est formé des coûts regroupant toutes les dépenses liées à chacune des phases du cycle de vie du produit [Gormand-86][Bellut-90][NF X 50-150, AFNOR-94].

Nous désignons par

| | |
|---|---|
| <i>CAnn</i> : Coûts Annexes, | <i>CInd</i> : Coût d'indisponibilité, |
| <i>CACq</i> : Coût d'acquisition, | <i>CMaint</i> : Coût de Maintenance, |
| <i>CConc</i> : Coût de Conception, | <i>CProd</i> : Coût de Production, |
| <i>CDem</i> : Coût de Démantèlement, | <i>CPer</i> : Coût de Perturbation, |
| <i>CExpl</i> : Coût d'Exploitation, | <i>CRec</i> : Coût de Recyclage, |
| <i>CGCV</i> : Coût Global de Cycle de Vie*, | <i>CUtil</i> : Coût d'utilisation, |
| <i>CGP</i> : Coût Global de Possession*, | <i>MC</i> : Marge Constructeur (producteur du produit). |

Tableau 1.1 : Liste des abréviations.

- L'utilisateur supporte le coût global de possession CGP (1) du produit qui comprend le coût d'acquisition (2), le coût d'utilisation (3) et les coûts de recyclage et de démantèlement [Bellut-90][CETIM-99]. Le coût global de possession CGP s'exprime ainsi par :

$$CGP = CACq + CUtil + CRec + CDem \quad (1)$$

- Le coût d'acquisition (2) correspond au prix de vente du produit à son utilisateur, et comprend : les coûts des phases de conception (faisabilité, définition, développement), et de production, les coûts annexes supplémentaires, la marge du constructeur et les taxes. Le coût d'acquisition est calculé suivant la relation (2) ci-dessous :

$$CACq = CConc + CProd + CAnn + MC + taxes \quad (2)$$

- Le coût d'utilisation (3) comprend les coûts d'exploitation du produit ainsi que les coûts d'indisponibilité et les coûts de perturbation (coûts engendrés par la perte de la disponibilité du produit et la gêne sur l'ensemble de l'organisation de l'utilisateur, résultant de cette immobilisation ; ces coûts représentent un manque à gagner pour l'utilisateur), les coûts de maintenance [NF X 60-503, AFNOR-88] [Beauxerois-95][CETIM-99]. Le coût d'utilisation est calculé suivant (3) :

$$CUtil = CExpl + CInd + CPer + CMaint \quad (3)$$

Or la marge du constructeur sur la vente du produit (qu'elle soit définie par le marché ou par le constructeur) et les taxes incluses dans le coût d'acquisition, ne sont pas des paramètres liés directement au produit et à son utilisation. C'est pourquoi nous

distinguons le coût global de possession CGP du coût global de cycle de vie CGCV qui est alors défini par :

$$CGCV = CGP - MC - taxes \quad (4)$$

Dans la suite de ce mémoire, nous ne considérons que le coût global de cycle de vie des produits, et nous utiliserons pour plus de simplicité le terme "coût global".

Le coût global représente le critère économique de la performance du produit. En effet il représente l'ensemble des coûts engendrés lors de chacune des phases du cycle de vie et inclut les aspects liés au produit (système principal, système de soutien) et au système de production.

Nous considérons ainsi le coût global comme l'indicateur de la performance économique du produit.

II.5. Synthèse

Dans cette partie, nous avons caractérisé la performance globale selon trois axes (cf. figure 1.6).

Le premier axe indique que la performance globale du produit concerne la totalité du cycle de vie, et que chacune des phases du cycle de vie y contribue.

Le second axe traduit le fait que la performance globale dépend également d'une part de la performance interne du produit, c'est à dire de la performance du système principal et du système de soutien, et d'autre part de la performance externe du produit, c'est à dire la performance liée à l'entreprise et à son utilisateur.

Le troisième axe caractérise l'évaluation des composantes de la performance globale, c'est à dire la composante physique et la composante économique. De façon plus générale, nous considérons plus simplement que la performance économique regroupe tous les aspects monétaires et que la performance physique regroupe tous les aspects non monétaires.

Les contraintes liées à chacun de ces axes mettent en évidence la difficulté d'estimer et d'obtenir une performance globale. Ceci constitue notre problématique.

II.6. Problématique de la recherche de la performance globale

La difficulté des industriels de nos jours est de rechercher la performance globale du produit afin de fournir une réponse adaptée à la réalité du marché actuel. La recherche de la performance globale doit s'orienter suivant les trois axes caractérisant la performance.

D'autre part, les critères de performance globale du produit sont différents pour le producteur et l'utilisateur. En effet, pour le producteur, le produit doit contribuer à sa compétitivité, sa rentabilité, sa productivité... Pour l'utilisateur, il doit répondre à ses attentes en termes de qualité, délai, coût... Ces critères peuvent être classés selon qu'ils concernent la composante physique ou la composante économique de la performance globale. Pour que cette performance soit mesurée, il faut mettre en place un ensemble d'indicateurs différents selon qu'ils correspondent à la composante physique ou économique d'une part, et d'autre part selon qu'ils représentent un critère de performance pour le producteur ou un critère de performance pour l'utilisateur.

Toutes ces conditions engendrent un ensemble de problèmes à chacune des phases du cycle de vie.

- En conception :
 - quels méthodes et modèles[♦] de conception, de validation de la conception sur la totalité du cycle de vie faut-il utiliser pour obtenir la performance globale désirée ?
 - comment trouver une ou plusieurs solutions représentatives d'une performance globale ?
 - quelles sont les performances prises en compte ? Comment les estimer ? Quels indicateurs faut-il définir ?
 - comment choisir la meilleure solution, celle qui est représentative de la performance globale ?
- En production :
 - Comment garantir que la production permettra d'obtenir la performance globale du produit ?
 - Quels sont les indicateurs qui permettent d'évaluer la performance du produit et du système de production qui le génère ?
 - Comment évaluer/estimer la pertinence de ces indicateurs ?

- En utilisation :
 - évaluation de la performance du produit en exploitation : quels critères retenir, mesurer ? Comment réaliser les mesures ?
 - maintien de la performance dans le temps : quels sont les moyens mis en place pour assurer le maintien de la performance désirée ? Quand et comment sont-ils conçus ?
- En recyclage / démantèlement :
 - Comment assurer le démantèlement le plus performant possible ? Comment mesurer cette performance ?

Par ailleurs de nombreuses études ont montré l'importance de la phase de conception dans la construction du coût global. Le rôle de la phase de conception par rapport au coût global est essentiel [Sénéchal-96][Petitdemange-91][Lorino-91]. On estime d'ailleurs en général que 70 % à 80 % des coûts de réalisation (industrialisation et production) d'un produit sont engagés par les choix effectués en phase de conception, alors que l'incidence du coût de cette phase n'est que de 5 % à 10 % du coût global du produit. D'autre part, il est évident que plus on avance dans le cycle de vie du produit, moins les décisions prises influent sur le coût final, et plus le coût des modifications des décisions est important. Les erreurs de conception affectent tous les produits et sont progressivement plus onéreuses à corriger au fur et à mesure que la phase de développement se déroule. Il n'est jamais aisé ni économique de changer la conception d'un produit une fois que la production a commencé [O'Connor-91]. La figure 1.7 illustre les remarques précédentes :

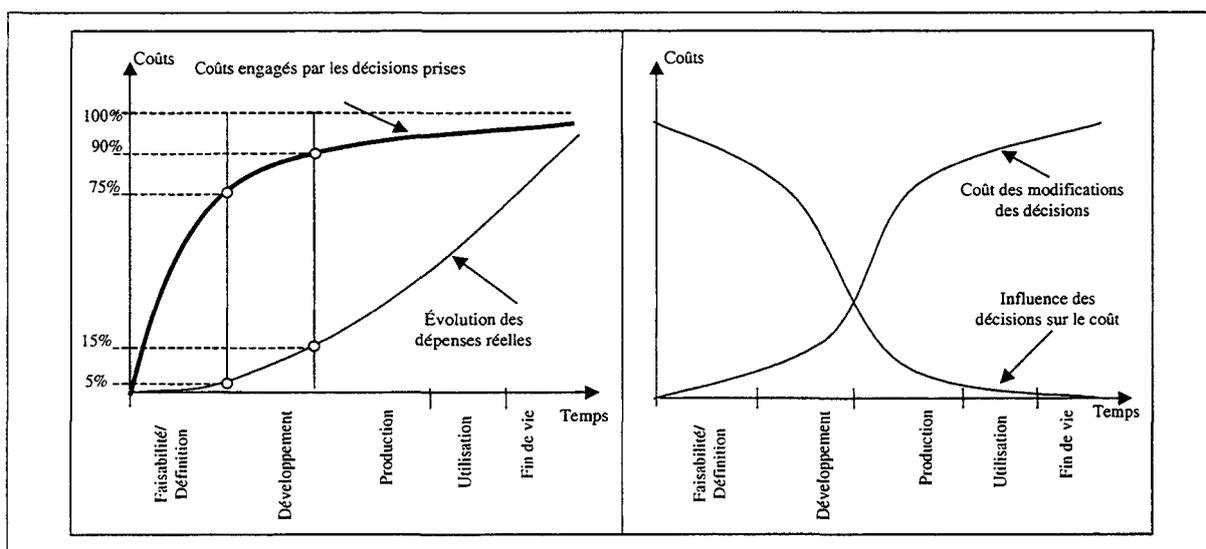


Figure 1.7 : Evolutions des coûts par rapport au cycle de vie d'un produit.

La phase de conception joue donc un rôle important dans la construction de la performance globale. Or la conception est une activité cognitive complexe comprenant un grand nombre de tâches, demandant la coopération d'un ensemble d'acteurs appelés à participer à l'activité de conception. De par sa complexité, la conception nécessite l'utilisation d'une méthode [Mostow-85][Buccarielli-88][Stephanopoulos-89][Darses-94][Jacquet-98].

C'est pourquoi dans la suite de ce mémoire, nous nous intéressons à la conception et en particulier aux méthodes de conception contribuant à la recherche de la performance globale d'un produit.

III. Méthodes de conception

Dans la première partie de ce paragraphe, nous décrivons une typologie des méthodes de conception structurée suivant les trois axes de la performance identifiés au paragraphe précédent.

Dans une seconde partie, nous présentons un état de l'art des méthodes de conception contribuant à la recherche de la performance globale.

III.1. Typologie des méthodes de conception

Cette typologie est construite sur les critères de classification correspondant aux axes de caractérisation de la performance globale.

1. Le premier critère est relatif à la prise en compte de la totalité du cycle de vie.
2. Le second critère est relatif aux éléments composant le produit et aux acteurs intervenant lors de la conception : système principal, système de soutien, et entreprise qui les génère. Dans le cas particulier de l'entreprise, compte tenu des objectifs de ce mémoire, nous ne considérons que la prise en compte du système de production.
3. Le troisième critère est la prise en compte de la performance économique, c'est à dire la prise en compte du coût global de cycle de vie.
4. Le quatrième critère est relatif à la performance physique. Ce critère comprend la mise en œuvre de l'ingénierie de conception (que nous détaillons dans la suite), de l'ingénierie de sûreté de fonctionnement, et de l'ingénierie logistique. Les outils de ces ingénieries sont décrits en annexe.

Concernant la mise en œuvre de l'ingénierie de conception, elle correspond à l'approche de conception (algorithmique et/ou axiomatique) des méthodes et à la mise en œuvre d'un modèle de produit et/ou d'un processus de conception[♦]. Deux types d'approches de conception peuvent être distingués [Jacquet-98] : l'approche algorithmique

et l'approche axiomatique, que nous définissons dans la suite. Ces deux approches font référence à deux concepts : le modèle de produit et le processus de conception formant une méthode de conception [Krause et al-93]. Le modèle de produit consiste en une accumulation logique de toutes les informations qui sont en rapport avec le produit durant son cycle de vie. Le processus de conception est représenté comme le travail nécessaire au développement du produit ou comme le processus de modélisation du produit faisant référence à un ensemble de fonctions (technique, gestion) nécessaires à la transformation de l'idée initiale en produit final.

La première approche dite axiomatique se caractérise par un ensemble de domaines de conception (client, fonctionnel, physique...) et par un ensemble d'axiomes amenant à une conception acceptable [Suh-90][Yoshikawa-89]. Cette approche a l'avantage de fixer le cadre de travail mais ne précise pas comment agir au sein de ce cadre.

La seconde approche est dite algorithmique [Pahl et Beitz-84] et se caractérise par un ensemble de tâches de conception distinctes (spécification, conception détaillée...) auxquelles est associé un ensemble d'étapes permettant de fournir les résultats indispensables à l'enclenchement de la tâche aval. Son organisation est séquentielle mais elle manque de précision sur les différentes étapes composant chacune des phases.

[Jacquet-98] a montré qu'il est possible d'établir une analogie entre ces deux approches de conception. L'approche algorithmique est plus adaptée à guider le concepteur dans son travail car elle détermine plus précisément les opérations (phases et étapes) nécessaires au passage du domaine fonctionnel vers le domaine physique. L'approche axiomatique est intéressante par son axiome d'indépendance car il permet de décomposer un problème complexe en sous-problèmes indépendants de complexité acceptable.

Nous présentons dans la suite, un état de l'art des méthodes de conception suivant les critères typologiques décrits ci-dessus.

III.2. Etat de l'art des méthodes de conception

Nous avons retenu les méthodes de conception qui contribuent à la recherche de la performance globale des produits :

- Le Design for Manufacturing (DFM),
- le Total Quality Management (TQM),
- la Conception à Coût Objectif (CCO),
- le Soutien Logistique Intégré (SLI),
- la démarche de conception simultanée Sûreté de Fonctionnement et Soutien Logistique Intégré,
- la démarche globale de conception de produits nouveaux,
- la démarche de conception multimétiers.

III.2.1. Le Design For Manufacturing (DFM)

Le "Design For Manufacturing" (DFM) est une méthode complète de développement de produit qui applique des idées proches de l'Ingénierie Concurrente [Manata-96][Gama-98]. Elle consiste à prendre en compte en phase de conception l'ensemble des contraintes et savoir-faire liés à la production du produit. Cette approche recherche l'optimisation de la combinaison marché – produit – procédé. Elle consiste à minimiser le coût global du produit à travers la recherche de solutions industrielles de conception permettant de répondre mieux aux besoins des clients et facilitant la réalisation fiable du produit. Pratiquement la méthode est contenue dans un guide décrivant les activités à entreprendre pour améliorer la compétitivité et la productivité d'un produit. Le guide DFM comporte sept étapes. DFM est donc une méthode algorithmique utilisant la notion de modèle de produit et de processus de conception. De récents travaux ont permis de développer également un modèle de processus de fabrication [Giachetti-99]. Les six premières étapes permettent de définir la conception optimale en clarifiant tous les aspects de base concernant la fonctionnalité et la productivité, la septième aide à réaliser les dessins de détail du produit mettant en valeur tous les potentiels de la conception choisie [Suh-90][Zeid-91][Lee et Hahn-96][Giachetti-99]. La méthode DFM souffre d'un manque d'organisation, les outils utilisés ne sont pas nécessairement coordonnés les uns par rapport aux autres [Manata-96].

La méthode DFM est une méthode algorithmique, mettant en œuvre un processus de conception qui consiste à prendre en compte en conception les contraintes liées à la production du produit pour minimiser le coût global. Il contribue donc à la recherche de la performance globale du produit. Mais il ne se concentre que sur les premières phases du cycle de vie. En outre le système de soutien n'est pas développé. Le maintien de la performance au cours du cycle complet n'est nullement envisagé, et l'ingénierie logistique

n'est pas mise en œuvre. Le produit ne peut donc pas être globalement performant sur le cycle de vie, que ce soit sur les aspects physiques ou économiques.

III.2.2. Le management total de la qualité (TQM)

Au Japon, le Total Quality Control (ou Total Quality Management, management total de la qualité) signifie le management par la maîtrise de la qualité (Quality Control) à tous les niveaux de l'entreprise, conjointement avec l'engagement d'une stratégie d'entreprise liée à la qualité. Aux Etats Unis, on a préféré le terme Total Quality Management ou encore Company Wide Quality Control (CWQC), le premier étant désormais le plus répandu. En France, le terme retenu par la normalisation est "management total de la qualité", équivalent au Total Quality Management [Akao-93]. Le Total Quality Control (ou Total Quality Management) correspond à la mise en œuvre d'une ingénierie de conception utilisant des diagrammes, tableaux et matrices utilisés par la méthode Quality Function Deployment.

Le Quality Function Deployment représente, au sens restreint du terme, les activités ou fonctions ayant un impact sur la qualité (conception, industrialisation, production, etc.). Dans une acceptation plus large, il représente la combinaison des activités ou fonctions ayant un impact sur la qualité (conception, industrialisation, production, etc.) ainsi que les matrices de déploiement de la qualité associées.

Le Quality Function Deployment propose des méthodes spécifiques pour garantir la qualité à chaque étape du procédé de développement des produits, afin de traduire les exigences des clients en objectifs de conception et en points clés qui seront nécessaires pour assurer la qualité en production. Il permet de développer un produit par le déploiement méthodique des relations entre les exigences et les caractéristiques, depuis chaque élément constitutif des fonctions qualité requises jusqu'à chaque élément du produit ou du procédé. La qualité globale du produit résultera de ce réseau de relations.

Une conception utilisant le Quality Function Deployment doit prendre en considération autant l'aspect "technologie" que "fiabilité" et "coût", qui correspondent respectivement aux termes Technology Deployment (TD), Reliability Deployment (RD) et Cost Deployment (CD) [Akao-93].

Le TQM est une méthode algorithmique, basée sur la notion de processus de conception. Il permet le développement d'un produit dans un objectif de qualité totale et conjugue dans cet objectif les performances physiques et économiques du produit, par la mise en œuvre de l'ingénierie de sûreté de fonctionnement et la prise en compte des coûts. La méthode permet par la décomposition du besoin et des contraintes, de déterminer une solution supposée optimale par rapport au besoin du client. Elle utilise pour cela des méthodes telles que la maison de la qualité ou le déploiement des fonctions. Mais la

méthode considère que l'atteinte des objectifs de qualité du produit dépend de la qualité de son système de production. Elle ne prend en compte le cycle de vie du produit que jusqu'à la phase de remise au client du produit global terminé.

Elle ne permet donc pas une prise en compte de la performance globale sur la totalité du cycle de vie. En effet les aspects concernant le maintien de la performance au cours du temps n'apparaissent pas. L'ingénierie logistique n'est pas abordée. Les aspects relatifs aux phases d'utilisation et de retrait de service sont occultés au profit des phases de conception et de production. De plus la méthode ne considère pas le coût du produit sur la totalité du cycle de vie mais s'attache plus particulièrement au coût engendré par sa conception et sa production.

III.2.3. La Conception à Coût Objectif (CCO)

La CCO est une méthode de gestion de programme s'intégrant dans le développement d'un produit nouveau. Le coût objectif est le coût de production qui sera à tenir en fin de conception. Elle est basée sur [Bellut-90][Prévoist et Waroquier-94] :

- la fixation d'un coût (ou prix) objectif plafond, prédéterminé et fixé indépendamment de toutes références à des coûts de solution,
- la mise en œuvre dès le départ du programme, d'une organisation, de procédures et de règles d'arbitrage spécifiques,
- l'identification et la description du besoin de l'utilisateur, sous forme ouverte et négociable.

La conception à coût objectif est un acte de management qui intègre la performance économique au même niveau que la performance physique, au tout début de la conception. L'objectif de la méthode est de maîtriser les coûts et les performances, et de trouver le meilleur compromis entre ces deux paramètres. La méthode consiste à [Bellut-90][Prévoist et Waroquier-94] :

- définir le juste besoin de la demande du client en impliquant dès le début des études toutes les parties prenantes à la future réalisation par une analyse méthodologique et objective du besoin en termes de fonctions à réaliser,
- la fixation d'un coût et de son référentiel associé, mettre en place une structure de développement avec un plan intégré de maîtrise de la valeur[♦],
- établir une motivation (contractuelle ou autre) pour que toutes les parties prenantes soient intéressées par un produit final compétitif,
- une définition de la composition du produit par optimisation du rapport coût sur performances en cohérence avec les contraintes du marché,
- la mise en œuvre des outils de Pilotage du Développement des Systèmes (PDS) pour tenir les objectifs du rapport coût sur performances en tenant compte des délais,

- susciter l'émergence des dossiers de coûts objectifs de production dès le début du développement pour se doter d'un tableau de bord permettant de gérer les coûts et de mettre en place les actions correctives d'analyse de la valeur[♦] dès qu'une dérive apparaît, et donc mettre en œuvre les revues économiques à systématiser,
- vérifier la cohérence totale des activités de PDS, de gestion de projet[♦] et des revues associées.

La CCO se déroule en trois phases principales qui sont : la conception du produit et l'établissement du barème associé, les engagements auprès des fournisseurs, le suivi technico-industriel des fournisseurs. Durant la phase de conception du produit, la CCO agit sur la définition du besoin et la conception du produit. Lors des engagements auprès des fournisseurs, elle porte sur l'industrialisation puis sur la production et l'exploitation.

La conception à coût objectif est une méthode algorithmique. Elle porte essentiellement sur le coût global du produit et donc sur la performance économique de celui-ci. Elle contribue donc à la recherche de la performance globale du produit. Mais la performance physique n'est pas abordée. La mise en œuvre des ingénieries de sûreté de fonctionnement et logistique est absente, bien que la phase d'exploitation soit prise en compte.

III.2.4. Le Soutien Logistique Intégré

Le soutien logistique intégré a pour objectif d'assurer la disponibilité d'un système principal au meilleur coût (MIL STD 1369). Pour cela il met en œuvre :

- l'analyse du soutien logistique (ASL) pour la conception du système de soutien et permet d'assurer l'adéquation de celui-ci au système principal en le lui associant dès la conception,
- la conception, la réalisation des fonctions et ressources du soutien,
- le suivi du produit global en service.

Le Soutien Logistique Intégré est un concept développé par les militaires américains, visant l'intégration à la conception du système principal dès l'identification du besoin de l'utilisateur, des éléments nécessaires au maintien de la disponibilité du système principal (par un système de soutien), en fonction des caractéristiques qui la conditionnent dans des conditions d'utilisation données (profil d'emploi) en recherchant un optimum économique [O'Connor-91][Prévoist et Waroquier-94][Betourné-98]. L'efficacité opérationnelle, la disponibilité et les coûts totaux de déploiement et de soutien sont tous considérés [AFNOR-88][Pons et Chevalier-93][Prévoist et Waroquier-94][Delsaut et al-99a]. Dans le cadre du Soutien Logistique Intégré, le système de soutien est conçu en même temps que le système principal, par l'application de la méthode d'Analyse du Soutien Logistique décrite ci-dessous.

L'analyse du soutien logistique (ASL) est définie dans la norme MIL STD 1388/1A comme la mise en œuvre sélective d'efforts scientifiques et techniques, entreprise depuis la phase d'acquisition d'un produit, et faisant partie intégrante du processus d'étude et de conception, dans le but de définir le système de soutien et d'atteindre les objectifs du Soutien Logistique Intégré et d'aptitude au soutien. C'est un processus itératif [Prévoist et Waroquier-94] d'identification du besoin, de définition, de quantification, de choix et de compromis, d'essais et d'évaluation, visant à préparer et à assurer la disponibilité, la fiabilité et la pérennité d'un produit et de son environnement de soutien à un coût optimal tout au long du cycle de vie.

L'ASL sert de guide au logisticien dans les phases de faisabilité, de validation, de développement et de production, afin qu'il puisse dimensionner le soutien en fonction du système principal étudié et de son environnement de maintenance [Pons et Chevalier-93][Prévoist et Waroquier-94].

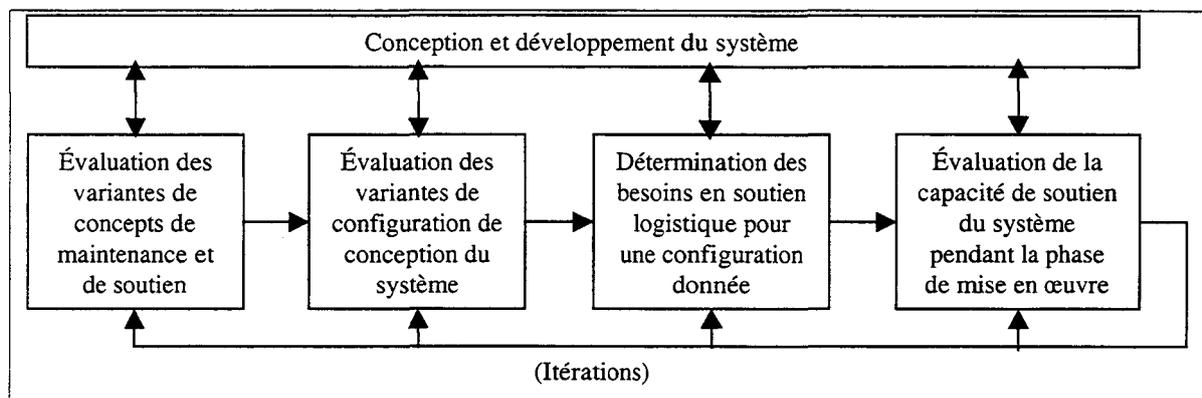


Figure 1.8 : Les phases de l'Analyse du Soutien Logistique
[Blanchard-92]

Les analyses doivent être menées de manière itérative (cf. Figure 1.8). Elles s'affineront progressivement au fur et à mesure que les informations concernant le produit se préciseront lors des différentes phases du programme. Le niveau de détail des analyses et la durée de l'exécution des tâches sont adaptés à chaque produit / équipement et tiennent compte des calendriers et des étapes du programme [Blanchard-92].

L'analyse du soutien logistique est une procédure structurée qui influe très tôt sur la conception d'un produit afin de garantir sa disponibilité et sa maintenabilité pour un coût global de possession cible. Elle comprend une série de tâches planifiées qui sont exécutées sous la direction d'un responsable SLI. Les exigences de l'analyse du soutien logistique consistent à définir le soutien logistique nécessaire pour maintenir le produit conformément à la Spécification Technique de Besoin (STB) [Prévoist et Waroquier-94].

Le soutien logistique intégré est une démarche de conception algorithmique, basée sur la notion de processus de conception. Il met en œuvre les trois ingénieries nécessaires à la recherche de la performance globale.

Par définition, le Soutien Logistique Intégré contribue à la recherche du compromis entre disponibilité et coût global d'un produit [Prévoist et Waroquier-94]. Il contribue ainsi à la recherche de la performance globale en permettant la conception au plus tôt d'un système de maintien de la performance. Le système de soutien est développé en parallèle avec le système principal de façon à être le plus cohérent possible avec celui-ci. Des modifications de conception du système principal sont possibles si le système de soutien ne permet pas d'atteindre les objectifs et les rend nécessaires. Par définition du SLI, tous les éléments du soutien sont conçus. Par ces aspects, le Soutien Logistique Intégré répond partiellement à la problématique posée. Mais il ne permet pas la prise en compte des aspects liés au système de production générant le produit. De plus il a été créé pour la conception de systèmes d'armes dont la durée d'utilisation est très longue (30-40 ans). Les efforts de conception sont concentrés sur les phases d'utilisation et de retrait de vie. Par conséquent la phase de conception s'en trouve allongée et alourdie par la mise en œuvre des 77 sous-tâches de l'Analyse du Soutien Logistique. Le Soutien Logistique vise donc surtout à l'optimisation du coût d'utilisation, et non à l'optimisation du coût global.

III.2.5. Démarche de conception simultanée Sûreté de Fonctionnement et Soutien Logistique Intégré

L'analyse comparative de définitions de l'Analyse du Soutien Logistique et de la Sûreté de Fonctionnement, et l'analyse des tâches standards de Soutien Logistique (MIL-STD 1388 1A) et de Sûreté de Fonctionnement (MIL-STD 785B et MIL-STD 470) mettent en évidence des interactions fortes entre les études de Sûreté de Fonctionnement et les études de Soutien Logistique Intégré (notamment l'Analyse du Soutien Logistique) [Bétourné et Van der Vliet-98].

Les deux approches sont représentatives de deux écoles. En effet [Bétourné et Van der Vliet-98] remarque que pour étudier la Sûreté de Fonctionnement d'un produit, il faut connaître son profil d'emploi. Il ajoute qu'en particulier pour connaître la disponibilité d'un produit, il faut connaître non seulement son profil d'emploi mais également le système de soutien mis en place. Or il remarque également que les études de Soutien Logistique Intégré contribuent à connaître le profil d'emploi d'un produit (tâche 201 de la norme MIL STD 1388-1A) et à construire le système de soutien. Il en déduit que les études de Soutien Logistique Intégré ont un impact sur la Sûreté de Fonctionnement, et qu'en parallèle, les études de Soutien Logistique Intégré ne peuvent s'effectuer sans connaître les caractéristiques qui conditionnent la disponibilité du produit. En outre la Sûreté de Fonctionnement conditionnant la disponibilité du produit, les études de Soutien

Logistique Intégrée nécessitent l'étude de la Sûreté de Fonctionnement [Bétourné et Van der Vliet-98].

La méthode simultanée proposée par [Bétourné et Van der Vliet-98] s'appuie sur certaines tâches issues des normes Military Standards du Department of Defense des Etats Unis (MIL-STD 1388 1A, MIL-STD 785B et MIL-STD 470). En combinant les tâches de chacune de ces normes, elle constitue donc elle aussi un ensemble de tâches ordonnées et structurées ayant pour objectif de connaître et d'optimiser les performances opérationnelles du produit global et son coût global, pour gérer au mieux les écarts avec les objectifs fixés. Elle permet également de développer et de mettre en place le système de soutien. C'est donc une méthode algorithmique, utilisant la notion de processus de conception, mettant en œuvre les trois ingénieries de conception, de sûreté de fonctionnement et logistique. Elle permet la définition conjointe du système principal et de son système de soutien.

Elle répond à la problématique posée parce qu'elle permet de déterminer une solution globale (système principal et système de soutien) qui répond au mieux aux objectifs de performances physiques et économiques. Au cas où la solution ne serait pas entièrement satisfaisante, la méthode permet de revenir sur la conception des deux produits. De plus elle permet la définition de tous les éléments du soutien logistique parce que basée sur le Soutien Logistique Intégré. En revanche, la méthode ne répond pas entièrement à la problématique de la recherche de la performance globale. En effet les aspects économiques apparaissent de la même façon que dans le SLI, et ne sont donc pas explicitement utilisés comme des paramètres à optimiser. De plus les aspects liés au système de production ne sont pas traités.

III.2.6. Démarche globale de conception de produits nouveaux

Des chercheurs ont constitué le groupe GAMA [Gama-98]. Après avoir dressé un état de l'art des méthodes de conception, ils ont proposé une démarche globale de conception permettant de concevoir, le mieux possible, des produits nouveaux. Cette démarche se veut flexible dans la mesure où, suivant l'entreprise, le produit à concevoir et l'environnement, certaines phases seront plus ou moins développées. En fonction du produit et de l'entreprise, l'accent est mis sur le design, le marketing ou le couple produit/process.

La démarche s'articule autour de quatre phases pour lesquelles les acteurs et outils adéquats sont définis. Associée à une bonne gestion du temps et des potentiels humains, matériels et financiers, elle augmente fortement le potentiel de réussite du projet [Gama-98]. Nous décrivons brièvement les quatre phases.

La phase 1 a pour objectif de traduire le besoin identifié par l'entreprise en fonction de son environnement en termes de produit. Elle aboutit à un cahier des charges fonctionnel (CDCF). Il faut alors tenir compte de l'expression et de la validation du besoin par l'entreprise, la connaissance du marché, la connaissance de la concurrence et la connaissance des utilisateurs. Pour cela, deux outils sont proposés : la formulation du problème et l'analyse fonctionnelle.

La phase 2 a pour but de proposer des concepts directeurs pour répondre à la traduction du besoin en fonction de la veille et de la stratégie d'entreprise de manière à établir le cahier des charges concepteur (CDCC). Cette recherche s'effectue à partir des fonctions principales et secondaires définies dans le CDCF. Elle a pour objectif d'apporter des concepts nouveaux en terme d'usage et de technologies, matérialisés par des "fiches idées". Un concept ne peut être définitivement retenu que s'il vérifie la trilogie "besoin, stratégie, veille de l'entreprise". Ces concepts validés sont traduits dans le CDCC qui fige le design, la technologie employée ainsi que les performances du produit. Il sert de guide pour la phase 3 "définition produit".

L'objectif de la phase 3 est de définir le produit à concevoir à partir du CDCC pour aboutir à un dossier produit de la construction d'un prototype reproductible industriellement. Pour cette étape, il est indispensable de faire travailler ensemble les responsables de la conception, les responsables de l'industrialisation, le responsable qualité et le designer pour pouvoir optimiser la conception. Pour cela, le groupe GAMA propose des outils permettant le dialogue entre ces différentes personnes (la recherche la proposition d'architectures produit, l'AMDEC). La solution définie doit être validée sur le plan économique. Toutes les données issues de cette phase sont traduites dans le dossier produit. Celui-ci doit comprendre une solution globale avec le process de production associé, une solution par sous-ensemble et son process, les dessins de définition des différentes solutions, une nomenclature des produits, un équipement et une organisation, une étude de fiabilité et une étude de coût.

La phase 4 est une étape intermédiaire avant le lancement du produit. Elle a pour objectif, dans une première étape, de valider la conception du produit en construisant un prototype reproductible industriellement, et dans une seconde étape, de valider l'interprétation du besoin exprimé par un test auprès des utilisateurs potentiels.

Cette démarche globale est une démarche de type algorithmique. Elle repose sur la notion de processus de conception et préconise l'utilisation d'un modèle de produit sans en préciser la nature. Dans le contexte de la recherche de la performance globale, elle s'attache en particulier à l'adéquation produit/process, et donc aux phases de conception et de production. La phase d'utilisation est succinctement abordée par une étude de fiabilité (AMDEC réalisée à l'étape 3). La validation du coût n'apparaît qu'une fois la solution définie et ne constitue en fait qu'une vérification. La démarche proposée par le groupe

GAMA contribue donc partiellement à la recherche de la performance globale. Mais les aspects liés au soutien logistique du produit et à son recyclage ne sont pas pris en compte.

III.2.7. Démarche de conception multimétiers

La méthode décrite dans [Jacquet-98] et [Grudzien-99] est une méthode de conception algorithmique non monotone comportant une composante axiomatique. Elle a été développée au sein du LAMIH. Elle utilise les deux aspects processus de conception et modèle de produit. Dans [Grudzien-99], la démarche proposée est une extension de la méthode développée dans [Jacquet-98], qui permet de prendre en compte les aspects de sûreté de fonctionnement dès l'expression du besoin de l'utilisateur du produit à concevoir.

Le modèle de produit permet de décomposer un produit selon cinq niveaux de modélisation comme le montre la figure 1.9 [Grudzien-99]. Le processus de conception précise les opérations assurant l'instanciation du modèle de produit, par les différents acteurs de la conception suivant leur domaine.

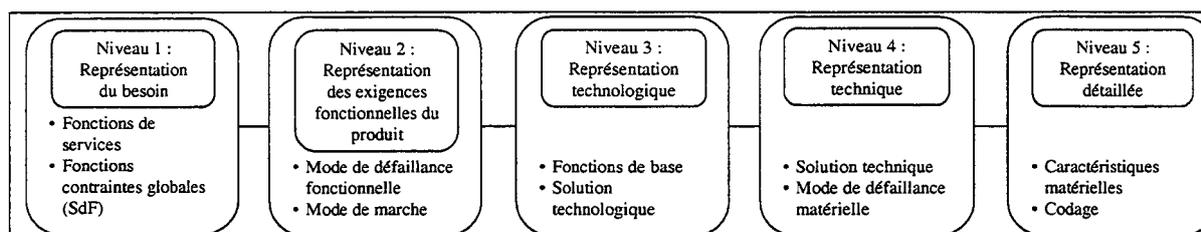


Figure 1.9 : Modèle de produit [Grudzien-99]

Cette méthode contribue à la recherche de la performance globale de façon indirecte par la prise en compte des caractéristiques de Sûreté de Fonctionnement dès la représentation fonctionnelle du besoin. Elle met en œuvre les ingénieries de conception et de sûreté de fonctionnement. Elle a pour objectif une totale adéquation du produit au besoin de son utilisateur. En ce sens elle contribue à la recherche de la performance globale. De plus elle inclut la recommandation d'actions correctives sur la définition des fonctions ou des propositions de maintenance préventive dans le cas de solutions pour lesquelles les technologies existantes ne permettent pas de répondre totalement aux exigences du besoin. Elle permet donc une spécification (voire une définition) partielle de certains éléments du soutien logistique (en particulier la fonction plan de maintenance). L'ingénierie logistique est donc partiellement mise en œuvre. Mais elle reste qualitative quant à la définition précise des éléments du soutien et ne permet donc pas d'atteindre la performance physique optimum. De plus elle ne prend en compte ni les aspects liés au système de production ni l'aspect coût global et donc ignore la performance économique.

III.3. Synthèse

Le tableau 1.2 suivant présente une synthèse des méthodes présentées au cours de ce chapitre. Les quatre critères de la typologie s'appuyant sur les trois axes caractérisant la performance globale y sont mis en évidence : le cycle de vie, la composition du produit et les acteurs intervenant, les critères économiques et physiques.

L'analyse du tableau ci-dessous permet de mettre en évidence un certain nombre d'insuffisances des méthodes de conception pour la recherche de la performance globale. Notamment nous remarquons que :

- aucune méthode ne propose la prise en compte des contraintes liées à l'ensemble des phases du cycle de vie. En particulier la phase de recyclage / démantèlement n'est pas considérée,
- la combinaison des approches algorithmiques et axiomatiques n'est utilisée que dans une seule méthode. Or [Jacquet-98] a montré que "pour obtenir un bon résultat il faut adopter une démarche algorithmique orientée analyse comportant une composante axiomatique". Cette remarque sied au contexte de la performance globale,
- l'utilisation des notions de modèle de produit et de processus de conception est limitée. Pourtant l'utilisation de ces concepts peut grandement contribuer à la performance globale du produit. Nous pouvons citer les travaux décrits dans [Harani-97], pour développer ces concepts et leur modélisation dans l'objectif de permettre la capitalisation des connaissances (facteur important de la performance) dans le domaine de la conception. En outre, il n'existe pas de modèle de produit global permettant la conception du système principal et du système de soutien qui permettrait d'avoir une vue globale du système au plus tôt,
- la combinaison des ingénieries de sûreté de fonctionnement et logistique et par conséquent des outils qu'elles utilisent, peut constituer un avantage dans la recherche de l'optimisation de la phase de conception.

| Critères de classification | | Méthodes | DFM | TQM | CCO | SLI | Démarche simultanée SdF / SLI | Démarche globale de conception | Méthode de conception multimétriers |
|--|--|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|
| | | | | | | | | | |
| Phases du cycle de vie | Conception | Oui | Oui | Oui | Oui | Oui | Oui | Oui | Oui |
| | Production | Oui | Oui | Oui | Non | Non | Non | Oui | Non |
| | Utilisation | Non | Non | Oui | Oui | Oui | Non | Non | Oui |
| | Recyclage | Non | Non | Oui | Non | Non | Non | Non | Non |
| Objet pris en compte | Système Principal | Oui | Oui | Oui | Oui | Oui | Oui | Oui | Oui |
| | Système de Soutien | Non | Non | Non | Oui | Oui | Non | Non | Partiellement |
| | Système de Production | Oui | Oui | Non | Non | Non | Oui | Oui | Non |
| Evaluation de la composante économique | Coût global | Oui | Oui | Oui | Oui | Oui | Non | Non | Non |
| Evaluation de la composante physique | Ingénierie de conception | Algorithmique | Oui | Oui | Oui | Oui | Oui | Oui | Oui |
| | | Axiomatique | Non | Non | Non | Non | Non | Oui | Oui |
| | | Modèle de produit | Oui | Non | Non | Non | Non | Non | Oui |
| | | Processus de conception | Oui | Oui | Oui | Oui | Oui | Oui | Oui |
| | Ingénierie de Sécurité de Fonctionnement | Non | Oui | Non | Oui | Oui | Oui | Oui | Oui |
| | Ingénierie logistique | Non | Non | Non | Oui | Oui | Non | Partiellement | |

Tableau 1.2 : Tableau de synthèse des méthodes de conception présentées.

Cependant, bien que ne répondant pas totalement à la problématique posée, les méthodes présentées contiennent des éléments intéressants. En effet la méthode de spécification fonctionnelle développée par [Jacquet-98] et [Grudzien-99] combine les aspects algorithmiques et axiomatiques et est basée sur les notions de modèle de produit et de processus de conception. Mais elle ne met pas en œuvre totalement l'ingénierie logistique et ne permet donc pas la définition du système de soutien nécessaire à la performance globale. La méthode combinée SdF / SLI met en évidence les liens existants entre les ingénieries de sûreté de fonctionnement et logistique. Cette combinaison permet la conception simultanée du système principal et du système de soutien et, en outre, de réduire le temps de conception par l'utilisation d'outils relatifs aux deux ingénieries. Le DFM et le TQM permettent la conception successive du système et de son système de production. Chacune de ces méthodes comporte des atouts dont il faut tirer profit pour permettre la conception simultanée du système principal, du système de soutien et du système de production qui les génère, en tenant compte des contraintes liées à chacune des phases du cycle de vie.

Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons rappelé les définitions des concepts de système et de cycle de vie sur lesquels repose notre travail.

Dans la deuxième partie, nous avons proposé une caractérisation de la notion de performance globale et nous avons également montré l'importance de la phase de conception dans la recherche de la performance globale.

Dans la troisième partie, nous avons présenté un état de l'art des méthodes de conception et analysé leur contribution à la recherche de la performance globale. Nous avons mis en évidence les insuffisances et les atouts de chacune de ces méthodes. En particulier, nous retenons de cette analyse l'intérêt d'une méthode de conception algorithmique, orientée analyse, intégrant une composante axiomatique, et utilisant les notions modèle de produit et processus de conception.

Dans le second et le troisième chapitres de ce mémoire, nous proposons une méthode de conception s'appuyant sur la méthode développée par [Jacquet-98][Grudzien-99]. Cette méthode se place dans le cadre d'une conception concourante et s'articule autour d'un modèle de produit décrit dans le chapitre II et d'un processus de conception que nous présentons dans le chapitre III.

Chapitre II.
Modèle de produit

Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons au modèle de produit constituant le premier élément de la méthode de conception que nous proposons.

Dans la première partie, nous présentons le modèle de produit développé dans [Jacquet-98] et [Grudzien-99]. Ce modèle comporte cinq niveaux de représentation et explicite les fonctions et contraintes du produit, et notamment celles liées à la Sûreté de Fonctionnement. Parallèlement nous définissons, pour chacun des niveaux précédents, les spécifications complémentaires pour la prise en compte de la performance globale.

Nous décrivons dans la deuxième partie, le modèle de produit global que nous proposons, intégrant les spécifications définies précédemment. Nous introduisons notamment les concepts de fonction de soutien, de fonction ressource, de fonction opératoire de soutien et de fonction de base du soutien.

I. Spécification d'un modèle de produit global

Notre réflexion s'appuie sur le modèle de produit développé dans [Jacquet-98] et [Grudzien-99]. Il comporte un aspect axiomatique, c'est à dire qu'il fait référence aux différents domaines de la conception. Le modèle de produit existant comporte cinq niveaux de représentation :

- Niveau 1 : représentation du besoin ; elle vise à définir les fonctions auxquelles le système devra répondre tout en respectant un certain nombre de contraintes,
- Niveau 2 : représentation des exigences fonctionnelles du système ; elle exprime le "comment" répondre à chacune des fonctions de service identifiées au niveau précédent,
- Niveau 3 : représentation technologique ; elle contient la définition des fonctions opératoires identifiées au niveau précédent, sous la forme de fonctions de base dédiées métier (mécanique, automatique...) spécifiant technologiquement le système,

- Niveau 4 : représentation technique ; elle permet d'identifier les fonctions de base du système sous la forme d'un ensemble d'éléments physiques spécifiant techniquement le système suivant le point de vue de chaque métier,
- Niveau 5 : représentation détaillée ; elle constitue la définition exhaustive des caractéristiques détaillées des différents éléments physiques (composants) et des différents éléments logiciels constituant le système.

L'extension à la Sûreté de Fonctionnement [Grudzien-99] du modèle de produit de [Jacquet-98] repose sur la combinaison des outils d'Analyse Fonctionnelle et de Sûreté de Fonctionnement, pour la recherche de l'adéquation fonctionnelle et technique. La sûreté de fonctionnement apparaît au premier niveau de représentation sous la forme d'une contrainte globale. Pour aider les concepteurs dans la définition du système, un certain nombre de notions liées à la sûreté de fonctionnement (par exemple, les modes de marche et de défaillance, les AMDEC...) sont introduites sous la forme d'attributs et de définition des attributs dans les niveaux de représentation suivants. Ces notions permettent de diriger les concepteurs entre autres dans le choix des technologies à utiliser. Elles permettent également d'aborder l'aspect maintenance du soutien logistique du produit.

Ce modèle de produit permet donc aux concepteurs d'intégrer au plus tôt au cours de la phase de conception les besoins de l'utilisateur en termes de Sûreté de Fonctionnement. Ce modèle est un premier pas dans la prise en compte de la phase d'utilisation du système pendant la phase de conception. De plus il constitue une décomposition fonctionnelle du produit proche de celle utilisée par l'Analyse de la Valeur. Nous le désignons ici par "modèle initial".

Cependant et comme nous l'avons signalé dans le chapitre précédent, les aspects soutien ne sont que partiellement traités et les phases de production et de recyclage ne sont pas abordées. En effet seule la politique de maintenance du système est prise en compte. Lorsque les technologies existantes ne permettent pas de répondre aux exigences de sûreté de fonctionnement définies par l'utilisateur, l'élaboration du modèle de produit permet au concepteur d'émettre des suggestions de solutions comme la mise en redondance, la mise en place d'équipements de suivi... pour répondre aux exigences de sûreté de fonctionnement.

Nous utilisons à chacun des niveaux le schéma générique suivant (figure 2.1) :

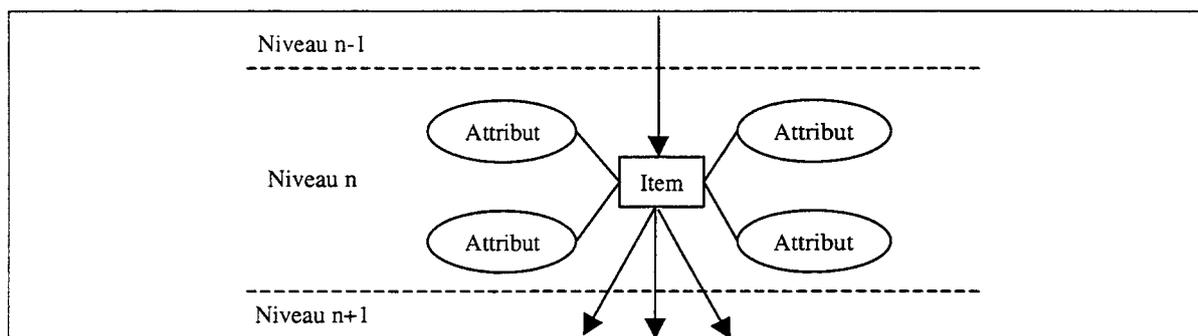


Figure 2.1 : Schéma générique.

Chaque niveau de représentation contient des items et des attributs associés à ces items. Un item est un élément de la décomposition arborescente du produit à concevoir. Un attribut est une caractéristique représentative soit des objectifs de la conception soit d'une particularité de (des) l'item(s) auquel elle est associée. Le tableau 2.1 suivant contient la description des attributs et items pour chacun des niveaux de représentation du modèle de produit initial.

| Niveau | Nature | Description |
|--|----------|--------------------------------------|
| 1. Représentation du besoin | Item | FS : Fonction de service |
| | Attribut | Cg : Contrainte globale |
| 2. Représentation des exigences fonctionnelles du besoin | Item | Foij : Fonction opératoire |
| | Attribut | Mof : Mode de défaillance |
| | Attribut | MM : Mode de marche |
| 3. Représentation technologique | Item | FB : Fonction de base |
| | Item | Sto : Solution technologique |
| 4. Représentation technique | Item | Stt : Solution technique |
| | Attribut | Mom : Mode de défaillance matérielle |
| 5. Représentation détaillée | Item | CM : Caractéristiques matérielles |
| | Item | COD : Codage |

Tableau 2.1 : Description des items et attributs des cinq niveaux de représentation du modèle de produit.

Un modèle de produit peut ainsi être élaboré à partir de ce schéma générique (figure 2.2)[Grudzien-99].

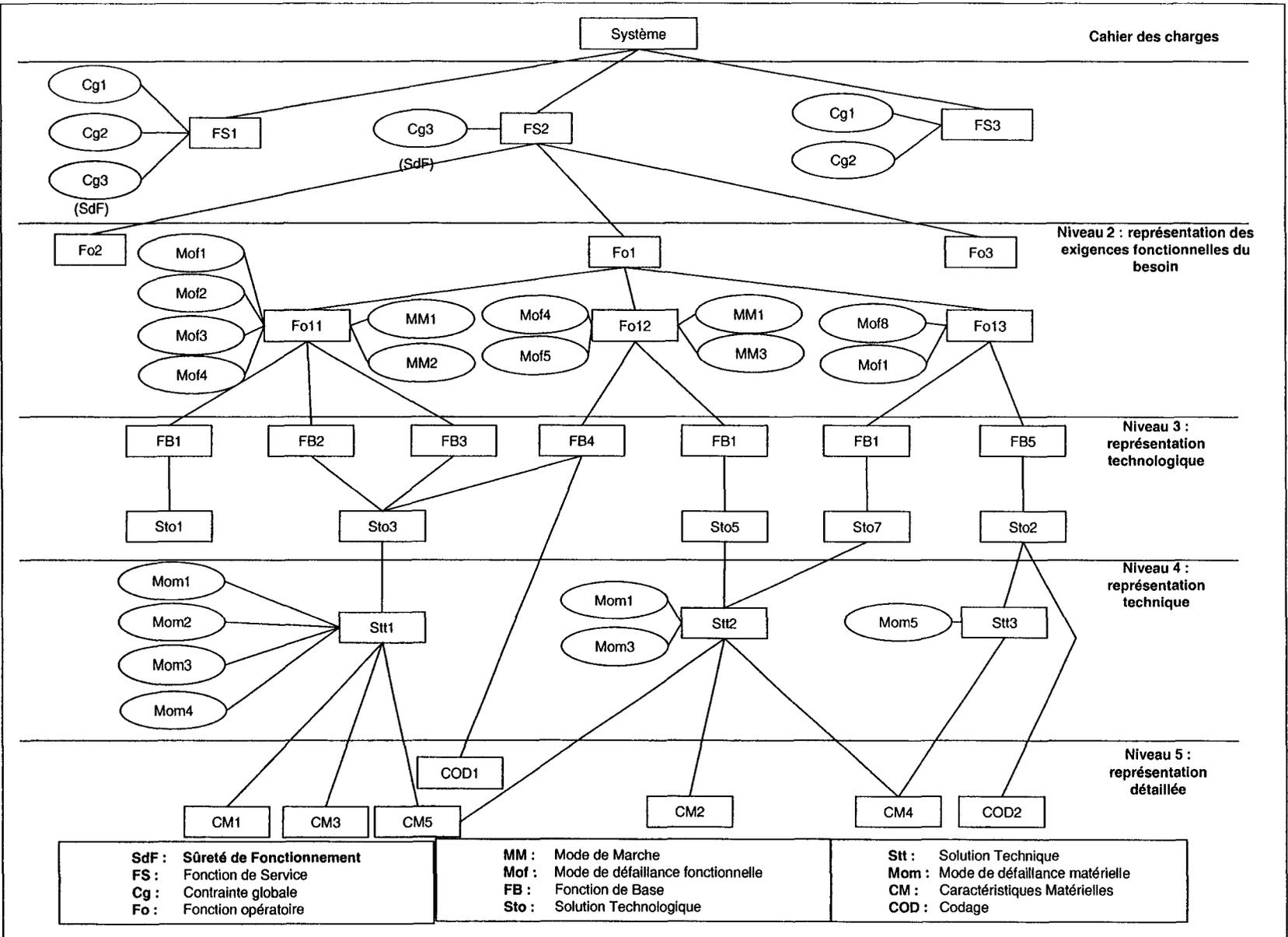


Figure 2.2 : Représentation générique des cinq niveaux de représentation du modèle de produit.

I.1. Niveau 1 : Représentation du besoin

I.1.1. Modèle initial

Ce niveau de représentation vise à définir les fonctions du produit et les contraintes à respecter. Ces fonctions et contraintes sont exprimées par les concepts de "fonction de service" et de "contraintes globales". Ces concepts sont issus de l'analyse fonctionnelle mise en œuvre dans le cadre de l'analyse de la valeur.

Le produit est représenté par un couple :

$$P \leftarrow \langle FS, Cg \rangle$$

Où : P = produit à concevoir,

FS = ensemble des fonctions de service $FSx, x \in [1, nFS]$, nFS
nombre de fonctions de service,

Cg = ensemble des contraintes globales $Cgx, x \in [1, nCg]$, nCg
nombre de contraintes globales,

\leftarrow = opérateur de mise en œuvre.

Le niveau 1 de représentation peut être schématisé par le tableau 2.2 et la figure 2.3.

| Nature | Description |
|----------|---|
| Item | FS : Fonction de service |
| Attribut | SdF : Contrainte globale sûreté de fonctionnement |

Tableau 2.2 : Description des items et attributs du niveau 1 du modèle de produit.

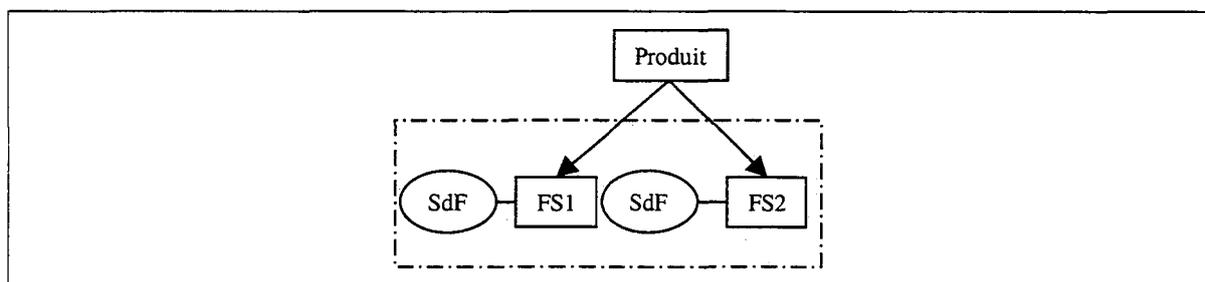


Figure 2.3 : Représentation du niveau 1 du modèle de produit.

Les fonctions de service

Une fonction de service (FS_x) correspond à un service que le système est supposé rendre.

Exemple : pour un système ferroviaire, des fonctions de service peuvent être "rouler", "s'arrêter", "transporter des voyageurs" ...

Les contraintes globales

Une fonction contrainte globale (Cg_x) modélise les limites ou contraintes devant être satisfaites par l'ensemble des fonctions du produit.

Cg est défini comme un ensemble de caractéristiques auxquelles on attribue une valeur. Chacune des caractéristiques peut être interprétée soit comme une contrainte à respecter à chacun des niveaux de représentation, ou comme un objectif à atteindre en termes de performances du système [Grudzien-99].

La Sûreté de Fonctionnement constitue une contrainte globale que le système doit respecter. Les caractéristiques de Sûreté de Fonctionnement (fiabilité R, maintenabilité M, disponibilité A et sécurité S) forment un quadruplet représentant une contrainte Cg_I :

$$\left\| \quad Cg_I = SdF = \{R, M, A, S\} \quad SdF \in Cg \right.$$

Ces caractéristiques sont relatives aux performances physiques du produit (en particulier du système principal), et doivent être propagées à chacun des niveaux de représentation.

Le respect de cette contrainte, exprimant des objectifs minimaux du client ou des normes et règlements législatifs, se traduit par des estimations, des évaluations de la fiabilité, de la maintenabilité, de la disponibilité et de la sécurité du système au cours du processus de conception et la mise en place d'actions (maintenance, utilisation de technologies particulières...) sur le cycle de vie du système.

I.1.2. Spécifications du niveau de représentation du besoin

Les concepts présentés ci-dessus permettent la description fonctionnelle de premier niveau du système principal. Mais ils ne permettent pas de tenir compte ni du système de soutien, ni du système de production, ni du recyclage / démantèlement du produit. C'est pourquoi dans le cadre de la recherche de la performance globale, il faut d'une part concevoir le système de soutien simultanément avec le système principal, et d'autre part tenir compte au plus tôt des contraintes liées au système de production et au recyclage / démantèlement.

Nous remarquons ainsi que les contraintes liées au système de production sont indépendantes des fonctions du produit. A ce stade de la définition du modèle de produit, elles peuvent être modélisées sous la forme de contraintes globales. Il en est de même pour les contraintes de recyclage / démantèlement. Par exemple, on peut associer à une fonction de service, une contrainte globale liée au degré de pollution.

Les impacts de ces contraintes globales seront mesurés dès le début de la définition technologique du produit. Ces aspects sont traités à partir du niveau 3 du modèle de produit. Cependant, nous constatons qu'il est nécessaire de distinguer plusieurs cas liés au produit et au système de production :

- Suivant le produit :
 - Soit il s'agit de la conception d'un nouveau produit,
 - Soit il s'agit de la reconception d'un produit existant conduisant à l'amélioration de ce produit.
- Suivant le système de production du produit :
 - Soit le système de production existe et il ne peut être modifié, par exemple production d'un nouveau type de voiture sur le site de production d'un ancien type,
 - Soit le système de production existe et il peut être adapté au nouveau produit, par exemple production d'un nouveau type de voiture sur le site de production d'un type de voiture similaire,
 - Soit le système de production n'existe pas et il est à concevoir en fonction du produit : création d'un nouveau site de production pour un nouveau produit.

Selon les cas envisagés, les contraintes globales liées au système de production (respectivement au produit), qui pèseront sur le produit (respectivement sur le système de production), seront différentes.

I.2. Niveau 2 : représentation des exigences fonctionnelles du besoin

I.2.1. Modèle initial

Ce niveau consiste à définir le comportement nominal que doit adopter le système pour accomplir sa mission ainsi que les principes nécessaires à sa mise en œuvre. Ce niveau peut être représenté par le tableau 2.3 et la figure 2.4 ci-dessous.

| Nature | Description |
|----------|----------------------------|
| Item | Foij : Fonction opératoire |
| Attribut | Mof : Mode de défaillance |
| Attribut | MM : Mode de marche |

Tableau 2.3 : Description des items et attribut du niveau 2 du modèle de produit.

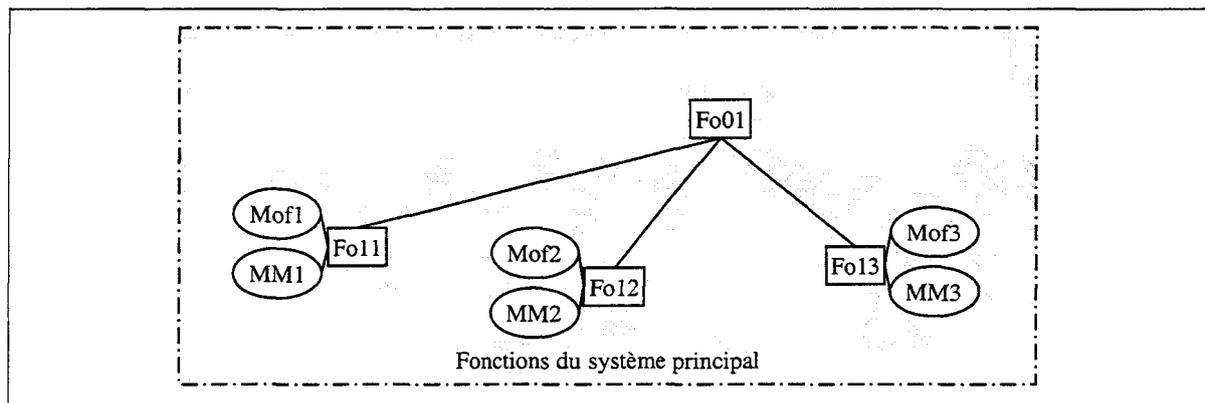


Figure 2.4 : Représentation du niveau 2 du modèle de produit.

Les fonctions opératoires

Les solutions proposées pour chacun des services identifiés doivent répondre aux contraintes et aux limites spécifiées par le client et le contexte normatif. Pour cela, trois concepts ont été définis [Jacquet-98] :

- "fonction opératoire" : Fo_{0j} modélise l'opération ou une des opérations j nécessaires à la réalisation de l'objectif fixé par la fonction de service associée. Elle précise comment atteindre cet objectif indépendamment des moyens requis pour sa mise en œuvre. Les fonctions opératoires de premier niveau ($i=0$) sont transformables en fonctions opératoires Fo_{ij} de niveaux inférieurs, pour aboutir à une chaîne opératoire (cf. figure 2.5),

- "principe opératoire" : précise les principes (électrique, mécanique, fluide...) susceptibles de supporter chaque opération définie à l'aide du concept de fonction opératoire,
- "solution de principe" : correspond à l'association des différents principes supportant chacune des fonctions opératoires.

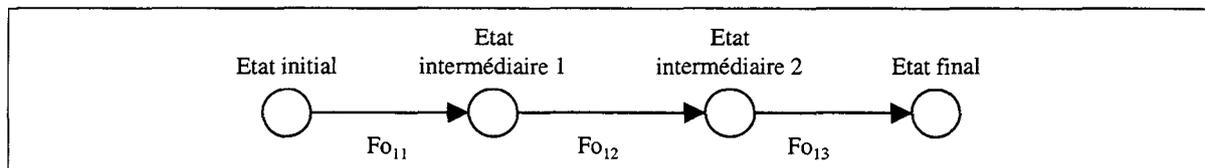


Figure 2.5 : Exemple de chaîne opératoire.

Pour exemple pour la fonction de service FS = "arrêter" d'un matériel ferroviaire la décomposition peut être réalisée de la façon suivante :

- Produit : matériel ferroviaire
- Fonction de service : FS = "arrêter"
- Fonctions opératoires :
 - F_{O01} = recevoir une consigne de freinage
 - F_{O02} = traduire la consigne de freinage
 - F_{O03} = freiner

Chacune des fonctions opératoires est décomposable en fonctions opératoires de niveaux inférieurs. Par exemple (cf. figure 2.6) :

- F_{O21} = enregistrer la consigne donnée par l'opérateur
- F_{O22} = transmettre la consigne au système de commande

A chacune de ces fonctions opératoires est associé un principe opératoire. Par exemple pour la fonction opératoire F_{O21} , le principe opératoire peut être électrique. Une solution de principe est une combinaison des principes opératoires associés aux fonctions opératoires. Il peut exister plusieurs solutions de principe.

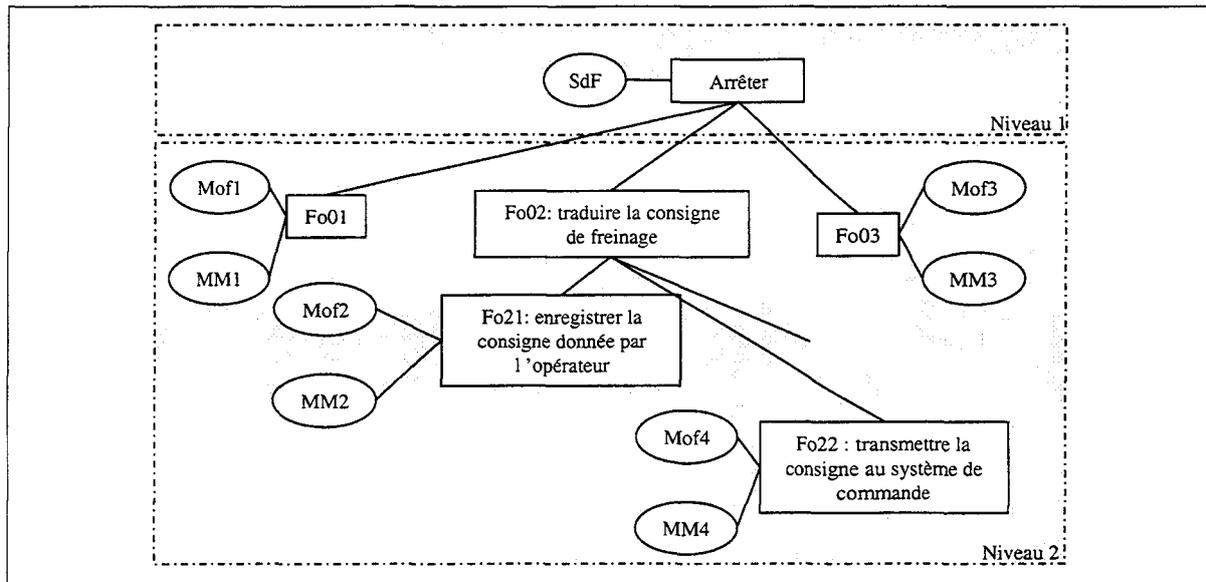


Figure 2.6 : Exemple de décomposition de la fonction "arrêter".

Les modes de marche et les modes de défaillance

Une chaîne opératoire est constituée de plusieurs fonctions opératoires ayant chacune un fonctionnement nominal et des caractéristiques relatives à leur comportement. Ces caractéristiques peuvent être obtenues à partir d'un retour d'expérience acquis sur des éléments similaires ou calculées aux niveaux de représentation suivants. La chaîne opératoire constitue le fonctionnement normal attendu du système. [Grudzien-99] s'est intéressé aux fonctionnements anormaux ou alternatifs des chaînes et des fonctions opératoires qui les composent. C'est pourquoi il a identifié des concepts visant à associer aux fonctions et chaînes opératoires les paramètres, les données permettant d'évaluer a priori la Sûreté de Fonctionnement, les besoins en éléments redondants, les fonctions nécessaires à la surveillance et au diagnostic des défaillances du système etc. :

- Le concept de "mode de défaillance fonctionnelle", noté *Mof*,
- Le concept de "mode de marche", noté *MM*.

Ne disposant que de fonctions opératoires, les modes de défaillance identifiés sont des modes de défaillance fonctionnelle. Pour définir les modes de défaillances, il propose d'utiliser le tableau d'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE). Grudzien considère les modes de défaillance suivants [Cuenca-92][Grudzien-99] :

- *Pas de fonction* : la fonction n'est pas présente lorsqu'elle doit être activée. On parle alors d'indisponibilité de la fonction,
- *Perte de fonction* : la fonction active disparaît à la suite d'une défaillance. On parle de non-fiabilité (défiabilité),

- Fonction dégradée : la fonction est réalisée avec des performances non nominales. Le risque lié à l'apparition de ce mode réside dans le fait qu'il peut entraîner des erreurs opératoires pouvant avoir des conséquences très importantes (sécurité humaine et matérielle),
- Fonction intempestive : la fonction se réalise à un autre moment que celui où elle est attendue ou entraîne des effets différents de ceux attendus. Là aussi l'aspect sécurité humaine et matérielle est à prendre en compte.

Les modes de marches sont déterminés par l'utilisation du GEMMA (Guide d'Etude des Modes de Marche et d'Arrêt) [ADEPA-81].

Les études de GEMMA et d'Analyse dysfonctionnelle précédentes sont appliquées aux fonctions opératoires. L'objectif de ces études est de recenser les modes de défaillance des fonctions opératoires et d'en déduire les actions qui peuvent être mises en place pour contrer les effets de ces modes de défaillance sur le fonctionnement souhaité du système.

I.2.2. Spécification du niveau de représentation des exigences fonctionnelles

Ce deuxième niveau fonctionnel du modèle de produit comprend des notions permettant de définir le comportement du système et d'en déduire des actions correctives à effectuer pendant la conception et des préconisations de maintenance. Cet aspect du modèle de produit existant contribue à la définition du système de soutien. Mais celle-ci est très incomplète. Pour atteindre une performance globale, il faut que le modèle de produit permette la définition de toutes les ressources et fonctions du soutien logistique. De même il doit permettre la répartition des contraintes globales liées au système de production et au recyclage définies au niveau précédent sur les fonctions opératoires.

En particulier l'ensemble des modes de défaillance doit être exhaustif pour cerner l'ensemble des défaillances d'une fonction. Ce qui n'est pas le cas. En effet, par exemple, le cas où la fonction ne s'arrête pas lorsqu'on cesse de la solliciter, n'est pas pris en compte.

I.3. Niveau 3 : représentation technologique

I.3.1. Modèle initial

Ce niveau transforme les fonctions opératoires de plus bas niveau sous la forme d'un ensemble de fonctions de base auxquelles sont associées des solutions technologiques (tableau 2.4 et figure 2.7) :

FB = ensemble des fonctions de base

| Nature | Description |
|----------|------------------------------|
| Item | FB : Fonction de base |
| Attribut | Sto : Solution technologique |

Tableau 2.4 : Description des items et attributs du niveau 3 du modèle de produit.

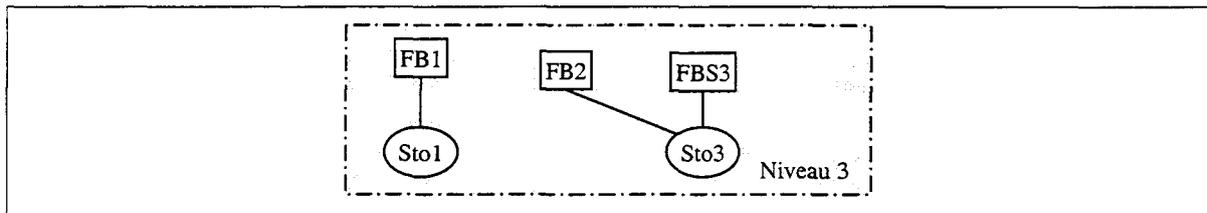


Figure 2.7 : Représentation du niveau 3 du modèle de produit.

Fonctions de base

Les fonctions de base sont spécifiques à un métier et assurent de manière autonome une fonction particulière du système. Ce niveau consiste en la représentation de la structure technologique du système suivant les points de vue de chaque métier de la conception (automatique, mécanique, maintenance,...). Les différentes fonctions de base propres à chaque métier sont dégagées, elles visent à mener une conception simultanée du système. Il y a donc différents ensembles :

$$FB = FBa \cup FBm \cup Fbe \cup \dots$$

Où : FBa = ensemble des fonctions de base de type automatique,
 FBm = ensemble des fonctions de base de type mécanique,
 Fbe = ensemble des fonctions de base de type électrique...

Par exemple, une des fonctions de base de la mécanique définies par [Jacquet-98] est "Guider en rotation". Cette fonction de base mécanique autorise seulement un mouvement en rotation (liaison pivot, liaison rotule, liaison cardan). Une des fonctions de base de l'automatique également définies est "commander". Cette fonction envoie, par l'intermédiaire de composants (pré-actionneurs) des ordres à la fonction de base mécanique "opérer".

Dans le cadre de la conception de systèmes sûrs, Grudzien a identifié les fonctions de base dédiées à l'exploitation future du système, c'est à dire les fonctions liées aux activités de surveillance [Grudzien-99] :

- réaliser l'acquisition des données / informations de surveillance, fonction de base qui au travers d'un composant permet de capter des informations sur l'état du système sous surveillance,
- détecter la défaillance, fonction de base qui permet de déceler un fonctionnement anormal de la fonction opératoire ou du composant considéré,
- localiser la défaillance, fonction de base qui permet de situer le composant à l'origine de la défaillance ou de la dégradation,
- diagnostiquer la défaillance, fonction qui permet de donner la cause première ayant entraîné la défaillance ou la dégradation du composant,
- réaliser la correction de la défaillance, fonction de base qui permet de résoudre le problème généré par la défaillance,
- informer l'opérateur, fonction de base qui permet d'attirer l'attention de l'opérateur sur l'apparition d'un fonctionnement anormal d'un composant.

A partir de l'étude menée au niveau précédent, ces fonctions ont pour objectif de déceler la présence d'une défaillance ou d'une dégradation puis de corriger ce dysfonctionnement.

Les solutions technologiques

Une solution technologique est un ensemble de composants technologiques. Elle représente les composants spécifiés, de manière concourante par les différents acteurs de la conception afin que chacun d'eux ait une vue globale du produit [Jacquet-98]. D'un point de vue automatique, la définition du concept de solution technologique a pour objectif de déterminer l'architecture de commande du produit.

Le niveau de représentation technologique permet de définir l'architecture technologique du système. Chaque acteur de la conception spécifie, de manière concourante, les composants techniques : chaque acteur affine ses choix en associant une technique à chaque solution technologique.

I.3.2. Spécification du niveau de représentation technologique

A ce niveau la définition du système de soutien n'apparaît pas. Pourtant les fonctions et ressources du système de soutien doivent être définies technologiquement. Il faut donc étendre le modèle de produit de façon à pouvoir définir plus précisément les fonctions et ressources du soutien. De plus le choix des technologies pour le système principal a un impact important sur les phases suivantes du cycle de vie.

En effet, c'est à ce niveau que les contraintes liées au système de production, à l'utilisation et au recyclage doivent être prises en compte dans les choix technologiques. Par exemple, c'est à ce niveau que l'on peut choisir une technologie non polluante à l'utilisation et au recyclage. Concernant le système de production, suivant les cas cités au niveau 1, certains choix technologiques sur le produit peuvent nécessiter des machines spéciales pour la production et engendrer des coûts qui mettent en jeu l'obtention de la performance économique.

I.4. Niveau 4 : représentation technique et niveau 5 : représentation détaillée

I.4.1. Modèle initial

Le niveau 4 a pour objectif de modéliser les entités techniques du système. Il s'agit d'associer aux fonctions de base du niveau précédent constituant les solutions technologiques, un ou plusieurs composants techniques. Pour cela [Grudzien-99] distingue le concept de "solution technique" et le concept de "mode de défaillance matérielle". Une solution technique est un composant ou sous-ensemble de composants que l'on peut associer aux fonctions de base décrivant la solution technologique définie par les concepteurs. Le concept de mode de défaillance matérielle consiste à identifier et modéliser a priori les défaillances pouvant apparaître au niveau des composants techniques choisis (il correspond à un affinement de l'analyse des défaillances menée au niveau fonctionnel). A ce niveau les informations disponibles sont suffisantes pour décider de l'aptitude des composants à réaliser les fonctions recensées aux niveaux supérieurs.

L'analyse qualitative des modes de défaillances peut être enrichie par une analyse quantitative qui consiste à associer à chacun des modes de défaillance identifiés une fréquence d'apparition ainsi qu'une gravité de leurs conséquences. Ces deux grandeurs définissent la criticité[♦] du mode de défaillance considéré. Selon ces critères, des actions peuvent être mises en œuvre comme des modifications constructives sur l'architecture et le dimensionnement du produit, des améliorations relatives à sa fiabilité et sa maintenabilité. Selon leur type, ces actions peuvent être mises en œuvre à ce niveau de représentation ou aux niveaux de représentation précédents.

Le niveau 5 permet de supporter la description détaillée du système selon le point de vue des différents acteurs de la conception. Ils peuvent élaborer les différentes caractéristiques de chaque composant retenu pour la conception du produit.

Ce niveau peut être représenté par le tableau 2.5 et la figure 2.8 suivants.

| Niveau | Nature | Description |
|--------|----------|--------------------------------------|
| 4 | Item | Stt : Solution technique |
| | Attribut | Mom : Mode de défaillance matérielle |
| 5 | Item | CM : Caractéristique matérielle |
| | Item | COD : Codage |

Tableau 2.5 : Description des items et attributs des niveaux 4 et 5 du modèle de produit.

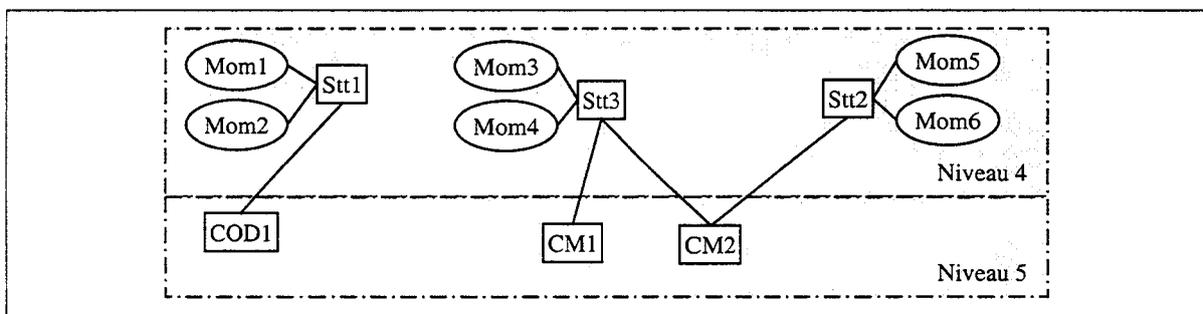


Figure 2.8 : Représentation des niveaux 4 et 5 du modèle de produit.

I.4.2. Spécification des niveaux de représentation technique et détaillée

A ces niveaux, pour que les aspects soutien, production et recyclage soient pris en compte, il faut qu'ils l'aient été aux niveaux précédents. La performance globale du produit n'apparaît pas comme pouvant être améliorée par les choix effectués à ces niveaux. Cependant elle doit être assurée par la prise en compte des aspects cités ci-dessus dans le choix des composants techniques et dans la définition de leurs caractéristiques. Par exemple une caractéristique d'un composant peut être le matériau utilisé qui permet une production simple, minimisant l'impact en termes de coûts, sur l'environnement lors de l'utilisation et/ou durant le recyclage.

1.5. Synthèse

De façon générale, et comme nous l'avons analysé dans le chapitre I, le modèle de produit développé dans [Jacquet-98] et [Grudzien-99] ne prend pas en compte tous les éléments nécessaires à l'obtention d'une performance globale. En particulier, les aspects liés au système de soutien ne sont que partiellement traités, et les aspects liés à la production et au recyclage / démantèlement du système ne sont pas abordés.

Dans le cadre de la deuxième partie de ce chapitre, nous proposons un modèle de produit global contribuant à la recherche de la performance globale, extension du modèle de produit à la prise en compte des aspects liés au système de soutien. Notons toutefois que des travaux ont été réalisés au LAMIH pour intégrer au modèle de produit initial les aspects liés au calcul et à la fabrication du système [Benamara-98][Ifaoui et Deneux-99][Maranzana-99]. L'intégration du modèle présenté ici avec celui développé pour prendre en compte les aspects production, et étendu à la prise en compte des problèmes liés au recyclage / démantèlement constitue une perspective de nos travaux. Il pourrait être intéressant pour cela d'utiliser par exemple la proposition de modélisation environnementale du produit, faite en parallèle de la conception du produit proposée par [Tiger et Millet-98],

II. Proposition d'un modèle de produit global

Nous définissons le modèle de produit global comme un modèle de produit permettant la conception simultanée du système principal et du système de soutien. Pour chacun des niveaux de décomposition, nous présentons les concepts issus des spécifications précédentes.

Notre contribution se situe essentiellement aux trois premiers niveaux du modèle de produit initial. Nous considérons que les niveaux de représentation technique et représentation détaillée conservent leur contenu et sont applicables tels quels à notre proposition de modèle de produit global.

II.1. Niveau 1 : Représentation du besoin

Dans le premier chapitre, nous avons défini un système comme regroupant :

- un système principal, répondant directement au besoin de l'utilisateur en assurant la mission principale,
- un système de soutien assurant une mission de soutien à l'exécution de la mission principale.

Ces deux missions sont complémentaires mais d'importance différente. Par conséquent, un même outil de spécification fonctionnelle ne peut être utilisé pour les

décrire. C'est pourquoi aux concepts de "fonction de service" et "contrainte globale" de l'Analyse Fonctionnelle, nous ajoutons les concepts de "fonction de soutien" et "fonction ressource" (intégrables et non intégrables).

Le système produit est désormais représenté par un quadruplet (cf. figure 2.9) :

$$P \leftarrow \langle FS, Cg, FSL, FR \rangle$$

Où : P = produit à concevoir,
 FS = ensemble des fonctions de service $FSx, x \in [1, nFS]$, nFS nombre de fonctions de service,
 Cg = ensemble des contraintes globales $Cgx, x \in [1, nCg]$, nCg nombre de contraintes globales,
 FSL = ensemble des fonctions de soutien $FSLx, x \in [1, nFSL]$, $nFSL$ nombre de fonctions de soutien,
 FR = ensemble des fonctions ressources $FRx, x \in [1, nFR]$, nFR nombre de fonctions ressource.

Le niveau de représentation du besoin est désormais schématisé par le tableau 2.6 et illustré par la figure 2.9 suivants :

| Nature | Description |
|----------|---|
| Item | FS : Fonction de service |
| Item | FSL : Fonction de soutien |
| Item | FR : Fonction ressource |
| Attribut | CGCV : Contrainte globale Coût global de cycle de vie |
| Attribut | SdF : Contrainte globale sûreté de fonctionnement |

Tableau 2.6 : Description des items et attributs du niveau 1 du modèle de produit global.

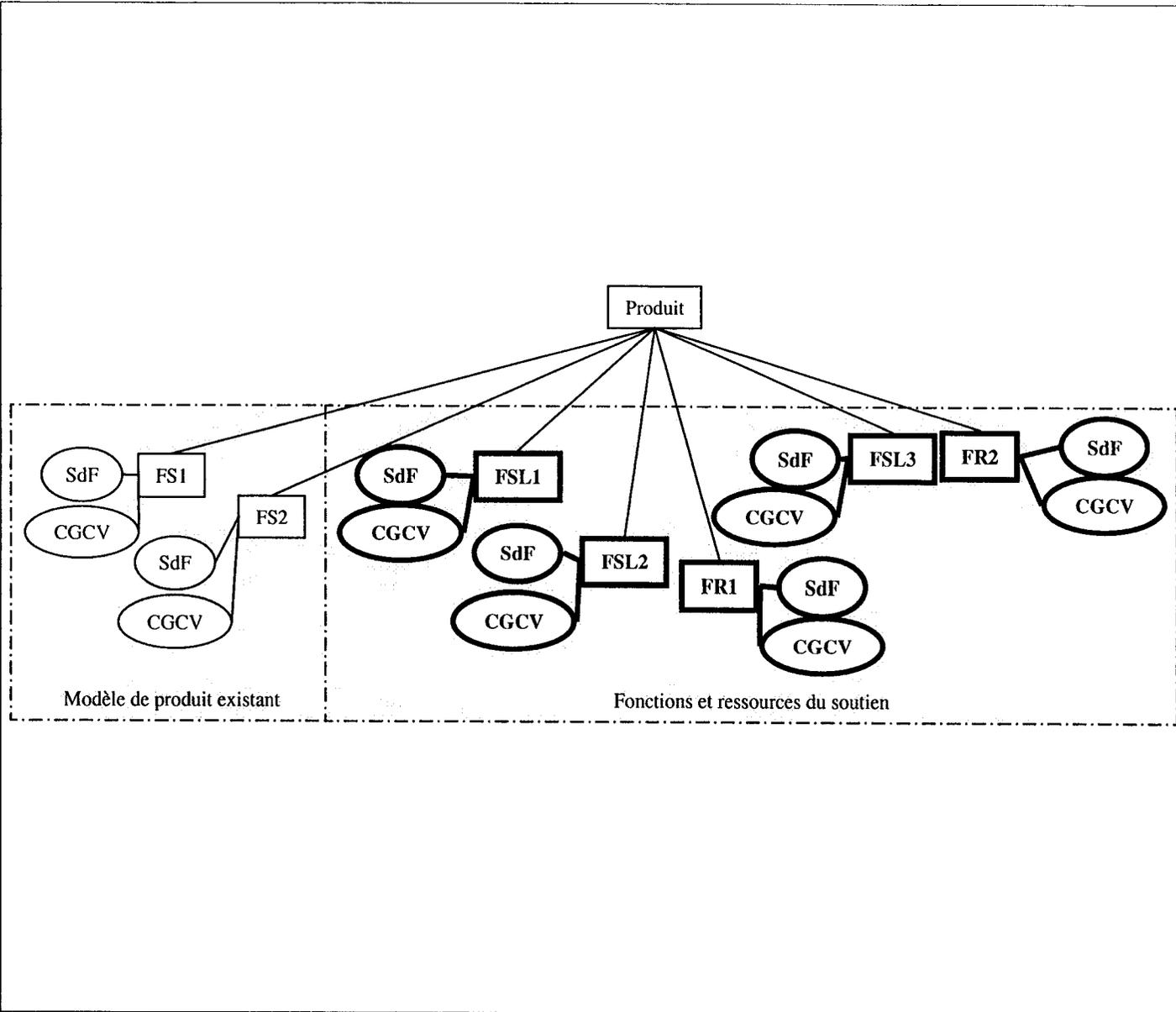


Figure 2.9 : Représentation du niveau 1 du modèle de produit global.

II.1.1. Contraintes globales

La contrainte globale définie par [Grudzien-99] est relative à la sûreté de fonctionnement du produit : $Cg1 = SdF$.

Dans le cadre de la recherche de la performance globale, nous avons montré que le coût global constitue un paramètre important de la conception des produits. C'est pourquoi, nous le définissons comme une seconde contrainte globale $Cg2$. Ainsi :

$$Cg_2 = CGCV \quad CGCV \in Cg$$

où $CGCV =$ Life Cycle Cost, coût global sur le cycle de vie du système.

Le coût global de cycle de vie d'un système futur est souvent estimé (voire placé dans un intervalle) a priori en fonction du marché, des attentes des clients et du retour d'expérience. Il constitue également une contrainte à respecter.

Afin qu'elle soit générale à la conception du produit tout au long de la définition du modèle de produit, cette contrainte globale doit concerner toutes les fonctions (de service et de soutien) du système. Il en est de même pour la contrainte globale $Cg1 = SdF$. En effet cette contrainte globale doit également être associée aux fonctions et ressources du soutien, car la mise en œuvre de ces fonctions et ressources ne doit pas altérer la performance du système principal. Par exemple, la défaillance d'un capteur d'usure ne doit pas entraîner la panne complète du système.

Si les données disponibles au cours de la phase de conception sont suffisantes, les concepteurs ont la possibilité d'estimer le coût global à tout moment et peuvent ainsi vérifier que le futur système respecte cette contrainte. Le respect des deux contraintes, $Cg1 = SdF$ et $Cg2 = CGCV$, permet de contribuer à la recherche de la performance globale du système. En effet le coût global est représentatif de la performance économique et la sûreté de fonctionnement est relative à la performance physique interne du produit.

Dans le cadre de cette étude, nous nous limitons à ces deux seules contraintes globales. Une perspective de nos travaux consiste à intégrer les contraintes liées à la prise en compte des aspects environnementaux par exemple.

II.1.2. Les fonctions de soutien

La figure 2.10 rappelle que les fonctions et les ressources du Soutien Logistique constituant le système de soutien sont :

- Les fonctions et ressources liées à la maintenance du système : les équipements de tests et de soutien, le plan de maintenance, la documentation, le soutien à l'informatique, les approvisionnements,
- Les fonctions et ressources liées à l'environnement du système : infrastructures, emballage, manutention, stockage, transport,
- Les fonctions et ressources liées au personnel : personnel d'exploitation et de maintenance, formation.

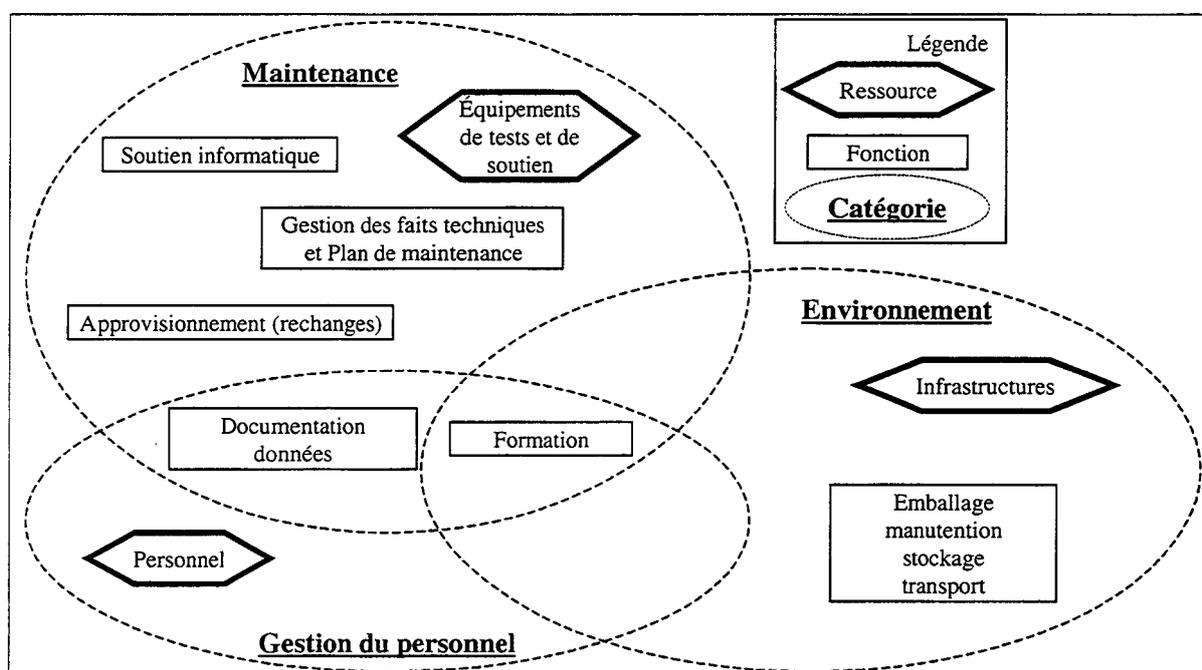


Figure 2.10 : Fonctions et ressources du soutien.

Dans le cadre du modèle de produit global, nous différencions les fonctions et ressources du soutien logistique des fonctions et contraintes du système principal pour les raisons suivantes :

- les fonctions et ressources du soutien logistique n'ont pas pour rôle de remplir la mission demandée par l'utilisateur, c'est la mission du système principal,
- ces fonctions ne doivent pas altérer la performance du système principal pour permettre la performance globale du système. En effet les fonctions de soutien contribuent au maintien de la disponibilité des fonctions de service du système principal. Leur éventuel dysfonctionnement pourrait perturber le fonctionnement de

ces fonctions de service et alors produire l'effet contraire de celui attendu par leur intégration.

C'est pourquoi nous définissons le concept de "fonction de soutien". Une fonction de soutien est une fonction d'un système global ayant pour objectif d'assurer que les fonctions de service puissent être réalisées avec les meilleures performances possibles. L'ensemble des fonctions de soutien est noté FSL :

$$FSL = \{FSL_x\}, x = [1, 6]$$

Où FSL = ensemble des fonctions de soutien.

Les fonctions de soutien sont :

- FSL_1 = soutien des moyens informatiques de tests et de soutien,
- FSL_2 = gestion des faits techniques et plan de maintenance,
- FSL_3 = documentation technique d'exploitation et de maintenance,
- FSL_4 = formation du personnel d'exploitation et de soutien,
- FSL_5 = approvisionnements nécessaires à la mise en œuvre et au soutien (gestion des rechanges, stockage, approvisionnement...),
- FSL_6 = emballage, manutention, stockage et transport.

II.1.3. Les fonctions ressources

Une fonction ressource modélise les limites et les contraintes apportées au système principal, représentant une ressource du système de soutien. L'ensemble des fonctions ressources est noté FR :

$$FR = \{FR_x\}, x = [1, 3]$$

Où FR = ensemble des fonctions ressources.

Les fonctions ressources sont :

- FR_1 = équipements de tests et de soutien,
- FR_2 = personnel d'exploitation, personnel de maintenance,
- FR_3 = infrastructures nécessaires à l'exploitation et au soutien du système.

Les ressources du soutien sont définies par le cahier des charges clients, et/ou par le contexte normatif en vigueur, et/ou par une analyse du retour d'expérience. Cette analyse permet de mettre en évidence des points fondamentaux contribuant à répondre aux objectifs de performance globale.

II.1.4. Intégration des fonctions et ressources du soutien

Actuellement, pour améliorer la maintenance d'un système, on place des capteurs sur les composants à surveiller. Ces capteurs fournissent des informations sur l'état des composants, sans qu'on ait à les démonter. Le diagnostic de défaillance est ainsi facilité et la maintenance plus efficace. On peut imaginer de coupler à ces systèmes de capteurs un système de documentation qui fournirait à l'utilisateur le détail de la procédure à suivre dès qu'un capteur détecte un problème. Ces exemples illustrent l'intégration de la fonction de soutien documentation et la fonction ressource équipements de tests et de soutien.

Ceci montre qu'une intégration physique de certaines fonctions et ressources du soutien au sein du système principal permet d'améliorer la maintenance et donc la disponibilité des systèmes. C'est pourquoi, par extension, nous considérons que l'intégration physique de certaines fonctions du soutien au sein du système principal peut contribuer, dans certains cas et dans certaines conditions, à la performance globale du système en améliorant l'utilisation et la maintenance [Delsaut et al.-99a][Delsaut et al.-99b].

Cependant, suivant le profil d'emploi du système à concevoir, cette intégration peut avoir un impact négatif sur la performance globale du produit. Par exemple la probabilité de défaillance d'une fonction de soutien intégrée affecte la disponibilité du produit, alors qu'elle ne permet pas d'assurer la mission principale. C'est en fonction du profil d'emploi du système que les concepteurs déterminent l'utilité de l'intégration d'une ou plusieurs de ces fonctions et ressources pour le respect de la performance globale.

C'est pourquoi nous distinguons les concepts de "fonction de soutien intégrable" et "fonction de soutien non intégrable". Le fait que, à ce niveau de la conception du produit, l'intégration d'une fonction est souhaitable signifie que le profil d'emploi et les exigences de l'utilisateur laisse présager que l'intégration est potentiellement utile et/ou nécessaire. Mais cette intégration ne doit pas se faire aux dépens de la performance globale du produit. Les niveaux de définition inférieurs (en particulier le niveau technologique) permettront de décider de sa réalisation ou non.

Ainsi, nous notons :

$FSLI$ = l'ensemble des fonctions de soutien dont l'intégration physique au sein du système principal est souhaitable dans le respect de l'objectif de performance globale,

$FSLNI$ = l'ensemble des fonctions de soutien pour lesquelles l'intégration physique n'est pas souhaitable.

$$FSL = FSLI \cup FSLNI$$

Nous remarquons que, par leur nature même, les fonctions FSL_5 et FSL_6 de soutien ne pourront pas être intégrées physiquement au produit. $FSL_5 = \text{approvisionnements nécessaires à la mise en œuvre et au soutien}$ et $FSL_6 = \text{emballage, manutention, stockage et transport}$ sont des fonctions de soutien non intégrables :

$$FSL_5 \in FSLNI \text{ et } FSL_6 \in FSLNI.$$

Les autres fonctions de soutien sont potentiellement intégrables. Cela signifie qu'à ce niveau, seule la définition du profil d'emploi du système (par l'analyse du cahier des charges) permet d'estimer si leur intégration est souhaitable ou non.

Par exemple, si l'intégration de $FSL_3 = \text{Documentation}$ est souhaitable, $FSL_3 \in FSLI$. Dans ce cas, $FSLNI = \{FSL_1, FSL_2, FSL_4, FSL_5, FSL_6\}$.

De même, selon le profil d'emploi du produit à concevoir, la fonction ressource $FRI = \text{équipements de tests et de soutien}$ est éventuellement intégrable physiquement au système principal, à différents niveaux technologiques. En effet il existe des équipements de tests intégrés ("Built-in Test", voir annexe) ou des systèmes de mesure composés de capteurs qui permettent la surveillance du système, l'évolution du comportement de ses composants [Delsaut et al.-99a]. Ces équipements sont intégrés et peuvent être plus ou moins sophistiqués selon le profil d'emploi du système. C'est pourquoi nous définissons la fonction ressource intégrable suivante :

$$FRI = \{FR_1\} = \{\text{équipements de tests et de soutien}\}$$

$$FRI \in FR.$$

L'intégration de cette fonction est souhaitable [Delsaut et al.-99b]. Mais cette intégration ne sera effective que si le profil d'emploi du système et la performance globale recherchée l'imposent.

Les autres fonctions ressources ne sont pas intégrables physiquement. Elles constituent donc l'ensemble $FRNI$:

$$FRNI = \{FR_2, FR_3\}$$

Où $FRNI$ = ensemble des fonctions ressources non intégrables, dont l'intégration n'est pas physiquement possible du fait de leur nature.

$$FRNI = FR - FRI = FR - \{FRI\}$$

$$FR = FRI \cup FRNI$$

Toutes les fonctions de soutien ainsi que toutes les fonctions ressources sont soumises à la contrainte globale $Cg2 = CGCV$. En effet l'intégration physique de certaines de ces fonctions et ressources du soutien dépend fortement de cette contrainte et du profil d'emploi du système.

Elles sont également soumises à la contrainte globale de Sécurité de Fonctionnement $Cg1 = SdF$. En effet, comme nous l'avons expliqué dans le premier paragraphe, les fonctions et ressources du soutien doivent être sûres de fonctionnement afin de ne pas perturber l'accomplissement de la mission principale du système global.

II.2. Niveau 2 : représentation des exigences fonctionnelles du besoin

Le niveau de représentation des exigences fonctionnelles consiste à décrire les chaînes opératoires correspondant aux fonctions de service identifiées au niveau supérieur. Dans ce paragraphe, nous appliquons cette transformation aux fonctions du soutien. Le tableau 2.7 et la figure 2.11 représentent le niveau 2 du modèle de produit global.

| Nature | Description |
|---------------|---|
| Item | Foij : Fonction opératoire |
| Item | FoSLij : Fonction opératoire de soutien |
| Item | FoR1ij : Fonction opératoire issue de la fonction ressource FR1 |
| Item | FRC : Fonction ressource caractérisée |
| Attribut | Mof : Mode de défaillance |
| Attribut | MM : Mode de marche |

Tableau 2.7 : Description des items et attribut du niveau 2 du modèle de produit global.

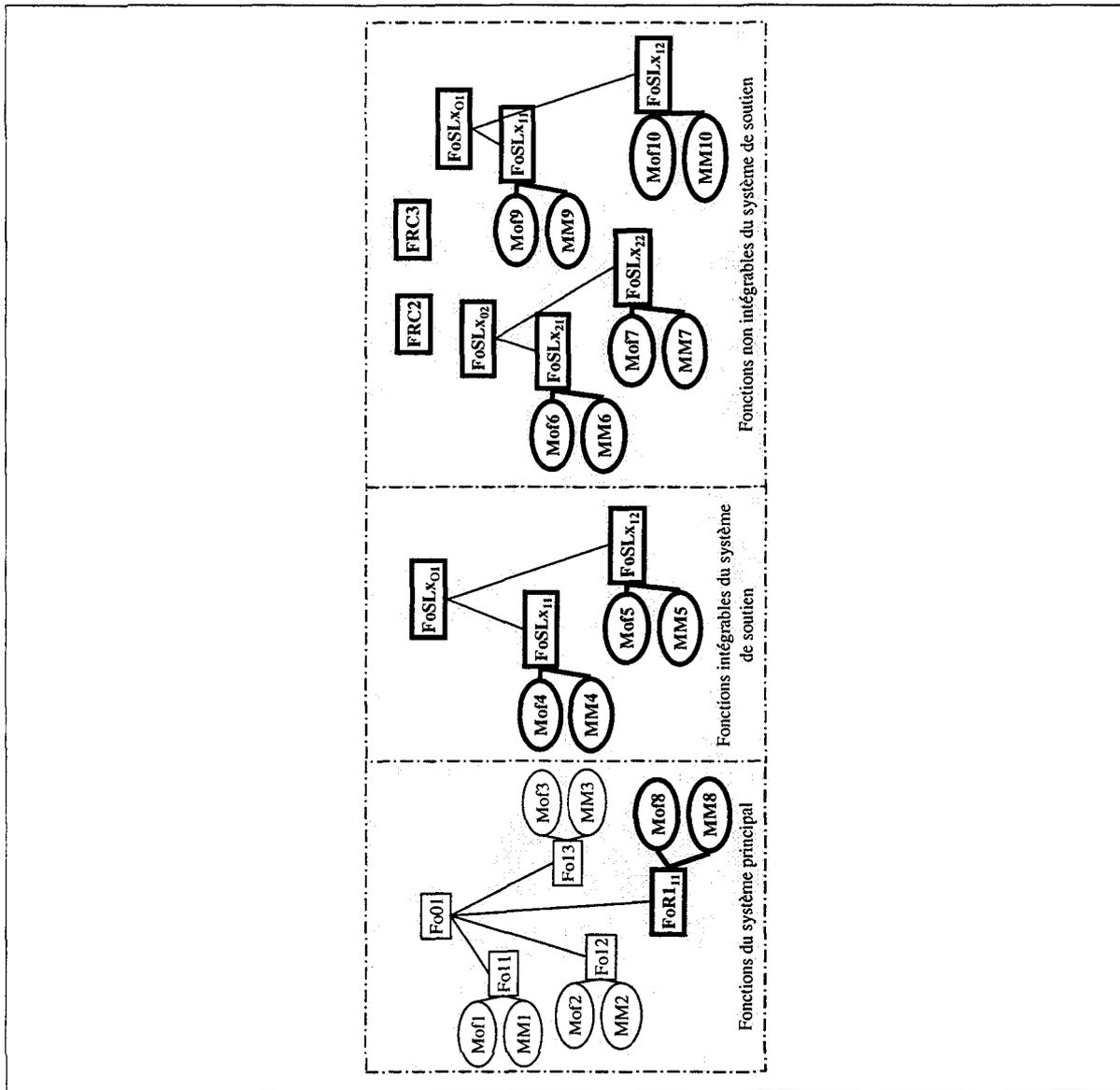


Figure 2.11 : Représentation du niveau 2 du modèle de produit global.

II.2.1. Les fonctions opératoires de soutien

Comme les fonctions de service du système principal, les fonctions de soutien définies au niveau de représentation du besoin sont définies de façon plus précise au niveau de représentation des exigences fonctionnelles. Pour cela, nous introduisons les notions suivantes :

$$FoSL = \{FoSLx_{ij}\}, x = [1, 6], i \text{ et } j \geq 0$$

Où $FoSL$ = ensemble des fonctions opératoires de soutien $FoSLx_{ij}$, x étant l'indice des fonctions de soutien, i et j les indices de niveau de décomposition.

Si l'on ne concevait que le système de soutien, les fonctions de soutien constitueraient les fonctions de service du système de soutien et seraient décomposées en fonctions opératoires. Dans le cadre du modèle de produit global, nous proposons d'étendre ce concept.

Une fonction opératoire de soutien modélise donc l'opération, ou une des opérations, nécessaire à la réalisation de l'objectif fixé par la fonction de soutien à laquelle on l'associe. Les fonctions opératoires de soutien de niveau 0 correspondent donc à chaque fonction de soutien. Chacune de ces fonctions opératoires de soutien de niveau 0 peuvent être décomposées en fonctions opératoires de niveaux inférieurs, et former ainsi des chaînes opératoires.

II.2.2. Intégration des fonctions opératoires de soutien

Qu'elles soient intégrables ou non les fonctions de soutien sont transformées en fonctions opératoires du soutien de niveau 0. Ces fonctions opératoires de soutien de niveau 0 peuvent alors être elles-mêmes décomposées en fonctions opératoires de soutien de niveaux inférieurs. Nous obtenons ainsi une chaîne opératoire pour chacune des fonctions de soutien.

Par exemple si nous considérons la fonction de soutien $FSL3 = Documentation$, cette fonction peut être transformée en fonctions opératoires :

- $FoSL3_{10}$ = rechercher des procédures dans une base de connaissances
- $FoSL3_{20}$ = comparer des procédures suivant certains critères utilisateur...

La fonction opératoire de niveau 0 $FoSL3_{10}$ est décomposable en fonctions opératoires de niveau inférieur comme par exemple $FoSL3_{11}$ = rechercher une procédure de maintenance et $FoSL3_{12}$ = rechercher une procédure d'exploitation (cf. figure 2.12).

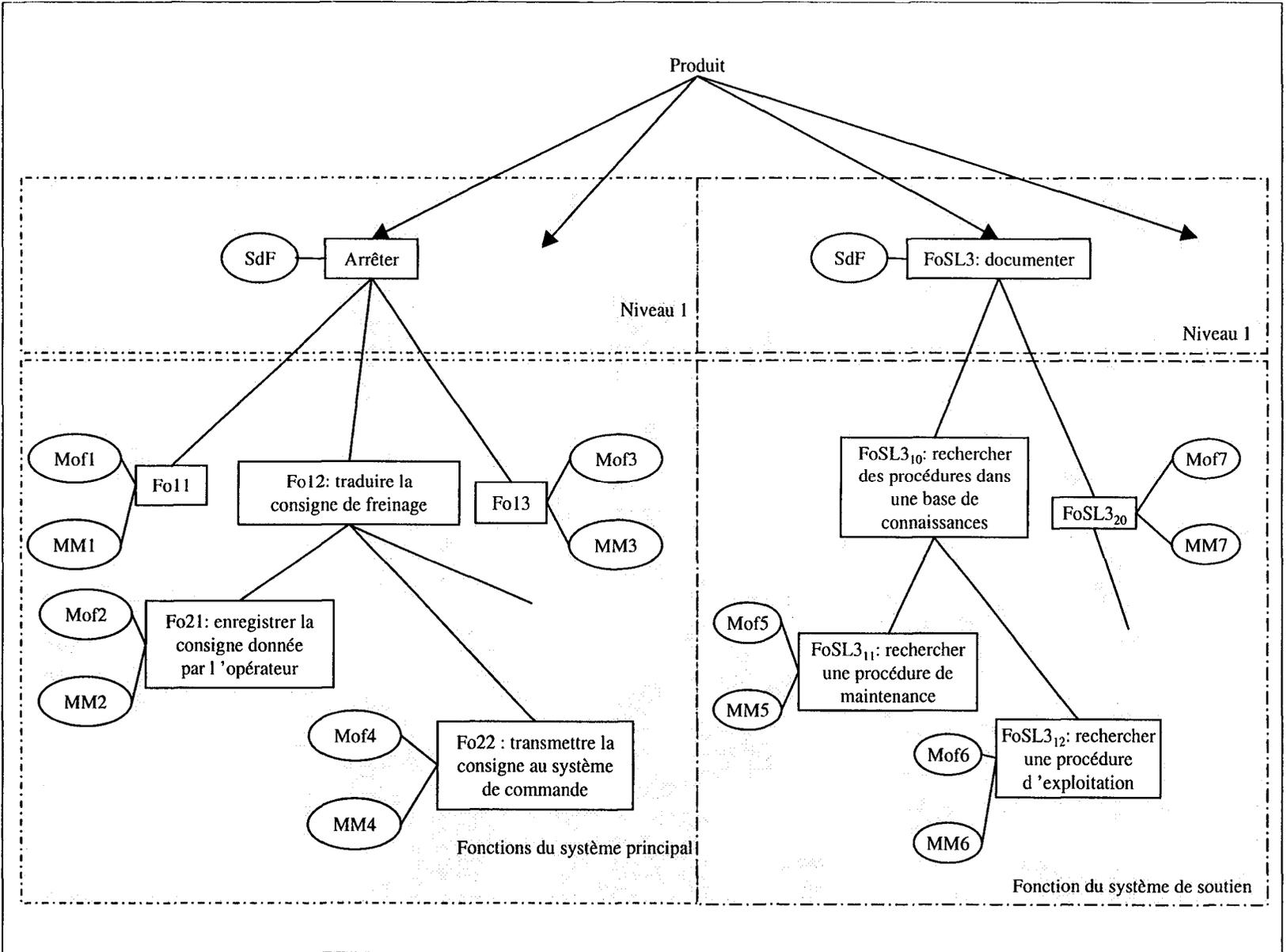


Figure 2.12 : Exemple partiel de décomposition du niveau 2 du modèle de produit global.

Les chaînes opératoires sont ainsi identifiées pour toutes les fonctions de soutien intégrables et non intégrables.

A toutes les chaînes opératoires de soutien issues de fonctions de soutien intégrables sont associées différents principes opératoires. Les solutions de principe sont alors dégagées. Elles doivent être comparées entre elles et subordonnées aux contraintes de sûreté de fonctionnement et de coût global et aux résultats des études qui s'y rapportent, afin que les concepteurs puissent décider de la pertinence de leur intégration physique au système principal. Nous remarquons que le respect des contraintes peut déjà être estimé en utilisant le retour d'expérience sur des systèmes similaires précédents. Mais l'atteinte des objectifs ne pourra être vérifiée qu'en fin de phase de conception, voire même plus tard.

Les chaînes opératoires issues de fonctions de soutien non intégrables représentent des listes de tâches ou de recommandations pour le développement des fonctions de soutien associées. Néanmoins des principes opératoires et des solutions peuvent également être proposés.

Par exemple la fonction de soutien non intégrable $FSL6 = \text{emballage, manutention, stockage et transport}$ peut être décomposée en un ensemble de fonctions opératoires de soutien.

Par exemple :

- $FoSL6_{10}$ = emballer,
- $FoSL6_{20}$ = manipuler,
- $FoSL6_{30}$ = stocker,
- $FoSL6_{40}$ = transporter.

Chacune de ces fonctions opératoires de soutien de niveau 0 peut être décomposée en fonctions opératoires de niveaux inférieurs et former des chaînes opératoires. Ces chaînes opératoires correspondent à un processus destiné à garantir que le produit pourra être emballé, manipulé, stocké et transporté. Les principes opératoires déterminent les conditions à respecter pour atteindre ces objectifs. Par exemple la fonction opératoire de soutien liée au transport peut être décomposable en une série de recommandations de conception relatives par exemple à la taille du produit, à sa masse, à ses conditions climatiques de transport...

Pour certaines fonctions de soutien, les chaînes opératoires ne peuvent être que partiellement intégrables. Par exemple, si nous considérons les chaînes opératoires associées à la fonction de soutien $FSL2 = \text{gestion des faits techniques et plan de maintenance}$, nous constatons qu'une partie des chaînes opératoires relatives à la gestion des faits techniques peut être intégrée sous la forme d'un système d'information

enregistrant les données issues des capteurs, les diagnostics associés et les changements effectués (réparation, remplacement...). De même la partie relative au plan de maintenance peut se diviser en une partie intégrée et une partie non intégrée. En effet, les activités relatives à l'élaboration du plan de maintenance ne peuvent être intégrées. En revanche, le plan de maintenance lui-même peut être intégré sous la forme d'un système d'information dont la fonction est de signaler à l'utilisateur au moment voulu qu'une tâche de maintenance est à réaliser. Dans chacun des cas, les principes opératoires et les solutions seront différents, de la même façon que pour les fonctions de soutien totalement intégrables et totalement non intégrables.

Nous obtenons donc les ensembles suivants :

$$FoSLx_{ij} (j > 0) \in FoSLI \text{ si } FSLx \in FSLI$$

Où $FoSLx_{ij}$ = fonction opératoire ij ($i, j > 0$) correspondant à la fonction de soutien $FSLx$,

$FoSLI$ = ensemble des fonctions de soutien opératoires intégrables (tout niveau),

$FSLI$ = ensemble des fonctions de soutien intégrables.

$$FoSLx_{ij} (j > 0) \in FoSLNI \text{ si } FSLx \in FSLNI$$

Où $FoSLx_{ij}$ = fonction opératoire ij ($i, j > 0$) correspondant à la fonction de soutien $FSLx$,

$FoSLNI$ = ensemble des fonctions de soutien opératoires non intégrables,

$FSLNI$ = ensemble des fonctions de soutien non intégrables.

II.2.3. Les fonctions ressources

Seule la fonction ressource $FRI = \text{équipements de tests et de soutien}$ est intégrable. C'est une ressource particulière associée à toutes les fonctions du système principal nécessitant des tests, essais ou épreuves durant l'exploitation du système global. Tout en étant une ressource du système de soutien, elle peut donc constituer une fonction intégrée du système principal. Ainsi le diagnostic peut être automatisé pour les fonctions de service auxquelles cette fonction ressource est associée. Lors de la mise en œuvre du modèle de produit global, le concepteur détermine les fonctions de service qui peuvent bénéficier d'équipements de tests intégrés, et définir les fonctions opératoires, les principes opératoires et les solutions de principe adaptés pour chacune de ces fonctions.

Les fonctions opératoires ajoutées sont alors notées $FoR1_{ij}$, fonction opératoire ressource issue de la fonction ressource FRI , i et j étant les indices de décomposition (semblables à ceux des fonctions opératoires et des fonctions opératoires de soutien). Celles-ci doivent être subordonnées aux études relatives aux contraintes de sûreté de fonctionnement et de coût global afin de permettre aux concepteurs de décider de la pertinence de l'intégration d'équipements pour ces différentes fonctions opératoires. La figure 2.13 représente un exemple.

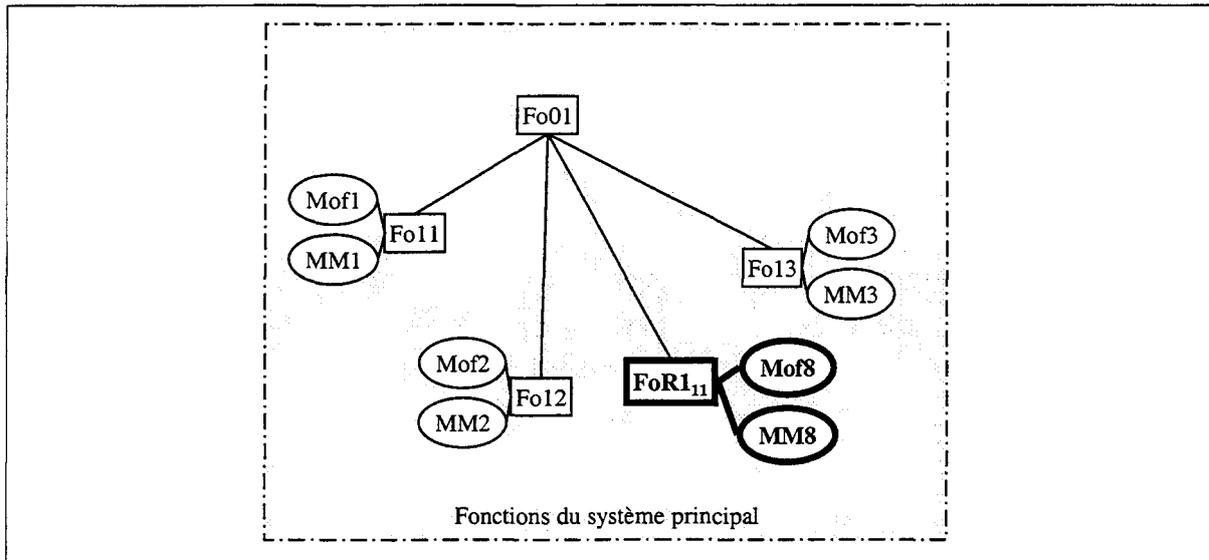


Figure 2.13 : Représentation de l'intégration d'une fonction ressource au niveau 3 du modèle de produit global.

Pour les fonctions ressources non intégrables, une analyse du cahier des charges et du retour d'expérience permet de donner une première évaluation de leur dimensionnement. A ce niveau, les fonctions ressources non intégrables sont donc caractérisées, par exemple elles sont quantifiées. Elles forment un ensemble :

$$FRC = Car (FR)$$

Où : FRC = ensemble des fonctions ressources caractérisées,
 Car = opérateur de caractérisation,
 FR = ensemble des fonctions ressources.

Par exemple pour la fonction ressource non intégrable $FR2 = \text{personnel d'exploitation et personnel de maintenance}$, la caractérisation doit permettre une première estimation du nombre de personnes nécessaires à la maintenance et à l'exploitation du système et de leurs compétences (donc du besoin en formation), en fonction du profil d'emploi et de la politique de maintenance de l'utilisateur.

Lorsque le modèle correspondant à ce niveau de représentation est élaboré, le concepteur décide ou non de l'intégration physique des fonctions opératoires de soutien et des fonctions ressources intégrables. Selon le profil d'emploi du système, les fonctions intégrables seront intégrées au niveau inférieur.

II.2.4. Les modes de marches et les modes de défaillance

Aux modes de marches définis dans [Grudzien-99] et présentés dans la première partie de ce chapitre, nous ajoutons un mode de défaillance fonctionnelle "non-arrêt de la fonction" : la fonction active continue à se réaliser alors que la désactivation a été sollicitée. Les aspects sécurité humaine et matérielle sont à prendre en compte pour ce mode de défaillance. Il correspond à un mode de défaillance qui selon le cas peut être important.

Par exemple, sur un véhicule, si les composants mis en œuvre lors de l'accélération sont défaillants, et que l'accélération du véhicule ne peut être réduite ou annulée, cela représente un danger.

Les études portant sur les modes de marche et les modes de défaillance fonctionnelle sont à appliquer aux fonctions opératoires. L'objectif de ces études est de recenser les modes de défaillance des fonctions opératoires et d'en déduire les fonctions opératoires de soutien qui peuvent être mises en place et dimensionner les ressources nécessaires pour contrer les effets de ces modes de défaillance sur le fonctionnement souhaité du système.

Dans le cadre de notre étude, nous nous limitons au premier niveau de soutien. C'est pourquoi nous ne considérons pas la réalisation des études AMDE et GEMMA sur les fonctions opératoires de soutien. En revanche, la mise en œuvre de ces études sur les fonctions opératoires permet de générer des informations utiles à la définition des fonctions opératoires de soutien et la caractérisation des fonctions ressources. En effet une analyse du retour d'expérience des projets similaires permet, à ce niveau, de mettre en évidence les fonctions opératoires sur lesquelles la conception n'a pas permis de satisfaire les exigences de maintenance et d'exploitation du système. Ces remarques sont exprimées pour chaque critère de sûreté de fonctionnement et de coût.

II.3. Niveau 3 : représentation technologique

Ce niveau transforme les fonctions opératoires de plus bas niveau sous la forme d'un ensemble de fonctions de base (tableau 2.8 et figure 2.14) :

FB = ensemble des fonctions de base

| Nature | Description |
|--------|-----------------------------------|
| Item | FB : Fonction de base |
| Item | FBS : Fonction de base du soutien |
| Item | Sto : Solution technologique |

Tableau 2.8 : Description des items et attributs du niveau 3 du modèle de produit global.

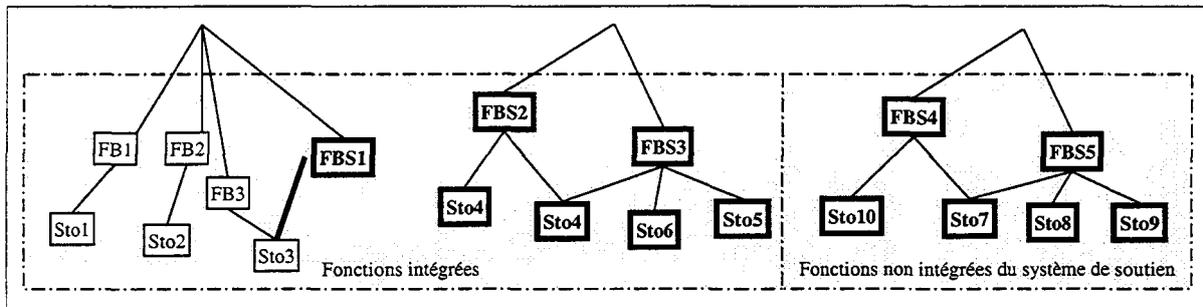


Figure 2.14 : Représentation du niveau 3 du modèle de produit global.

II.3.1. Fonctions de base de soutien

A chaque fonction opératoire de plus bas niveau est donc associé un ensemble de fonctions de base relatives aux différents métiers de la conception. Il en est de même pour les fonctions de soutien. Elles sont alors transformées en fonctions de base du soutien, caractérisées par les différents métiers de la conception et en relation avec les ressources et les fonctions de base du système principal :

FBS = ensemble des fonctions de base du soutien.

L'intégration physique des fonctions de soutien et des fonctions ressources a été décidée à l'issue du niveau supérieur. Les points de vue des différents métiers permettent d'envisager l'ampleur des conséquences de cette intégration en termes de matériels et d'interfaces entre ces matériels. Les fonctions de soutien et les fonctions ressources sont donc intégrées et décomposées en fonctions de base de soutien dédiées aux différents

métiers de la conception. Elles forment alors l'ensemble suivant, union des fonctions de base du soutien des types automatique, mécanique, électrique... :

FBSI = ensemble des fonctions de base du soutien intégrées.
FBSx ∈ FBSI si les concepteurs ont décidé l'intégration de FSLx.

Les fonctions opératoires de soutien non intégrées sont, elles aussi, décomposées en fonctions de base dédiées métier. Elles forment l'ensemble suivant :

FBSNI = ensemble des fonctions de base de soutien non intégrées.
FBSx ∈ FBSNI si les concepteurs ont décidé de ne pas intégrer FSLx.

Les fonctions de base ont pour objectif d'apporter des solutions aux problèmes que les concepteurs ont à résoudre par l'utilisation de modèles, de méthodes et d'outils spécifiques à leur domaine [Grudzien-99]. L'ensemble des fonctions de base (y compris de soutien) permet de décrire d'un point de vue technologique le support qui sera associé à chacune des fonctions opératoires tout en répondant au besoin spécifié par le client en terme d'exploitation et de maintenance.

En outre, nous considérons que les activités identifiées dans [Grudzien-99] comme étant les fonctions liées aux activités de surveillance du système, sont liées non seulement à l'exploitation du système mais aussi à son soutien et constituent donc des fonctions de base de soutien. Plus précisément, elles forment l'ensemble fini des fonctions de base de la fonction ressource *FRI = équipements de tests et de soutien*. Or nous avons vu que cette fonction ressource est multiple puisqu'elle doit être associée à un grand nombre des fonctions du système principal. Cet ensemble de fonctions de base du soutien doit donc être lui aussi multiple. Il sera intégré physiquement pour chacune des fonctions pour lesquelles l'intégration a été jugée nécessaire au niveau précédent.

Pour les fonctions ressources non intégrables, le concept de fonction de base dédiée aux différents métiers de la conception n'a pas lieu d'être. En revanche, pour ces fonctions, le niveau 3 consiste à valider les caractérisations définies au niveau 2 en fonction des décisions concernant les fonctions de base (y compris de soutien).

II.3.2. Les solutions technologiques

Pour contribuer à la recherche de la performance globale, nous proposons que les solutions technologiques répondent à la fois aux fonctions de base et aux fonctions de base du soutien. En particulier les fonctions de base du soutien relatives à la fonction ressource *FRI* doivent être compatibles avec les solutions technologiques des fonctions de base associées.

Conclusion

Au cours de ce chapitre nous avons décrit dans une première partie un modèle de produit structuré en cinq niveaux de représentation. Nous avons également défini les spécifications permettant de définir un modèle de produit global dans un contexte de performance globale.

Dans une seconde partie, nous avons proposé un modèle de produit global permettant la modélisation simultanée du système principal et du système de soutien composant un produit.

Les deux premiers niveaux consistent en une analyse fonctionnelle détaillée du système global. Ils regroupent les concepts généraux de la sûreté de fonctionnement et du soutien logistique. Nous avons défini le coût global du produit comme une contrainte complémentaire à la contrainte de sûreté de fonctionnement. Nous avons introduit les différents concepts (fonction de soutien, de fonction ressource, de fonction opératoire de soutien, fonction de base du soutien) permettant la définition de la partie système de soutien du produit et défini l'intégration physique du soutien au produit.

Les trois niveaux de représentation suivants constituent le développement et la définition des composants du produit global. Les concepts cités sont dédiés métier et permettent la description technologique et technique du produit incluant le choix des composants.

Dans le chapitre suivant, nous nous intéressons au processus de conception mettant en œuvre le modèle de produit global que nous avons proposé.

Chapitre III.
Processus de conception

Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons au processus de conception constituant le second élément de la méthode de conception que nous proposons. Dans le cadre de ce mémoire, nous considérons le processus de conception comme l'enchaînement des tâches concourant à l'obtention d'un produit défini.

Dans la première partie de ce chapitre, nous présentons tout d'abord le méta-modèle d'élaboration des concepts développé et utilisé par [Jacquet-98] et [Grudzien-99] pour présenter leur processus de conception. L'analyse de ce processus conduit à élaborer les spécifications d'un processus de conception visant à atteindre la performance globale.

Dans la deuxième partie, nous développons le processus de conception que nous proposons, mettant en œuvre le modèle de produit décrit dans le chapitre II.

I. Processus de conception initial et spécifications

Dans la première partie de ce paragraphe, nous présentons le méta-modèle d'élaboration des concepts utilisé pour décrire le processus de conception initial. Puis dans la deuxième partie, nous décrivons les spécifications nécessaires à l'amélioration de ce processus pour la recherche de la performance globale.

I.1. Méta-modèle d'élaboration des concepts

Le processus de conception développé dans [Jacquet-98] et [Grudzien-99] est décrit suivant le méta-modèle d'élaboration des concepts, que nous explicitons dans ce paragraphe.

Le méta-modèle présenté figure 3.1, est constitué de six entités génériques qui sont :

- L'identification du "quoi faire ?" : c'est une fonction générique visant à formaliser le problème à résoudre. Cette étape permet d'identifier les objectifs à atteindre à chacun des niveaux de représentation considéré et pour chaque intervenant de la conception,
- L'identification du "comment faire ?" : c'est une fonction générique ayant pour but d'identifier les solutions susceptibles de répondre au problème soulevé à l'étape précédente. Cette opération vise à identifier quelles sont les fonctions nécessaires à la satisfaction de l'objectif,
- L'identification du "avec quoi ?" : c'est une fonction générique ayant pour but de préciser les supports matériels et/ou logiciels que l'on peut associer à la (aux) solution(s) retenue(s) pour la satisfaction du "comment faire ?". Cette opération permet de préciser les moyens à mettre en œuvre pour atteindre l'objectif,

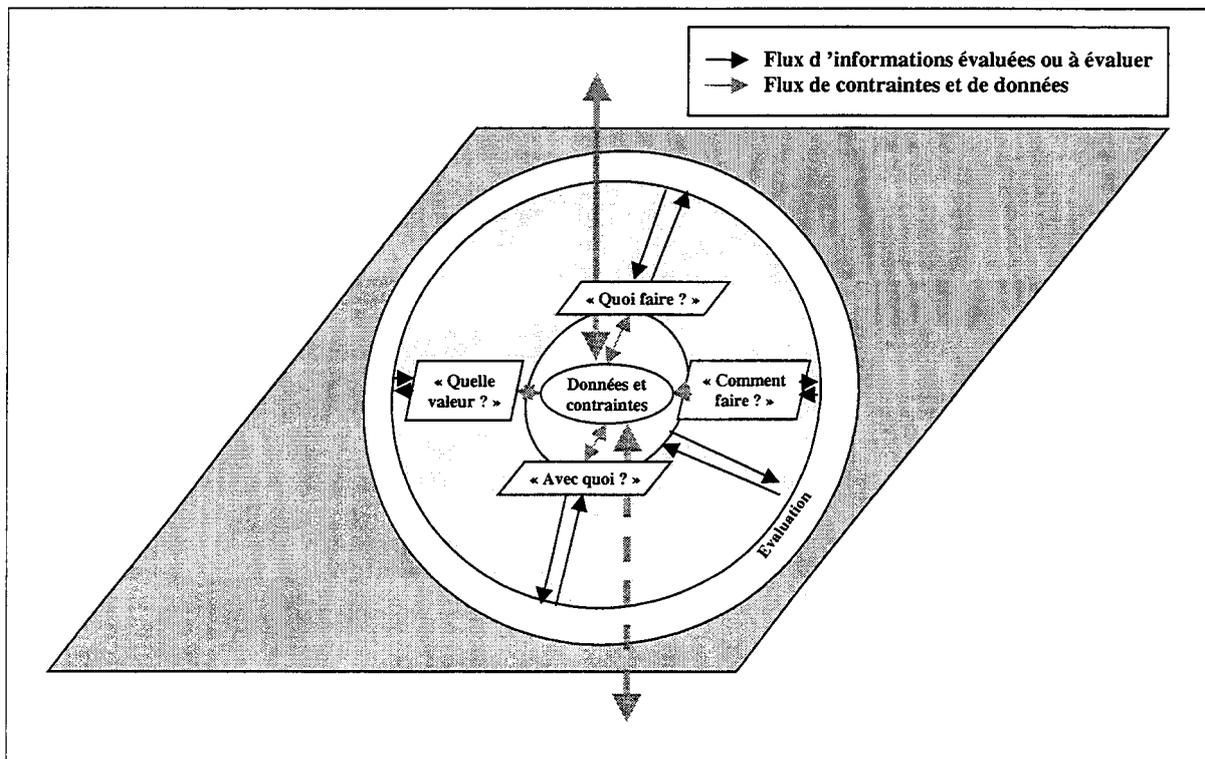


Figure 3.1 : Méta-modèle d'élaboration des concepts.

- La quantification de "quelle valeur ?" : c'est une fonction générique permettant de valuer les supports préconisés à l'étape précédente. Cette opération a pour but de donner une valeur aux différentes solutions données au problème posé. Elle permet donc de valuer les moyens mis en œuvre,
- L'"évaluation" : cette fonction générique a différents objectifs. Elle permet tout d'abord d'évaluer les résultats issus des différentes phases d'identification et de valuation. Elle permet ensuite de valider ou de remettre en cause certaines

propositions faites durant le processus de conception. Elle permettra notamment d'évaluer, à différents niveaux de granularité, la disponibilité du système, des fonctions....

- Les "données et les contraintes" : elles représentent les limites définies dans le cahier des charges ainsi que l'ensemble des connaissances et des contraintes générées au cours de la conception. Les contraintes devront toutes être satisfaites afin d'obtenir un système conforme aux exigences.

Le méta-modèle s'instancie sous la forme de plusieurs modèles d'élaborations des concepts définis aux cinq niveaux de représentation. Ces modèles communiquent entre eux, échantent des données et des informations à travers "données et contraintes".

A chaque modèle d'élaboration est associé un domaine de conception :

- Le domaine fonctionnel qui regroupe les niveaux représentation du besoin et représentation des exigences fonctionnelles du besoin du modèle de produit,
- Le domaine technologique associé au niveau représentation technologique du modèle de produit. Il fait la transition entre le domaine fonctionnel (fonctions) et le domaine technique (matériels),
- Le domaine technique associé au niveau représentation technique du modèle de produit,
- Le domaine pré-manufacturier associé au niveau représentation détaillée du modèle de produit. Ce niveau permet d'aboutir aux composants spécifiés que l'on pourra alors fabriquer ou acquérir auprès d'un fournisseur.

Les intervenants au niveau fonctionnel sont des ingénieristes chargés de traduire les exigences du client en fonctions à satisfaire grâce à leurs connaissances générales. Pour les autres domaines trois types de compétences ont été identifiés et représentés au niveau du modèle : l'automatique, la mécanique et la conception pour l'exploitation (maintenance).

Outre le méta-modèle d'élaboration des concepts, un réseau de Petri décrit les opérations et processus associés à chaque niveau de représentation du modèle de produit. La figure 3.2 suivante représente un exemple correspondant à la mise en œuvre du premier niveau de représentation du modèle de produit [Grudzien-99].

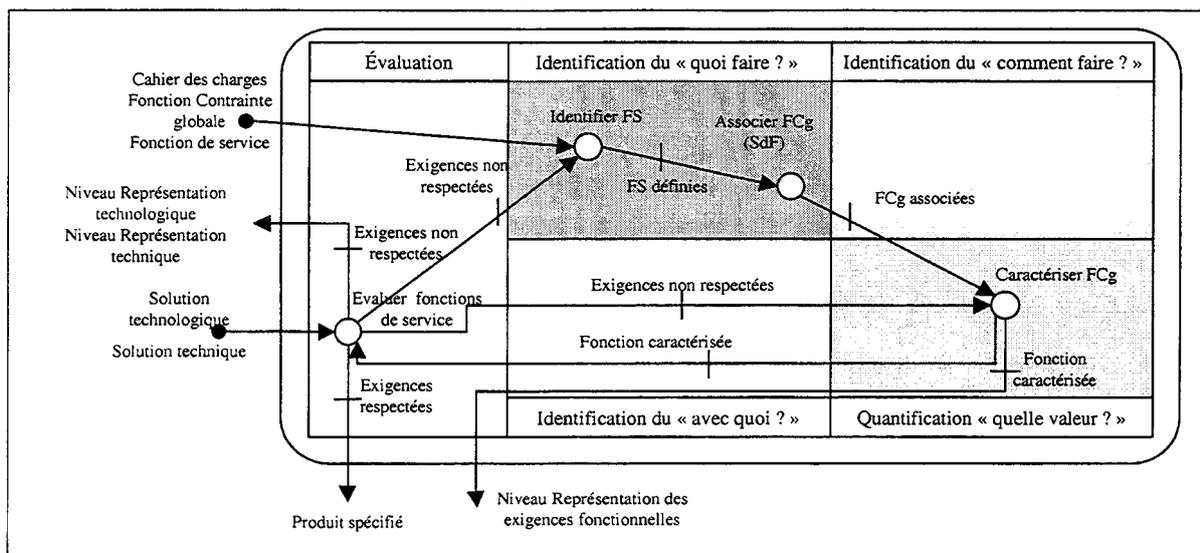


Figure 3.2 : Exemple de réseau de Petri associé au niveau Représentation des besoins.

Dans le cadre de la performance globale, nous avons montré l'importance de la cohérence des informations tout au long du cycle de vie et tout au long du processus de conception. Or à notre avis, le méta-modèle d'élaboration des concepts ne met pas suffisamment en évidence l'importance de la fonction d'évaluation. De plus la mise en œuvre de ce méta-modèle dans [Jacquet-98] et [Grudzien-99] pour décrire le processus de conception ne permet pas la prise en compte des trois axes de la performance globale. En effet l'ensemble des phases du cycle de vie, le rôle des intervenants sur le produit et sa décomposition et enfin l'évaluation de la performance globale ne sont pas pris en compte.

C'est pourquoi dans le paragraphe suivant, nous présentons les spécifications d'un processus de conception adapté au contexte de la performance globale.

1.2. Spécification d'un processus de conception

L'analyse du processus de conception précédent génère deux réflexions concernant d'une part la prise en compte du cycle de vie dès la conception et d'autre part la validation locale de chaque étape de la conception.

Pour tenir compte de ces contraintes dès la conception, la méthode de conception doit permettre :

1. de rassembler les intervenants de chacune des phases du cycle de vie durant toute la phase de conception,
2. de mettre en œuvre un modèle de produit, intégrant les points de vue de chacun de ces intervenants, c'est à dire de prendre la globalité du cycle de vie. Le processus de conception précédent ne fait référence qu'à trois métiers (automatique, électricité,

maintenance) mais pas à l'ensemble des métiers mis en œuvre au cours des phases du cycle de vie,

3. une validation de chacune des étapes qui le constituent, afin d'assurer la performance globale du produit durant la phase de conception. Or la fonction générique d'évaluation du méta-modèle d'élaboration des concepts ne permet qu'une validation locale de la conception par rapport aux objectifs du niveau de représentation considéré. En outre le graphe utilisé pour représenter les opérations du processus de conception, ne permet pas de mettre en évidence les liens entre les différents niveaux du modèle de produit.
4. la mise en œuvre d'un processus de conception adapté à l'entreprise faisant référence à un ensemble de notions connues de l'entreprise. [Sénéchal et al-99] considère d'ailleurs, que "l'organisation concourante de la conception peut être vue comme un moyen d'augmenter l'efficacité du processus de régulation de l'entreprise par une meilleure interprétation des besoins permettant d'atteindre les objectifs dictés par le marché".

Dans le paragraphe suivant, nous proposons un processus de conception mettant en œuvre le modèle de produit global proposé au chapitre II, permettant une validation globale de la conception sur le cycle de vie du produit et contribuant ainsi à la recherche de la performance globale.

II. Proposition d'un processus de conception

Nous proposons un processus de conception avec l'objectif de répondre au mieux aux spécifications précédentes.

Ainsi ce processus est un processus concourant, qui permet de rassembler lors du cycle de vie les intervenants et de prendre en compte leurs points de vue (spécification 1).

Dans la première partie de ce paragraphe, nous proposons et justifions l'utilisation d'un modèle de pilotage. Nous montrons en quoi il permet de prendre en compte les validations successives nécessaires à la recherche de la performance globale (spécification 3).

Pour répondre au souci de l'adaptation de l'entreprise (spécification 4), nous considérons parallèlement les notions de processus de conception et de projet. Nous montrons dans la deuxième partie, comment la "vue projet" de la phase de conception peut permettre la prise en compte de la structure de l'entreprise dans le processus de conception.

La troisième partie décrit le processus de conception proposé, mettant en œuvre le modèle de produit global proposé dans le second chapitre de ce mémoire (spécification 2), en appliquant les concepts exposés dans les deux paragraphes précédents.

II.1. Processus de conception et pilotage

De façon générale, le pilotage se définit comme une structure décisionnelle et informationnelle [Trentesaux-96] dont le rôle est de limiter les déviations entre un comportement réel du système ou de l'activité pilotée et un comportement standard appelé encore comportement nominal [Neubert-97]. Le modèle fondamental du pilotage est le suivant (figure 3.3) :

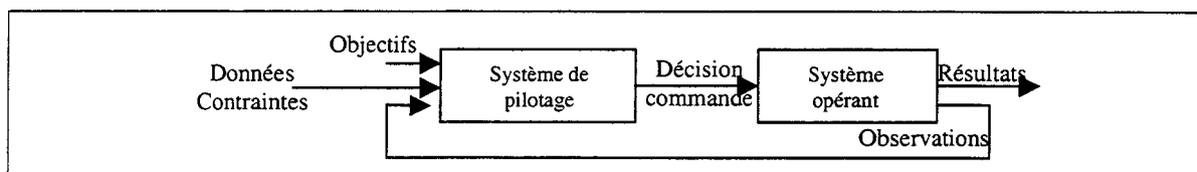


Figure 3.3 : Modèle fondamental du pilotage.

D'après [Lorino-97], piloter^{*}, c'est "accomplir de manière continue deux fonctions complémentaires : déployer la stratégie en règles d'action opérationnelles (déploiement) et capitaliser les résultats et les enseignements de l'action pour enrichir la réflexion sur les objectifs (retour d'expérience)". Dans [AFGI-92], on trouve l'analyse du processus de pilotage suivante : "vu la complexité des processus physiques à contrôler (de l'"idée" du produit au produit fini vendu) et du champ couvert (du stratégique à l'opérationnel), le mécanisme est multiniveaux, hiérarchisé (chaque niveau cadrant le suivant) et bouclé (répercussion et correction des écarts). Ces niveaux, qui ne sont pas à confondre avec des niveaux hiérarchiques de l'organigramme de l'entreprise, sont chacun caractérisés par leur horizon (visibilité), leur période (réactualisation) et leur maille (résolution) [...]. Le processus consiste alors, niveau par niveau, par cadrages successifs, à préparer formellement, progressivement, en cohérence et avec une exécutabilité croissante les conditions de la réalisation pour se terminer par l'émission d'ordres exécutoires vers le processus physique. Il est fait de comparaisons, d'itérations, de simulations, ..., et pour atteindre les objectifs fixés, nécessite entre autres des moyens de mesure et d'évaluation (indicateurs ou cadrans) et des moyens d'action (variables de décision ou "leviers")".

Nous proposons de positionner le pilotage et les cinq fonctions génériques du méta-modèle d'élaboration des concepts. Dans un contexte de pilotage, le modèle fondamental (figure 3.4) de pilotage fait alors apparaître ces cinq fonctions ainsi que les notions d'évaluation et de données/contraintes et leurs interactions.

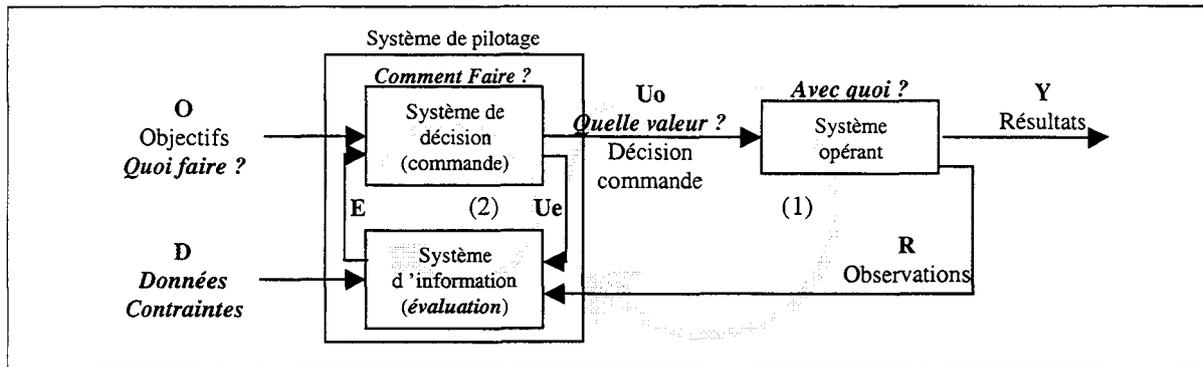


Figure 3.4 : Modèle fondamental de pilotage et fonctions génériques du méta-modèle d'élaboration des concepts.

Ce schéma fait apparaître deux boucles fondamentales de pilotage : le pilotage de l'activité du système opérant (1) et le pilotage du système d'information (2). Il permet de mettre en évidence :

- La chronologie des activités, non apparente dans le méta-modèle. Le modèle de pilotage doit permettre de faire ressortir l'enchaînement des différentes étapes ainsi que les validations et les retours existants entre ces étapes,
- les rôles distincts du système opérant et du système de pilotage dans le cas de la conception. Le système opérant est composé de l'équipe de conception (ingénieurs, techniciens des différents métiers de la conception,...), c'est à dire des personnes qui réalisent les études de conception du produit. Le système de pilotage comporte l'équipe de pilotage de la conception (système de décision) assistée par le système d'information lui permettant de capitaliser les informations, de les gérer, de les comparer... Dans le cadre de ce mémoire, nous ne détaillons pas les fonctionnalités du système d'information. Cependant dans le contexte de la recherche de la performance globale, nous supposons que l'entreprise met en œuvre un système d'information, support adapté à la conception d'un produit globalement performant.

Pour répondre à la spécification 2, nous considérons que le modèle de pilotage s'applique à chacune des étapes du processus de conception identifiées dans le paragraphe précédent d'une part, et à chacun des niveaux (fonctionnel, technologique, technique et pré-manufacturier) du modèle de produit global, d'autre part.

Le pilotage du processus de conception est facilité s'il s'intègre dans l'organisation de l'entreprise. Dans le paragraphe suivant, nous montrons que processus de conception et projet présentent des analogies permettant de répondre à cet objectif.

II.2. Processus de conception et projet

Pour permettre la prise en compte de la structure de l'entreprise dans la proposition d'un processus de conception contribuant à la recherche de la performance globale, nous précisons le parallèle entre les notions de projet et de processus de conception.

[Lorino-97] met en évidence les similitudes entre processus et projet. Il définit un processus comme "un ensemble d'activités reliées entre elles par des flux d'information ou de matière significatifs, et qui se combinent pour fournir un produit matériel ou immatériel important bien défini". D'autre part, "comme les processus, un projet est souvent transversal aux métiers et à l'organisation de l'entreprise, il se définit selon une logique de finalité, d'extrait attendu et donc de client. Contrairement au processus, le projet présente un caractère temporaire, borné dans le temps, avec une date de début et une date de fin, et il aboutit à un produit unique en son espèce et non à un produit générique" [Lorino-97]. D'autre part, [Perrin-99] définit un processus de conception comme "une démarche et succession d'étapes suivies par des individus ou des organisations afin d'élaborer à partir d'un cahier des charges les caractéristiques et les spécifications d'un objet technique".

Par ailleurs, d'après la norme NF X 50-105, un projet est "une démarche spécifique, qui permet de structurer méthodiquement et progressivement une réalité à venir. Il est défini et mis en œuvre pour élaborer la réponse au besoin d'un utilisateur, d'un client ou d'une clientèle et il implique des objectifs et des actions à entreprendre avec des ressources données" [AFNOR-94].

Ces définitions mettent en évidence plusieurs similitudes entre projet et processus : la succession d'étapes, la notion de démarche, de structuration. On peut donc considérer que la conception d'un système constitue un projet pour une entreprise.

C'est pourquoi nous proposons de décrire le processus de conception en faisant référence aux notions mises en œuvre dans le cadre du management d'un projet. Cela doit permettre de faciliter l'intégration du processus de conception au sein de la structure de l'entreprise d'une part et de prendre en compte les contraintes de l'entreprise dans le processus de conception.

Les méthodes de management de projet suivent les trois grandes étapes classiques suivantes : cadrer, conduire, conclure [Maders et al.-98]. L'avantage d'utiliser ces phases au contenu exprimé de façon simple, est de donner une idée claire de chacune des étapes de la conception d'un système sans en cacher la réelle complexité. Leur mise en œuvre couvre en partie les aspects du processus de conception liés à l'organisation de la phase de conception et l'impact réciproque entre cette dernière et l'entreprise.

Cependant au terme de conduite de la conception, nous préférons le terme de pilotage. Pour présenter notre proposition, nous retenons donc les trois étapes suivantes du processus de conception :

1. Cadrer le produit à concevoir,
2. Piloter la conception,
3. Conclure la conception.

Le schéma 3.5 suivant représente les différentes activités du processus de conception proposé. Nous le décrivons dans les paragraphes suivants.

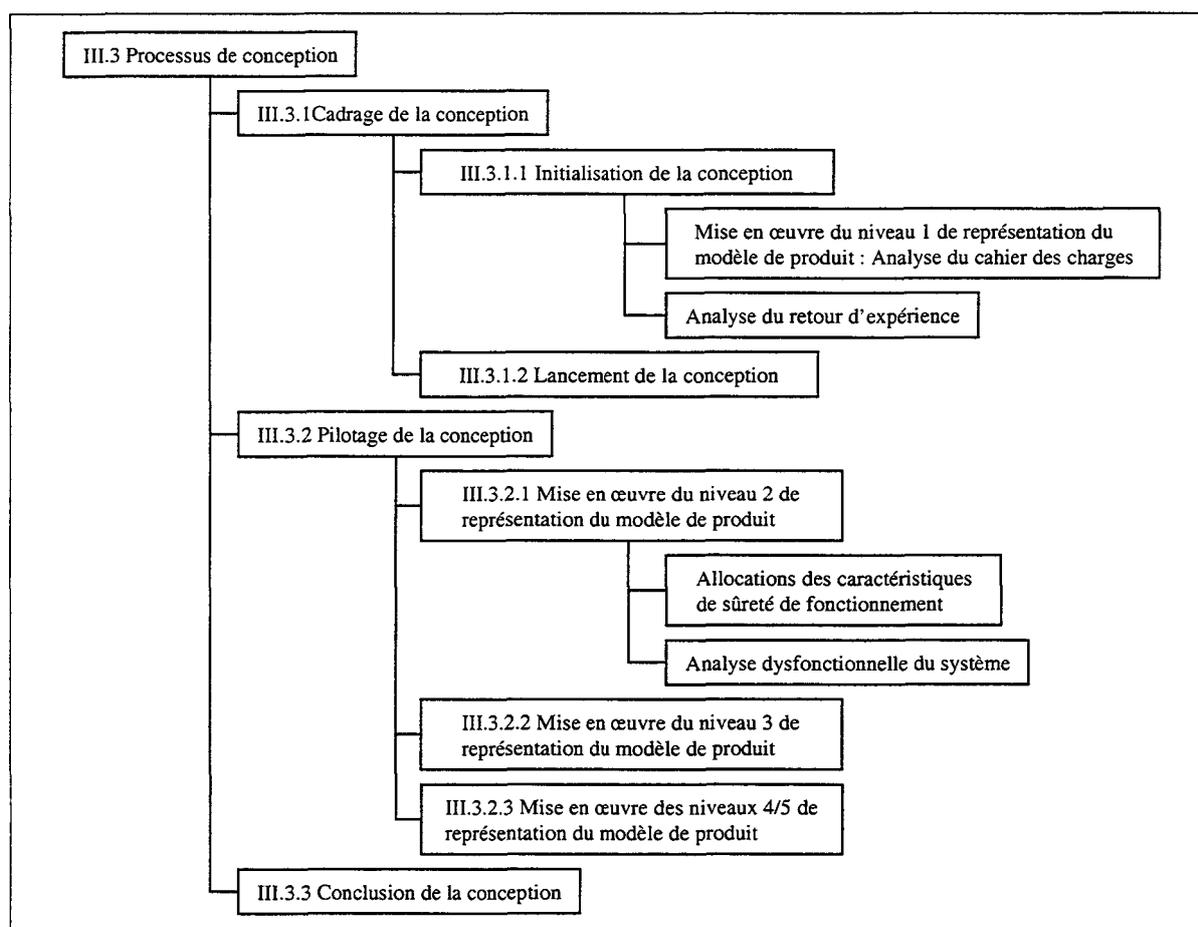


Figure 3.5 : Schéma descriptif du contenu de la proposition.

II.3. Processus de conception

Notons que notre contribution dans l'utilisation du modèle de produit se situe aux deux premiers niveaux de représentation.

Le schéma global de l'enchaînement des trois étapes du processus de conception (cadrer, piloter, conclure) est représenté par le réseau de Petri non marqué 3.6 suivant.

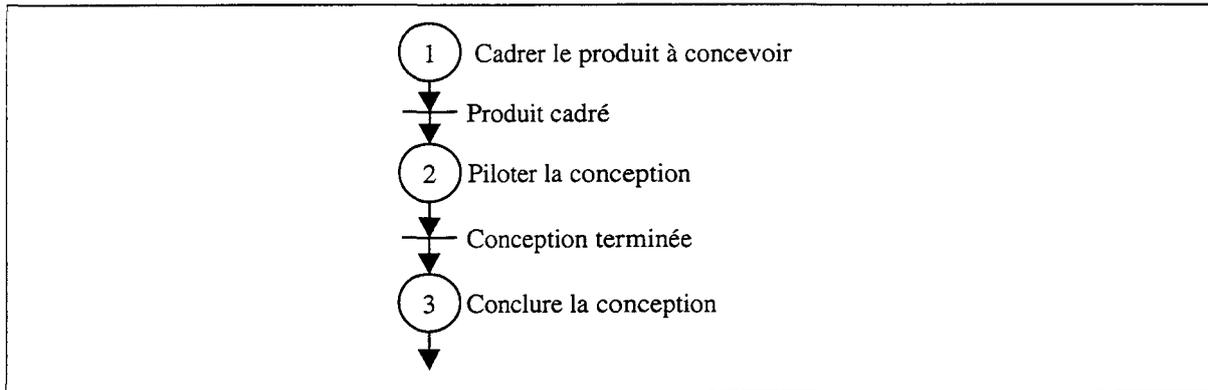


Figure 3.6 : Schéma global de l'enchaînement des étapes du processus de conception.

Nous décrivons en détail dans les paragraphes suivants chacune de ces étapes (nous n'avons donc pas représenté sur le schéma global les bouclages internes aux phases du graphe de la figure 3.6).

Nous utilisons les réseaux de Petri non marqués pour la description du processus de conception, en complément du modèle de pilotage. Ces graphes définissent l'enchaînement et la coordination de chacune des activités du processus de conception. Le modèle de pilotage est utilisé pour définir les cinq fonctions génériques de chacune de ces activités.

II.3.1. Cadrage du produit à concevoir

Cette étape de la phase de conception est l'étape déterminante de la conception. Elle comporte deux étapes : l'initialisation de la conception et le lancement de la conception. Nous pouvons représenter cette étape du processus de conception par le graphe 3.7 suivant:

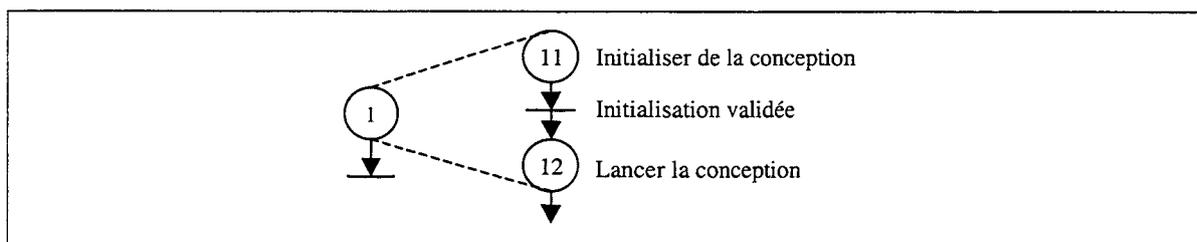


Figure 3.7 : Enchaînement des activités du cadrage du produit à concevoir.

Les étapes de cette partie du processus sont décrites dans les paragraphes suivants.

II.3.1.1 Initialisation de la conception

L'initialisation comporte trois activités principales:

- le choix de la structure d'organisation du projet,
- la lecture (ou la rédaction, dans certains cas) du cahier des charges,
- l'analyse du retour d'expérience.

Ces trois activités s'enchaînent selon le schéma de la figure 3.8 suivant (décomposition en macro étapes).

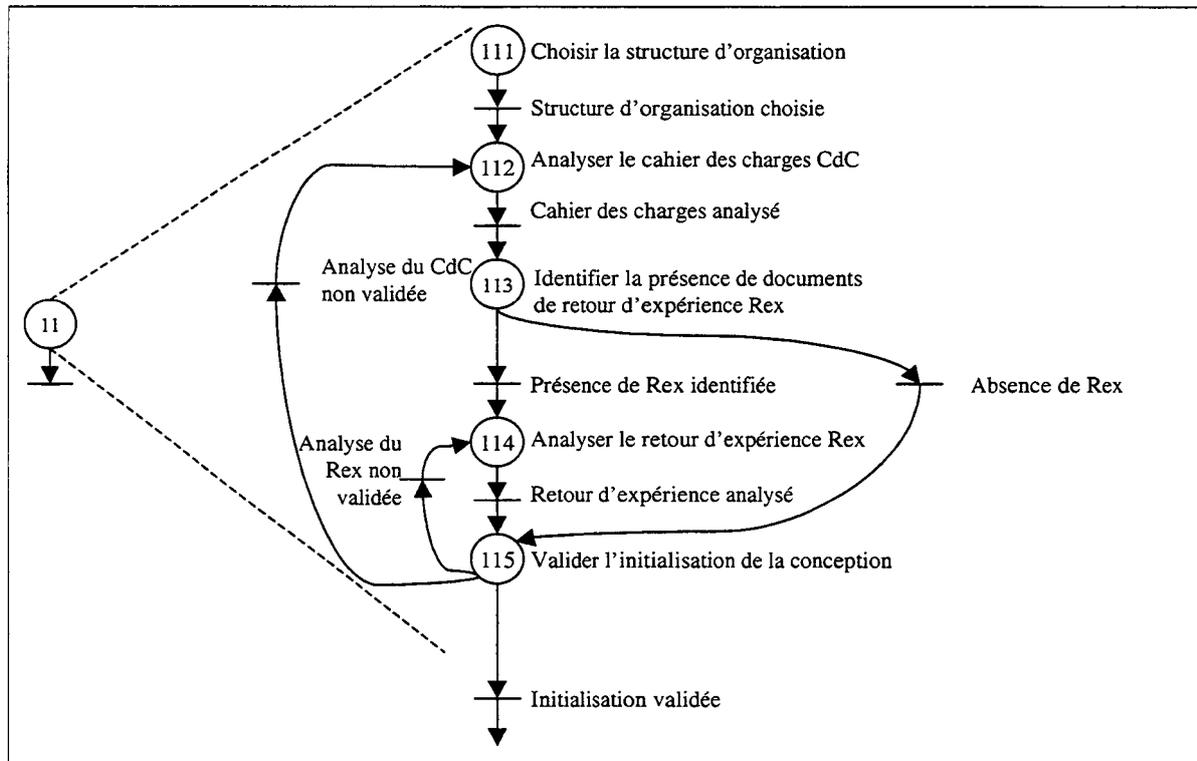


Figure 3.8 : Enchaînement des étapes d'initialisation de la conception.

Pour ces activités de l'initialisation de la conception, nous associons le schéma de pilotage suivant (figure 3.9).

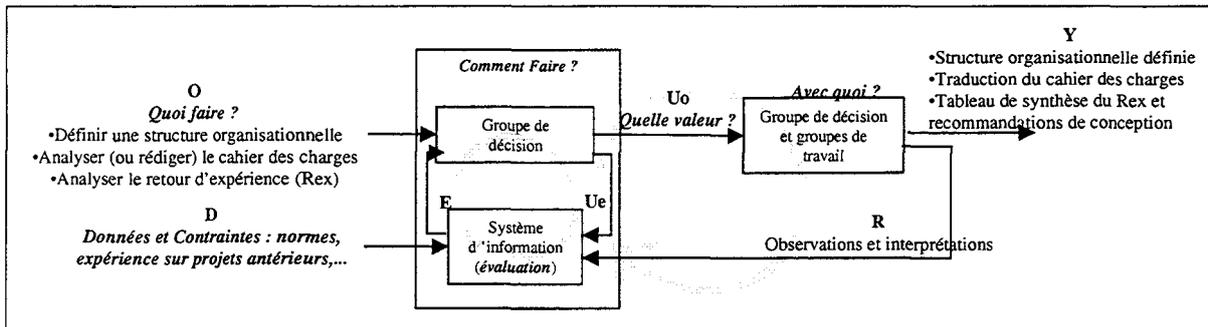


Figure 3.9 : Modèle de pilotage associé à l'initialisation de la conception.

Le groupe de décision fait partie du système opérant de cette étape pour chacune des étapes du processus de conception. Il est assisté par les groupes de travail pour certaines tâches, comme l'analyse du cahier des charges et l'analyse du retour d'expérience.

Nous détaillons ces activités dans la partie suivante.

Choix de la structure

Pour permettre la conception d'un système globalement performant, et dans le contexte d'une conception concourante, tous les corps de métiers doivent être représentés au sein de la structure de projet et ce tout au long du processus de conception. Il existe plusieurs types de structures de projet dont deux apparaissent adaptées à un projet de conception de systèmes complexes : la structure commando et la structure matricielle [Joly et Muller-94]. Ces deux structures permettent de regrouper l'ensemble des personnes intervenant au cours de la conception, représentant, à différents niveaux, tous les domaines liés à la conception (études, méthodes, fabrication, soutien logistique, achats, commercial...).

Au sein de la structure choisie, un groupe de décision et les groupes de travail, acteurs du projet de conception doivent être mis en place.

Le groupe de décision comprend le chef de projet, responsable de la conception du produit, les responsables de chacun des groupes de travail, ainsi qu'un représentant de la production, et un représentant de l'exploitation (soutien logistique et utilisation). Ce groupe de décision est chargé de garantir la cohérence de la conception du système tout au long du processus de conception. Il assure également la réalisation de certaines activités, comme nous le montrons par la suite.

Chaque groupe de travail est dirigé par un responsable de groupe, correspond à une fonction du produit et comporte, si possible, un représentant de chacun des métiers de la conception impliqués dans la fonction. Ils réalisent les études de conception relatives à chaque fonction.

Dans les paragraphes suivants, nous présentons la mise en œuvre du niveau 1 de représentation du modèle de produit correspondant à l'analyse du cahier des charges.

Analyse du cahier des charges

Concernant le cahier des charges, nous distinguons plusieurs cas. Dans le cas de la conception d'un produit de grande série, c'est en général le concepteur qui rédige le cahier des charges correspondant à un besoin non formulé explicitement des utilisateurs (par exemple, voiture, appareils électroménagers...). Dans ce cas, un cahier des charges fonctionnel est généralement établi. Dans le cas d'un produit complexe (par exemple, avion, train...), le cahier des charges est essentiellement rédigé par l'utilisateur. Ce cahier des charges peut être purement descriptif, fonctionnel, voire organico-fonctionnel. L'étape d'initialisation de la conception consiste alors à analyser ce cahier des charges.

Cette analyse (ou rédaction) est réalisée de façon à dégager a priori les grandes fonctions principales du produit à concevoir. Par exemple pour un système de transport ferroviaire, ces fonctions principales peuvent correspondre par exemple au freinage, à la climatisation... Cette décomposition en grandes fonctions permet de proposer une structure pour l'analyse du retour d'expérience, comme nous le verrons par la suite. Le pilotage de l'analyse du cahier des charges permet d'identifier plusieurs traductions possibles du besoin du client, et de choisir la traduction retenue. Ainsi dès le début de la conception, le produit à concevoir est cerné sans ambiguïté par l'ensemble des acteurs de la conception. Le besoin du client est exprimé alors sous la forme de fonctions et de contraintes liées à l'exploitation, au soutien et au coût global du futur système. Ceci correspond à la mise en œuvre du premier niveau du modèle de produit.

Ce niveau de représentation permet donc de formaliser les besoins du client exprimés dans le cahier des charges. Il permet également de vérifier la présence et la cohérence de toutes les informations nécessaires à la conception.

Le modèle de pilotage présenté figure 3.10 représente les activités de mises en œuvre du premier niveau de représentation du modèle de produit.

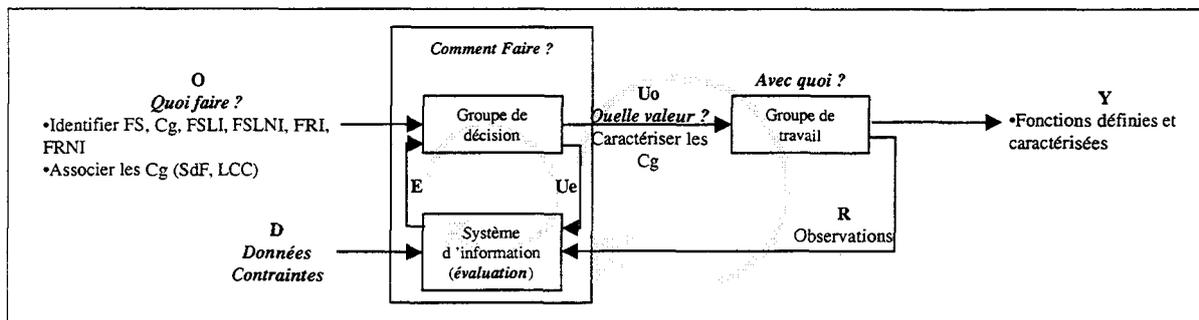


Figure 3.10 : Modèle de pilotage pour le niveau représentation du besoin.

Identification du "Quoi faire ?"

L'objectif du premier niveau de représentation correspond à l'identification et à la définition des fonctions de service et des contraintes globales. Cette opération consiste à déterminer si la fonction de service est principale (issue du cahier des charges) ou redondante (introduite à l'évaluation de la sûreté de fonctionnement de la fonction principale). Elle permet également la définition détaillée des contraintes globales de sûreté de fonctionnement (identification des critères de fiabilité, disponibilité, maintenabilité, sécurité à respecter), et de coût global en fonction de l'enveloppe budgétaire soit allouée par le client, soit évaluée par rapport au marché. Cette étape permet également de distinguer les fonctions et les ressources de soutien dont l'intégration physique est souhaitable, de celles pour lesquelles elle ne l'est pas.

La fonction "Comment faire ?"

Pour répondre à cette question, le groupe de décision identifie les outils à utiliser pour réaliser le "quoi faire ?", c'est à dire l'identification des fonctions et l'association des contraintes globales. Par exemple pour l'identification des fonctions, les outils d'analyse fonctionnelle peuvent être utilisés (méthodes type bête à corne, méthode APTE©...).

Identification de "Quelle valeur ?"

La fonction générique "quelle valeur ?" permet de quantifier les différentes caractéristiques de sûreté de fonctionnement et d'allouer un pourcentage du coût global pour chaque fonction de service, pour les fonctions de soutien et les fonctions ressources intégrables et non intégrables. Ces valeurs peuvent être données de façon explicite ou implicite dans le cahier des charges ou sous la forme d'un objectif global qualitatif que le

système devra tenter d'atteindre. Le tableau 3.1 donne un exemple de caractérisation des fonctions.

| Fonction | Contrainte globale | Caractéristiques | Valeur |
|---------------------------|--------------------------|------------------|-------------------------------------|
| FS1 | Sûreté de fonctionnement | Fiabilité | 1,05 incidents / 10 ⁶ km |
| | | Maintenabilité | Outillage standard |
| | Coût global | | < 5%* |
| FS2 | Sûreté de fonctionnement | Disponibilité | 95% |
| | Coût global | | < 1%* |
| FIASL | Sûreté de fonctionnement | Disponibilité | Maximale |
| | | | Indépendance par rapport au FS |
| | Coût global | | < 4%* |
| FSL5 (Approvisionnements) | Sûreté de fonctionnement | Fiabilité | Zéro retard de livraison |
| CR2 (personnels) | Nombre | | Minimal |
| | Compétence | | Polyvalence |

*< x% : le coût associé à la fonction ne doit pas dépasser x% du coût global.

Tableau 3.1 : Caractérisation des fonctions.

Evaluation

La fonction "Evaluation" est l'étape de validation du niveau. Elle a deux effets différents : d'une part hiérarchiser les fonctions selon les contraintes de sûreté de fonctionnement et de coût à respecter ; d'autre part, elle permet de s'assurer que le système respecte bien les exigences formulées par le client en matière de coût et de sûreté de fonctionnement. Elle permet également d'estimer une première fois la part d'intégration des fonctions de soutien et des fonctions ressources.

Observations

Les observations contiennent les fonctions définies et caractérisées. Elles comportent également des remarques formulées par le groupe de décision relatives à la pertinence de la décomposition. Elles permettent l'évaluation de l'analyse du cahier des charges, c'est à dire la vérification de la cohérence de l'analyse fonctionnelle et de la caractérisation avec le besoin de l'utilisateur.

Le graphe 3.11 suivant représente l'enchaînement des activités de mise en œuvre du premier niveau du modèle de produit global.

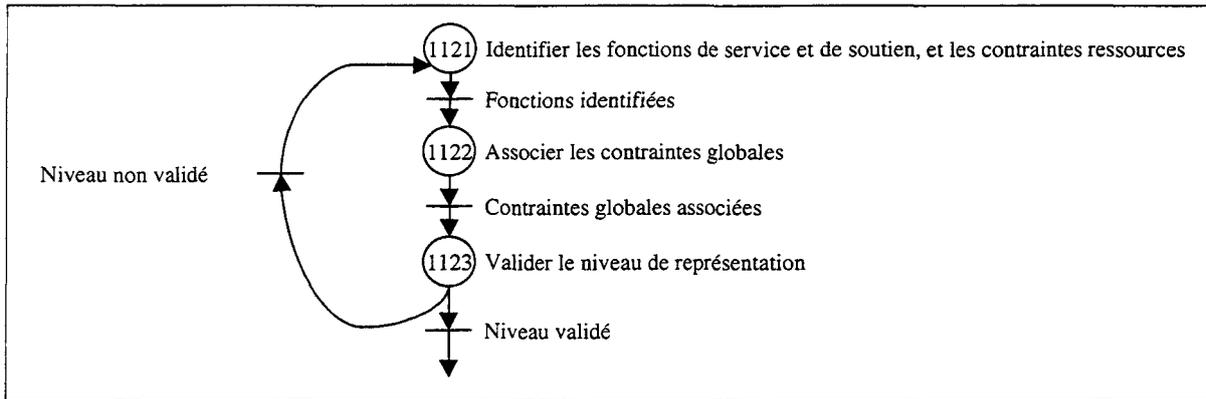


Figure 3.11 : Enchaînement des étapes du niveau 1 de représentation.

Les paragraphes suivants contiennent la description de l'étape d'analyse du retour d'expérience, troisième étape de l'initialisation de la conception (cf. figure 3.5).

Analyse du retour d'expérience

Dans un deuxième temps, le groupe de décision identifie les projets antérieurs réalisés par l'entreprise, similaires au projet en cours et qui peuvent apporter des informations utiles. Une fois les projets antérieurs identifiés, nous proposons de répartir les réunions de travail par grandes fonctions du système. Le principe de l'analyse du retour d'expérience consiste à réaliser pour chacune des grandes fonctions un recueil des informations pertinentes sur des projets ou des fonctions antérieurs similaires. Nous proposons la démarche suivante qui s'inspire des méthodes existantes.

Pour chacune de ces fonctions, le groupe de décision accueille les fournisseurs potentiels associés à cette fonction, les représentants du Service Après Vente de l'entreprise, du soutien logistique, de la maintenance de la fonction pendant l'exploitation. La cellule ainsi composée peut mener une analyse du retour d'expérience structurée. Nous proposons que les remarques et toutes les informations recueillies issues de cette analyse soient établies relativement aux critères liés à la conception et à l'utilisation du système (fiabilité, maintenabilité, disponibilité, sécurité) ainsi qu'au coût global du système et consignées dans un tableau comportant ces rubriques (tableau 3.2).

| Projet X : fonction freinage | | | | | | |
|------------------------------|-----------------------|----------------|---------------|----------|-------------|-------------------------------|
| Document source | Remarques relatives à | | | | | Recommandations de conception |
| | Fiabilité | Maintenabilité | Disponibilité | Sécurité | Coût global | |
| | | | | | | |

Tableau 3.2 : Tableau d'analyse du retour d'expérience.

Ces informations sont qualitatives. Elles permettent d'identifier les problèmes ou les "bonnes situations" rencontrés en précisant la phase du cycle de vie du système impliquée et d'en déduire des recommandations de conception. Par exemple, si un panneau de commande sur un système de transport tombe fréquemment parce qu'il est mal vissé, cela met en cause la fiabilité (voire la sécurité) du système et le problème est dû soit à une erreur de conception (vis trop courte, ou mauvais couple de serrage préconisé, etc.) soit à une erreur en production (serrage mal réalisé). Il faut alors penser lors de la conception d'un nouveau produit, à préconiser un couple de serrage pour les vis, ou à envisager un autre mode de fixation...

Le schéma de la figure 3.12 ci-dessous représente l'enchaînement des étapes de l'analyse du retour d'expérience.

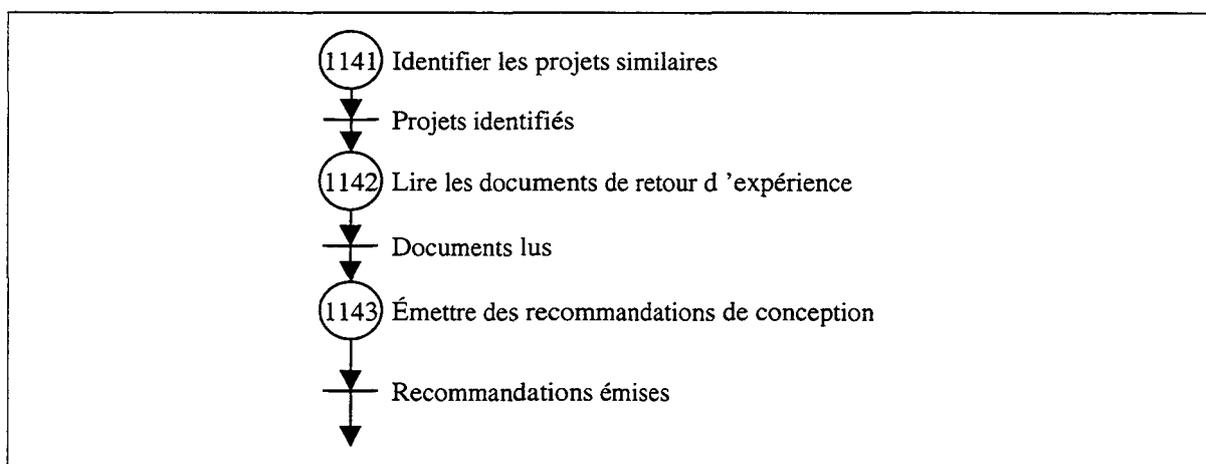


Figure 3.12 : Enchaînement des étapes de l'analyse du retour d'expérience.

Lorsque le cahier des charges est analysé et le retour d'expérience analysé, la phase d'initialisation de la conception est validée avant que la conception ne soit lancée. Le pilotage de cette phase d'initialisation permet donc par décisions successives d'aboutir à une traduction du cahier des charges commune à tous les acteurs de la conception par l'utilisation du premier niveau de représentation du modèle de produit et à une analyse du retour d'expérience contenant des informations potentiellement utiles à tous. Cette validation réalisée, la conception peut être lancée.

II.3.1.2 Lancement de la conception

Le lancement de la conception constitue la dernière phase du cadrage de la conception. Cette phase consiste à lancer la conception du produit proprement dite. Pour cela, le groupe de décision cherche à établir une répartition des charges et à valider un planning de réalisation de la conception du produit. Cette phase peut être représentée par le modèle de pilotage suivant (figure 3.13).

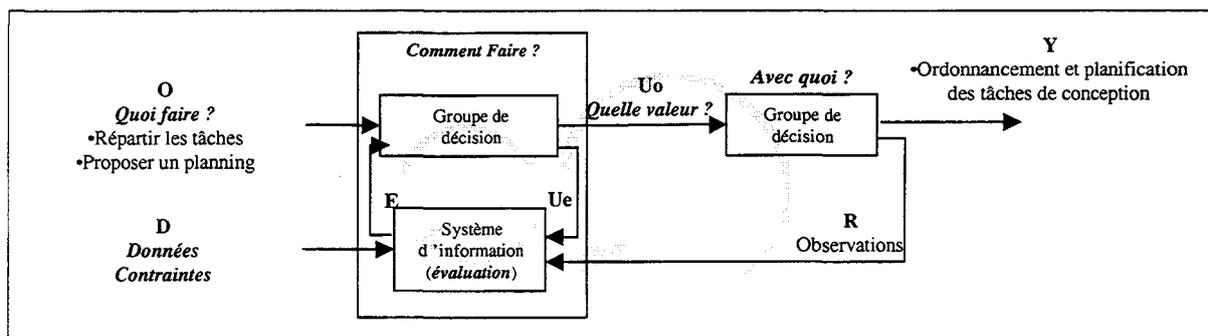


Figure 3.13 : Modèle de pilotage de la phase de lancement de la conception.

Au cours de cette phase, le groupe de décision pilote la répartition des tâches afin d'obtenir la répartition la plus adaptée aux contraintes du projet. Les tâches sont réparties dans les groupes de travail, et chaque responsable d'une tâche établit avec son équipe les plannings et les organigrammes des tâches spécifiques. Ceux-ci sont consolidés au niveau du groupe de décision. Le pilotage intervient donc à deux niveaux différents : en premier lieu au sein de chaque groupe de travail, et en second lieu au sein du groupe de décision.

Le lancement de la conception correspond au début de la conception effective du système, qu'il advient de mener de façon à ce que celui-ci soit globalement performant. Le schéma suivant (figure 3.14) représente l'enchaînement des activités du lancement de la conception.

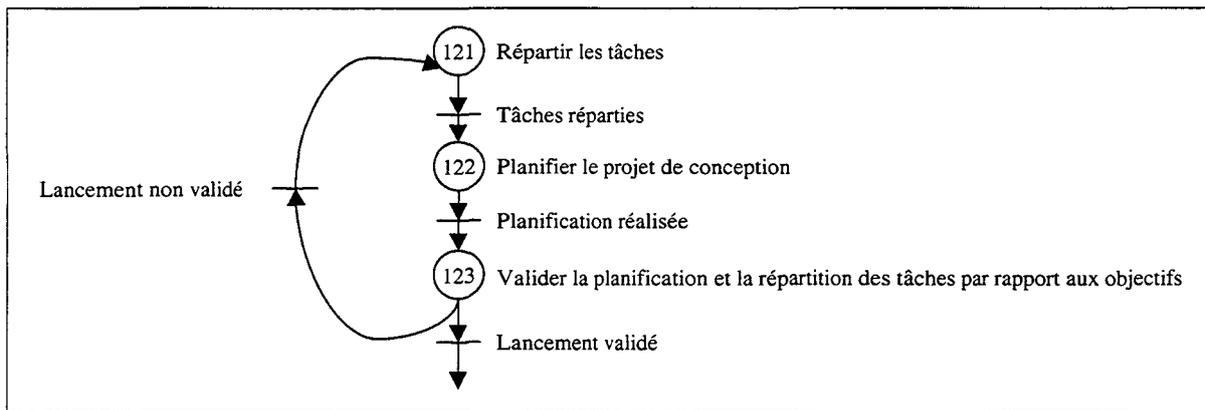


Figure 3.14 : Enchaînement des activités du lancement de la conception.

II.3.2. Piloter la conception

Le pilotage de la conception correspond à la mise en œuvre des quatre derniers niveaux de représentation du modèle de produit menant à la conception définitive du produit. L'ensemble des modèles et outils pour concevoir le système doit être cohérent de façon à garantir que le système sera performant globalement. Le pilotage de cette phase de la conception est réalisé par le groupe de décision (figure 3.15).

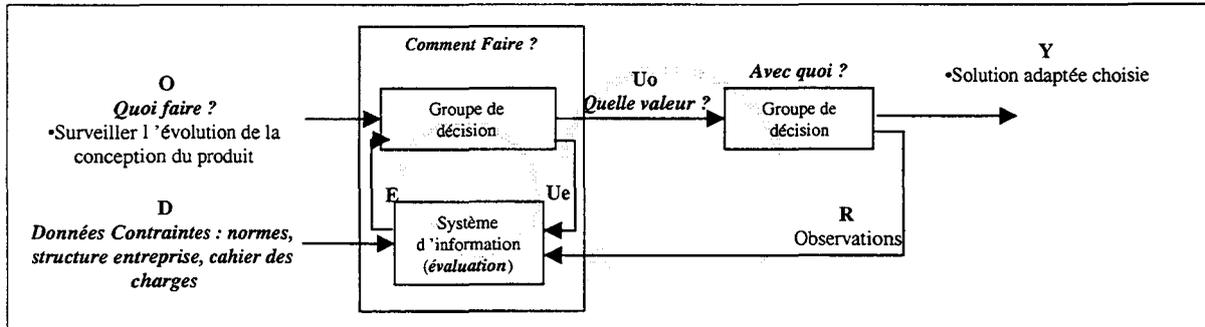


Figure 3.15 : Modèle de pilotage de la conception du produit.

Identification du "quoi faire ?"

L'objectif du groupe de décision est de maîtriser l'évolution de la conception du produit. Le groupe de décision est donc également le système opérant.

La fonction générique "quelle valeur ?" n'est pas précisée sur la figure 3.15, car elle contient un ensemble de commandes différentes, spécifiques à chacun des niveaux de représentation du modèle de produit mis en œuvre.

Observations

Les observations sont différentes à chacun des niveaux que nous décrivons dans les paragraphes suivants.

Au cours de la phase de conception, et suivant le planning établi, les groupes de travail traitent en parallèle les différentes tâches qui leur ont été assignées. Le groupe de décision est chargé de coordonner et de synchroniser le travail des différents groupes (figure 3.16) et en vérifie la cohérence avec les objectifs de l'entreprise et le cahier des charges de l'utilisateur. En effet la performance locale de chacune des fonctions n'entraîne pas obligatoirement la performance globale du produit. Pour cela le groupe de décision se réunit à intervalles réguliers, dont l'objectif est la capitalisation et la mise en commun des résultats des travaux et leur validation progressive.

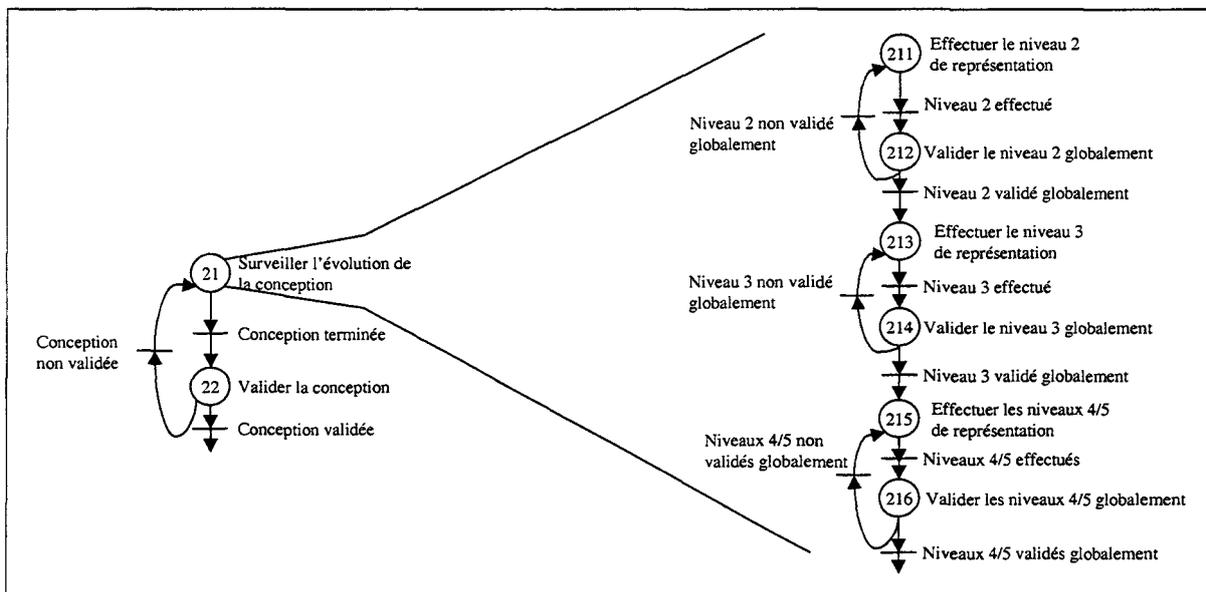


Figure 3.16 : Activités de l'étape de pilotage de la conception.

La prise en compte en phase de conception des éléments du soutien logistique dans le modèle de produit, en particulier la prise en compte de la maintenance future du produit, nous conduit à intégrer au processus de conception des notions liées aux méthodes mises en œuvre pour l'élaboration de la maintenance. Les méthodes de stratégie de maintenance sont normalement utilisées au début ou durant la phase d'utilisation du produit. Elles ne sont donc pas adaptées à une mise en œuvre en phase de conception.

Cependant la méthode de maintenance nommée "Maintenance Basée sur la Fiabilité" (RCM, Reliability Centred Maintenance, voir annexe), fait référence à la conception s'il n'y a pas possibilité d'élaborer un plan de maintenance satisfaisant [Moubray-91][Zwingelstein-96]. Cette méthode ne permet pas de définir la totalité du

plan de maintenance mais uniquement la partie maintenance préventive, d'en définir les tâches "juste nécessaires", de les justifier et d'en déterminer la périodicité. Elle ne permet donc pas de définir l'ensemble des éléments du soutien logistique nécessaires à la mise en place du plan de maintenance défini. Cette méthode repose sur des principes de bon sens :

- une approche systémique du produit,
- la justification des décisions prises avec la mise en place d'une traçabilité,
- l'application d'une logique de sélection des tâches de maintenance (de la plus légère à la plus lourde).

La méthode comporte trois phases importantes :

- une analyse fonctionnelle détaillée,
- une analyse dysfonctionnelle du type AMDEC (voir annexes),
- la sélection de tâches de maintenance.

Certains de ces critères sont applicables en conception, notamment l'approche systémique et la justification des décisions prises. De même, l'analyse fonctionnelle et l'analyse dysfonctionnelle sont réalisables en conception. Même s'il n'est pas possible de réaliser une AMDEC en phase de conception (le produit n'étant pas totalement conçu), le principe est applicable.

Dans les paragraphes suivants, nous proposons d'intégrer les principes de la méthodologie RCM à la mise en œuvre des niveaux 2 à 5 du modèle de produit global.

II.3.2.1 Niveau 2 : représentation des exigences fonctionnelles

Le niveau de représentation des exigences fonctionnelles du besoin (niveau 2) correspond à une analyse fonctionnelle détaillée et vise à déterminer comment les fonctions de service, les fonctions de soutien et les contraintes ressources sont réalisées. Après cette analyse fonctionnelle détaillée, il nécessite la mise en œuvre de deux activités : l'allocation des caractéristiques de sûreté de fonctionnement et de coût et l'analyse dysfonctionnelle du produit.

Analyse fonctionnelle détaillée

Le modèle de pilotage associé au niveau de représentation des exigences fonctionnelles est le suivant (figure 3.17) :

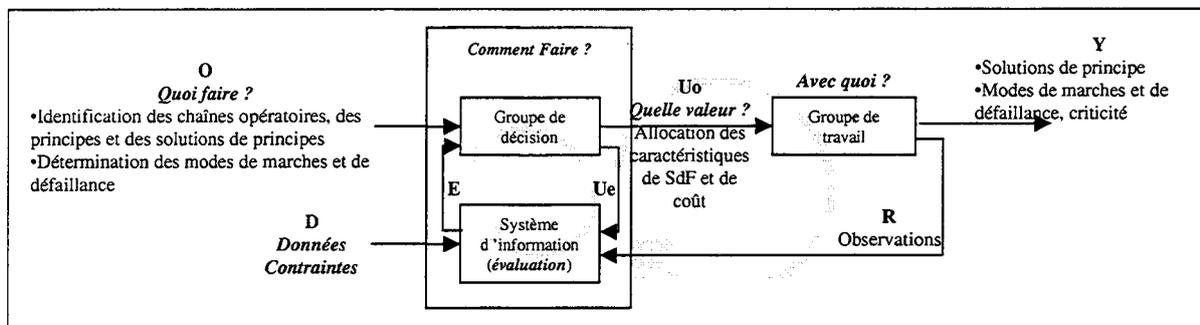


Figure 3.17 : Modèle d'élaboration des concepts du niveau Représentation des exigences fonctionnelles.

Identification du "quoi faire ?"

Les objectifs de ce niveau ("quoi faire ?") sont de définir les chaînes opératoires répondant aux fonctions de service identifiées au niveau précédent et aux fonctions de soutien intégrables et non intégrables et aux fonctions ressources intégrables, d'y associer un principe opératoire et de déterminer des solutions de principes. Il s'agit également de déterminer les modes de marches et les modes de défaillance de ces chaînes opératoires.

La fonction "comment faire ?"

Le "comment faire ?" correspond à l'utilisation d'outils pour la description globale du fonctionnement du produit en chaînes opératoires. Pour déterminer les modes de marches, un GEMMA est réalisé. Pour les modes de défaillance, une analyse dysfonctionnelle est réalisée telle que nous la décrivons ci-dessous.

Identification du "quelle valeur ?"

La fonction "quelle valeur ?" correspond à l'allocation des caractéristiques de sûreté de fonctionnement et de coût aux fonctions composant les chaînes opératoires ce qui permet la répartition des exigences du client en termes de performance physique et économique. Cette fonction constitue également une première quantification estimée des ressources non intégrables. Pour réaliser cette opération, les personnes du groupe de travail se basent sur l'expérience des projets antérieurs, et réalisent leurs estimations en fonction de la politique du client en termes de maintenance et d'exploitation. Par exemple pour la fonction ressource "plan de maintenance", la détermination des modes de marche

et d'arrêt doit permettre de repérer les fonctions qui nécessiteront une maintenance particulière. Nous détaillons cet aspect dans les paragraphes suivants.

Le réseau de Petri figure 3.18 représente l'enchaînement des activités du niveau de représentation des exigences fonctionnelles.

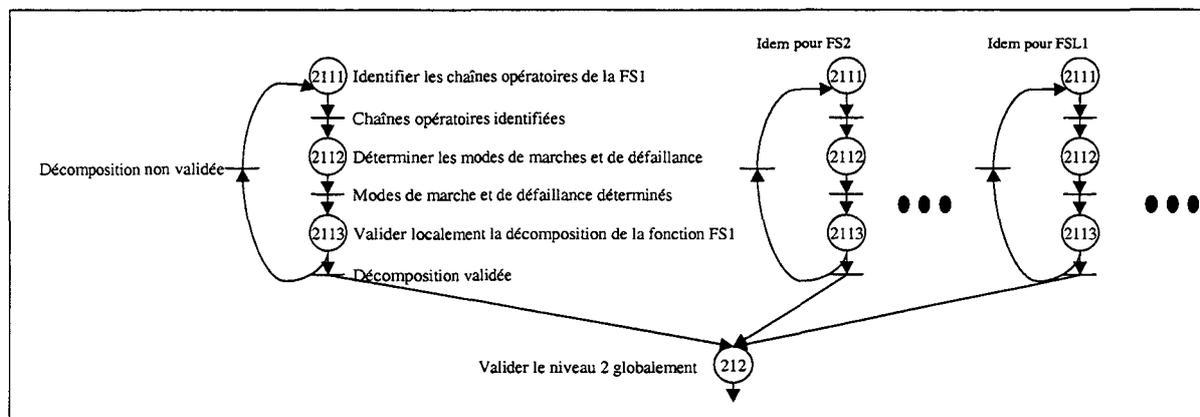


Figure 3.18 : Activités du niveau de représentation des exigences fonctionnelles.

Les mêmes opérations sont effectuées pour chacune des décompositions des fonctions de service, des fonctions de soutien intégrables et des fonctions ressources intégrables. La validation globale a pour objectif de permettre la poursuite de la conception en s'appuyant sur des informations fiabilisées et stables qui ne seront plus modifiées par la suite. Cependant, dans un contexte réel, la validation n'a pas lieu simultanément pour chacune des fonctions de service et de soutien. On peut envisager que l'étape de validation globale permette la poursuite de la conception détaillée des fonctions avant que toutes ne soient validées, à condition qu'une vérification ait été réalisée par rapport aux objectifs globaux du produit et ce afin de ne pas bloquer le processus de conception.

A ce niveau, pour [Grudzien-99], une approche de la conception pour la maintenance consiste à allouer aux différentes fonctions opératoires de la chaîne opératoire associée à une fonction de service des valeurs a priori, dans l'objectif de respecter la contrainte globale au niveau de la fonction de service. Cette méthode d'allocation a priori peut aussi être utilisée pour la contrainte coût global. Il considère une seconde approche qui consiste à rechercher comment les objectifs définis par le client peuvent être atteints et quelles alternatives peuvent être mises en œuvre. Cela correspond à l'instanciation des concepts "mode de défaillance fonctionnelle" et "mode de marche" du modèle de produit.

En termes de soutien logistique, l'allocation des objectifs de sûreté de fonctionnement peut être pratiquée de la même façon sur les fonctions de soutien et les fonctions ressources intégrables que sur les fonctions de service. Il faut cependant noter que le référentiel peut être modifié selon que les fonctions sont intégrables ou non. En effet les caractéristiques de sûreté de fonctionnement intrinsèques au produit global ne seront pas forcément identiques à celles du système principal, les missions étant différentes.

Allocations des caractéristiques de Sûreté de Fonctionnement et de coût

A ce premier niveau de modélisation, une première allocation des performances physiques du produit aux différentes fonctions opératoires est réalisée. Cette allocation consiste à traduire les exigences globales en termes de performance physique en exigences pour chaque chaîne opératoire. Cette procédure utilise l'outil de bloc diagramme de fiabilité (voir annexe) pour réaliser une allocation cohérente correspondant aux besoins du client.

Une deuxième allocation consiste à estimer la part de chaque chaîne opératoire sur le coût global du système. A ce niveau les informations concernant les coûts en général sont difficiles à connaître. Une analyse du retour d'expérience et l'utilisation de méthodes analytiques permet une estimation réaliste. Si ce n'est pas possible, les intervenants du groupe de travail peuvent estimer le coût relatif aux chaînes opératoires de façon intuitive sur une échelle de valeur. Ainsi ils se donnent les moyens de garder à l'esprit la contrainte de performance économique du produit.

La deuxième étape de ce niveau consiste à déterminer les modes de défaillance fonctionnelle du système global. C'est ce que nous décrivons dans le paragraphe suivant.

Analyse dysfonctionnelle

Cette analyse doit permettre de modéliser les dysfonctionnements du produit. Pour cela, nous proposons de mener une étude du type AMDEC. Cette étude ne peut répondre à la norme AMDEC car nous ne connaissons pas les composants du système. Mais nous pouvons réaliser une étude dysfonctionnelle visant à déterminer les effets sur le système global du dysfonctionnement d'une chaîne opératoire complète.

Cette étude nécessite tout d'abord de déterminer les effets gênant le fonctionnement du produit. Par exemple, pour un système de transport ferroviaire, les effets peuvent être : retard de moins de 5 minutes, retrait en fin de service commercial...

Nous associons aux fonctions opératoires de niveau le plus haut, les cinq dysfonctionnements suivants :

- pas de fonction,
- plus de fonction,
- fonction dégradée,
- fonction intempestive,
- Non-arrêt de la fonction.

Puis nous identifions les effets sur le produit de ces dysfonctionnements pour chaque chaîne opératoire. L'analyse dysfonctionnelle doit également permettre d'estimer la criticité des dysfonctionnements en fonction de leurs effets et de leur fréquence d'occurrence. Pour cela, nous proposons de remplir un tableau du type du tableau 3.3. La première colonne contient les fréquences d'occurrence des dysfonctionnements. Les valeurs données aux critères approximatifs sont à décider par le groupe de décision en fonction du profil d'emploi du produit à concevoir. La dernière ligne du tableau contient les effets, par ordre croissant de leur gravité. Les criticités sont alors déterminées. Dans certains cas, il faut avoir recours à l'avis d'expert ou au moins à l'avis des acteurs de la conception pour décider de la criticité d'un dysfonctionnement. Les fréquences indiquées dans l'exemple ci-dessous sont indicatives. Elles sont déterminées lors de l'utilisation de la grille par un calcul qui est fonction de la fiabilité demandée sur les fonctions considérées.

La criticité ainsi déterminée met en évidence des fonctions pour lesquelles une attention particulière doit être portée lors de la conception. Il peut exister plusieurs raisons à cette criticité. Par exemple, nous pouvons citer les suivantes : la fiabilité actuelle des unités maintenables réutilisées sur le nouveau système ne permet pas d'atteindre l'objectif de fiabilité demandé dans le cadre de ce nouveau projet ; le profil de mission demande une architecture non envisagée sur les projets précédents et remettant en cause un certain nombre de faits que l'on croyait acquis.

| | | | | | |
|-------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Très fréquent (1-2 mois) | Avis d'expert | Critique | Critique | Critique | Critique |
| Fréquent (1-2 ans) | Non critique | Avis d'expert | Critique | Critique | Critique |
| Peu fréquent (5 ans) | Non critique | Avis d'expert | Avis d'expert | Critique | Critique |
| Rare (10 ans) | Non critique | Non critique | Non critique | Avis d'expert | Critique |
| | Effet 1 | Effet 2 | Effet 3 | Effet 4 | Effet 5 |

Tableau 3.3 : Tableau de criticité des dysfonctionnements.

Les informations concernant les dysfonctionnements sont classées dans un tableau (3.4) précisant :

- le nom de la chaîne opératoire étudiée,
- le mode de défaillance étudié,
- l'évidence du mode de défaillance,
- l'effet sur le produit,
- la gravité,
- le composant ou groupe de composant maintenable en cause,
- la fréquence d'occurrence de la défaillance,
- la réponse à la question : "la fréquence est-elle déterminée alors qu'une maintenance préventive est mise en place ?",
- la criticité des modes de défaillance,
- des observations.

| Fonction opératoire | Mode de défaillance | Evidence du mode de défaillance | Effet sur le produit | Gravité | Unité maintenable en cause | Fréquence | Avec ou sans maintenance préventive (MP) | Criticité | Observations |
|---------------------|---------------------|---------------------------------|----------------------|---------|----------------------------|-----------|--|-----------|--------------|
| | | | | | | | | | |

Tableau 3.4 : Tableau d'analyse dysfonctionnelle.

Ce tableau sert à déterminer les fonctions (de services et de soutien) critiques qui peuvent être mises en causes dans la non-atteinte des objectifs de coût et de sûreté de fonctionnement spécifiés par le client. Pour ces fonctions, des recommandations précises de conception doivent être émises. La conception doit y être attentive, et justifier comment elle les prend en compte dans la suite de la définition du produit. On doit retrouver dans ce tableau une partie des éléments mis en évidence par l'analyse du retour d'expérience.

A l'issue de ce niveau de représentation, la décision d'intégration des fonctions et ressources du soutien intégrables, doit être prise. L'allocation des caractéristiques de sûreté de fonctionnement et de coût doit permettre de déterminer la pertinence de cette intégration. L'utilisation de la boucle de pilotage pour un processus essai – erreur peut

être opérée afin de déterminer la part d'intégration la plus pertinente vis à vis des objectifs de performance globale.

II.3.2.2 Niveau 3 : représentation technologique

Le niveau 3 consiste à déterminer la structure technologique du système à concevoir, c'est à dire à définir les différentes technologies à mettre en œuvre afin de répondre au besoin du client.

A chacun des groupes de travail correspond un schéma de pilotage distinct. Mais le groupe de décision effectue un contrôle permanent sur ces groupes pour assurer la cohérence du produit et des études menées. Ainsi les activités dédiées aux différents métiers sont menées en parallèle, et la boucle d'évaluation supérieure permet de vérifier leur cohérence les unes par rapport aux autres (figure 3.19).

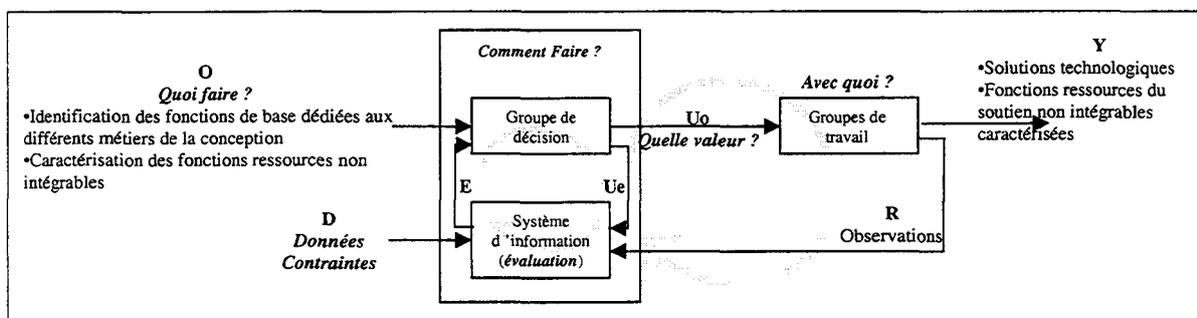


Figure 3.19 : Modèle de pilotage du niveau de représentation technologique.

Ce schéma s'instancie pour chacun des métiers de la conception et pour chaque chaîne opératoire (cf. figure 3.20).

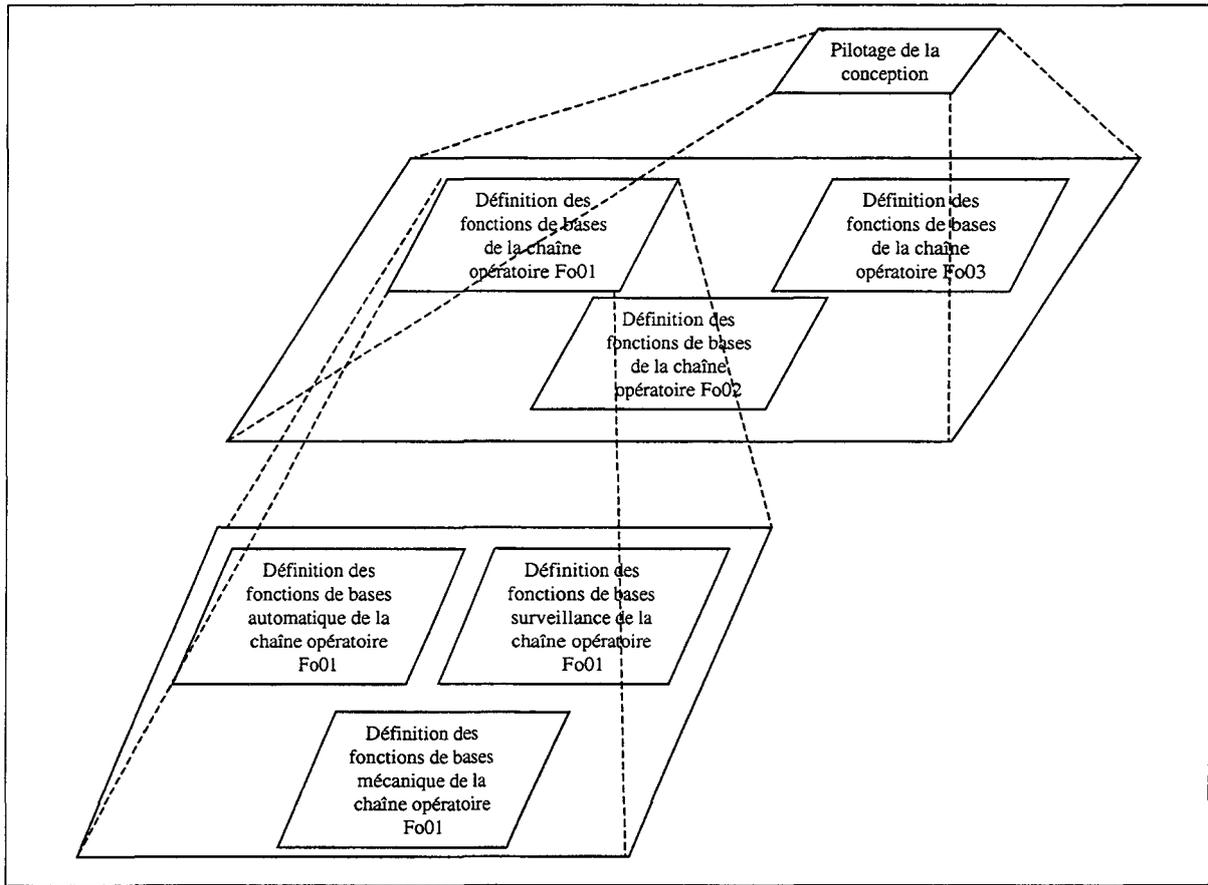


Figure 3.20 : Représentation de la coordination des activités du niveau 3.

Le modèle de pilotage se décompose de la même façon selon les différents métiers de la conception. C'est à dire que l'on peut représenter une boucle de pilotage pour les activités des automaticiens, une autre pour les activités des électriciens, une pour les mainteniciens... Toutes ces boucles sont similaires mais manipulent des entités différentes relatives à chaque métier. Les activités consistent à identifier les fonctions de base et les fonctions de base du soutien dédiées à ces différents métiers.

Plus particulièrement, [Jacquet-98] a défini les activités de l'automaticien que l'on peut représenter selon le schéma suivant (figure 3.21) :

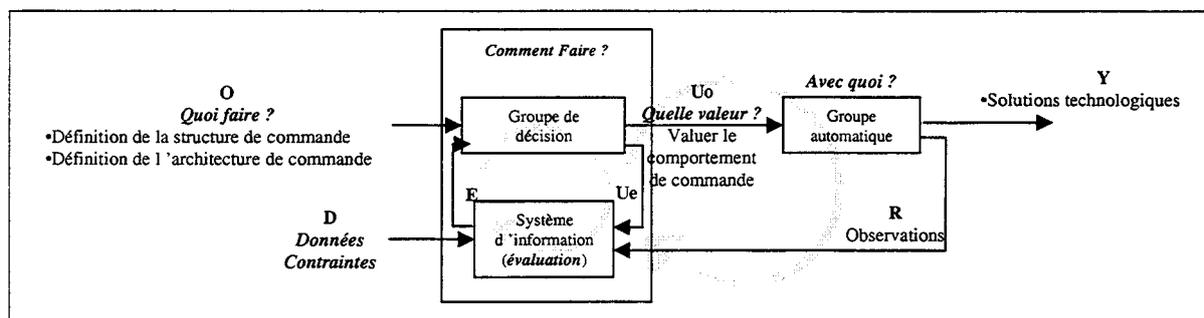


Figure 3.21 : Modèle de pilotage du niveau de représentation technologique automatique.

Dans [Grudzien-99], les activités du maintenicien concernent uniquement la définition de l'architecture de surveillance. Pour la réaliser, il propose de définir des procédures de surveillance et de proposer des actions de maintenance complémentaires dans le cas où la conception ne permettrait pas d'atteindre les performances souhaitées par le client. Cette architecture de surveillance correspond à l'intégration de la seule fonction ressource *FRI* = *équipements de tests et de soutien*. Nous proposons d'ajouter à ces activités la caractérisation des fonctions ressources non intégrables et la définition des fonctions de base du soutien non intégrables (figure 3.22) :

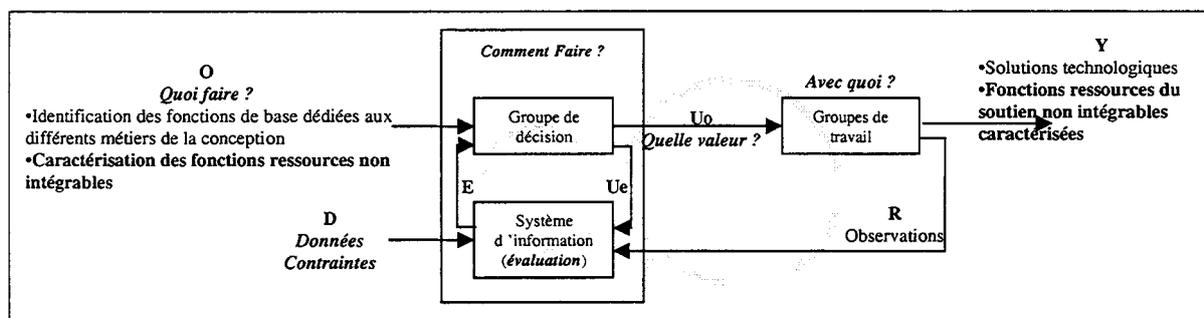


Figure 3.22 : Modèle de pilotage du niveau de représentation technologique maintenance.

Pour caractériser les fonctions ressources non intégrables, il est possible, par exemple, de mettre en œuvre des outils tels que les outils d'implantation industrielle pour la définition des infrastructures nécessaires à l'exploitation et au soutien du système.

L'évaluation doit permettre de vérifier la cohérence des actions menées avec les objectifs de performance et de figer les décisions prises à ce niveau.

Ces activités d'identification des solutions technologiques sur chacune des chaînes opératoires identifiées au niveau précédent et l'identification des fonctions de base du soutien non intégrables sont réalisées en parallèle. La caractérisation des fonctions ressources non intégrables en découle (figure 3.23).

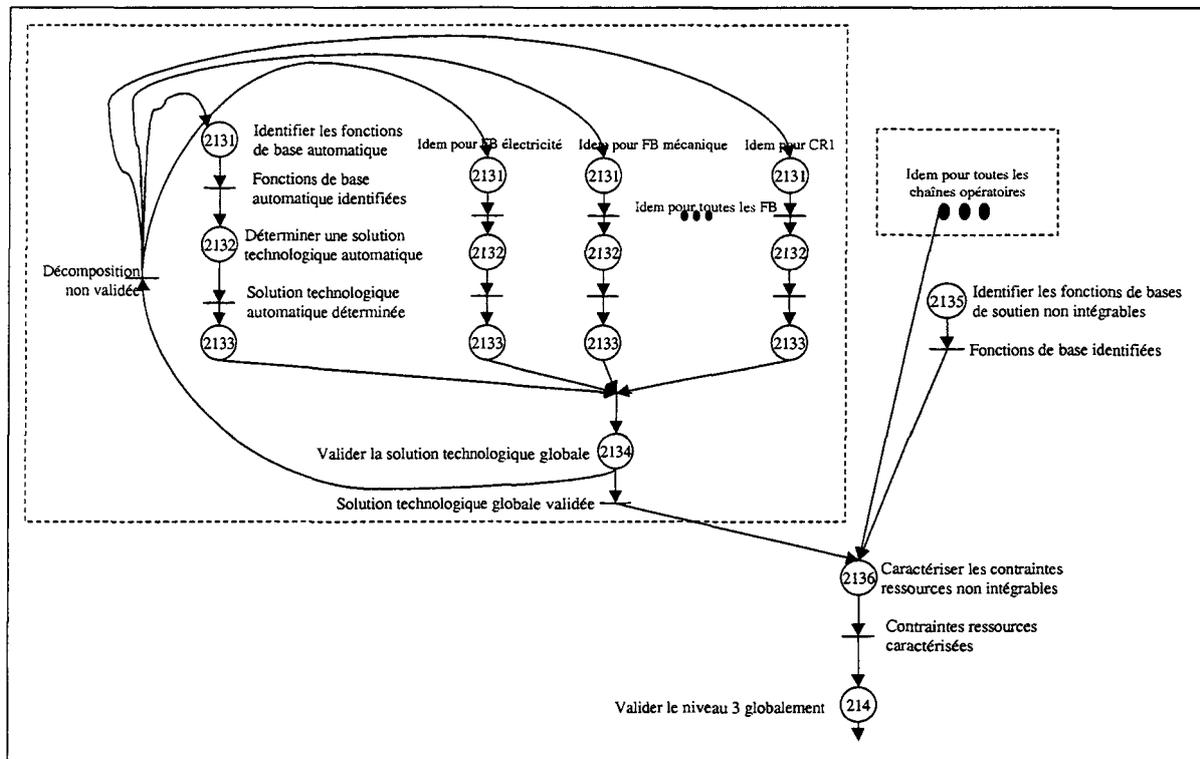


Figure 3.23 : Enchaînement des activités du niveau de représentation technologique.

A l'issue du niveau 3 de représentation, le processus met en œuvre les niveaux 4 et 5 de représentation du modèle de produit.

II.3.2.3 Niveaux 4 et 5 : représentations technique et détaillée

Dans le cadre de notre proposition, notre contribution se situe particulièrement sur les trois premiers niveaux de représentation. Nous proposons pour les niveaux 4 et 5 de représentations technique et détaillée un seul modèle de pilotage. Le niveau de représentation technique a pour objectif de définir la structure matérielle du produit. Les différents corps de métiers vont préciser leurs solutions en associant aux fonctions de base, des composants matériels. Le niveau de représentation détaillée a pour objectif de préciser les caractéristiques des différents composants constituant la structure technique ainsi que la façon de coder les connaissances sur le produit. Le modèle de pilotage associé à ces niveaux est donc le suivant (figure 3.24) :

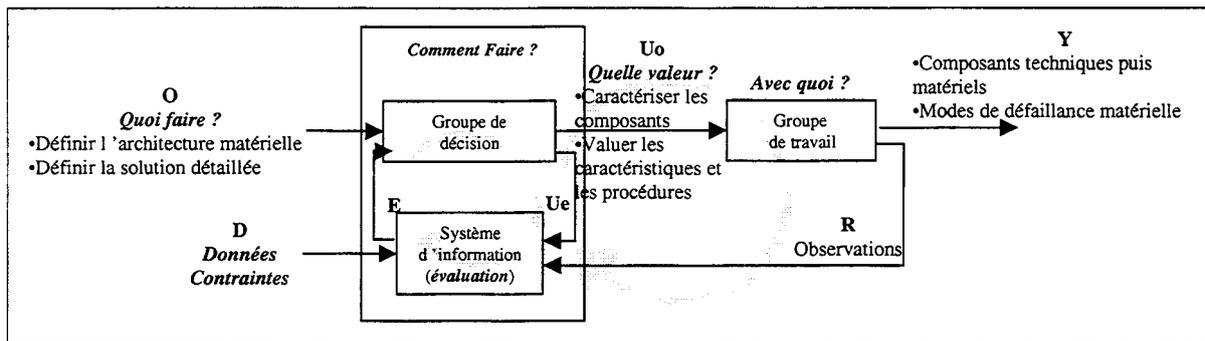


Figure 3.24 : Modèle de pilotage du niveau de représentation technique.

Identification du "Quoi faire ?"

L'identification du "quoi faire ?" consiste à définir l'architecture matérielle correspondant à chaque fonction de base et fonction de base du soutien. Puis au fur et à mesure, il faut associer des composants matériels qu'il faut caractériser.

La fonction "Comment faire ?"

Pour cela le "comment faire ?" consiste à réaliser en premier lieu une Analyse des Modes de Défaillance Matérielle sur les composants techniques, de valider les solutions choisies et si nécessaire d'en déduire les fonctions et ressources du soutien à mettre en œuvre pour permettre d'atteindre la performance globale demandée. En second lieu la description détaillée du produit consiste, d'une part, en le codage des composants et d'autre part, en le codage des fonctions ressources non intégrables du soutien. Le codage des composants doit permettre la gestion de configuration du système d'une part, mais aussi la gestion des faits techniques d'autres part. Ceci peut être réalisé par exemple par la partie intégrée de la fonction ressource $FR_1 = \text{équipements de test et de soutien}$.

Le graphe 3.25 ci-dessous représente l'enchaînement des activités des niveaux de représentation technique et détaillée.

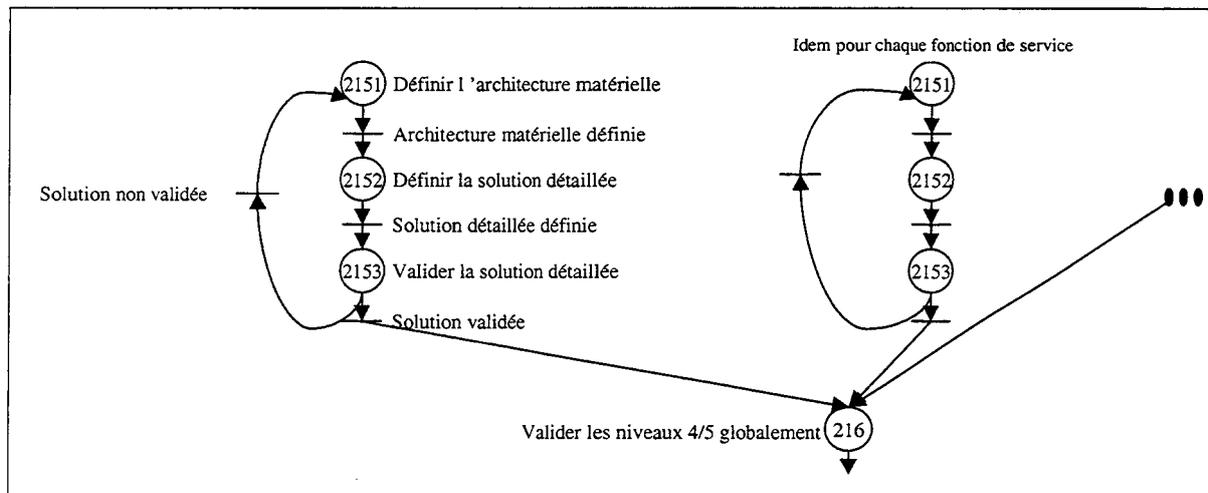


Figure 3.25 : Enchaînement des activités des niveaux de représentation technique et détaillée.

La partie du processus de conception comportant les trois derniers niveaux de représentation du modèle de produit global, se répète tout au long de la phase de conception jusqu'à l'obtention d'une solution détaillée du produit satisfaisant au mieux les critères et représentative de la performance globale souhaitée. Cette solution validée, il faut alors conclure la conception.

II.3.3. La conclusion de la conception

La conclusion de la conception constitue la dernière phase de la conception avant la mise en production du produit. La solution choisie à l'issue de la conception a été élaborée par le processus décrit au paragraphe précédent. La mise en œuvre du pilotage a permis qu'elle soit la plus adaptée possible au besoin du client.

L'objectif de l'étape de conclusion de la conception est donc de réaliser un bilan. Ce bilan vient alimenter le système d'information et le retour d'expérience.

Les informations ainsi capitalisées seront réutilisables dans le cadre de projets ultérieurs. Dans le cadre de notre contribution, nous proposons de collecter des informations liées à la fois à la performance globale du système (performance physique, performance économique) et au déroulement de la conception. Ce bilan réalisé doit permettre de mettre en évidence les points positifs et négatifs relatifs aux activités de conception concernant le choix de structure d'organisation, la répartition des tâches et le planning de façon à vérifier que les engagements pris à la suite des concertations de la phase de cadrage ont été respectés par les différents acteurs de la conception.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons tout d'abord décrit le méta-modèle d'élaboration des concepts utilisés dans [Jacquet-98] et [Grudzien-99] pour décrire le processus de conception. Puis, nous avons décrit les spécifications d'un processus de conception. Nous avons défini ces spécifications en référence aux trois axes de la performance globale du produit défini dans le chapitre I.

Enfin, dans la deuxième partie, nous avons en premier lieu défini la notion de pilotage. Puis nous avons mis en évidence le lien existant entre le processus de conception d'un produit et le management d'un projet. Enfin nous avons développé notre proposition d'un processus de conception contribuant à la recherche de la performance globale du produit à concevoir et utilisant le modèle de produit global décrit au second chapitre. Dans le cadre de ces deux parties, notre description s'appuie sur un modèle de pilotage qui permet de mettre en évidence les activités du système opérant d'une part et les activités du système de décision d'autre part.

Dans le chapitre suivant, nous présentons l'application de nos propositions dans le cadre d'une étude de cas réalisée dans un milieu industriel.

Chapitre IV.
Application et validation

Introduction

L'application que nous décrivons dans ce chapitre, a pour objectif d'une part d'illustrer notre proposition par un exemple réel issu d'un contexte industriel, et d'autre part de valider un certain nombre des propositions faites dans les chapitres précédents.

Dans cet objectif, nous présentons dans une première partie l'exemple complet d'application que nous avons développé sur une partie du système de freinage d'un système de transport ferroviaire au sein de l'entreprise Alstom Transport SA, Unité de Valenciennes.

Dans une seconde partie, nous décrivons les éléments qui ont fait l'objet d'une validation au cours de cette application.

Dans une troisième et dernière partie, nous établissons les conclusions relatives à cette expérimentation et présentons les perspectives de nos travaux.

I. Application

Dans ce premier paragraphe, nous décrivons le contexte dans lequel l'exemple d'application a été développé.

1.1. Présentation du contexte d'application

Nous avons appliqué notre proposition dans le cadre d'un projet de Recherche et Développement au sein de la société Alstom Transport SA, Unité de Valenciennes. Le freinage d'un train est une fonction importante en termes de fiabilité, de sécurité et de coût. C'est pourquoi notre étude expérimentale a porté sur une partie du système de freinage à commande électro-pneumatique d'un élément bicaisse automoteur à deux niveaux, le projet de conception de ce système train étant achevé.

Ce système train comporte deux remorques, formant un élément (cf. figure 4.1).

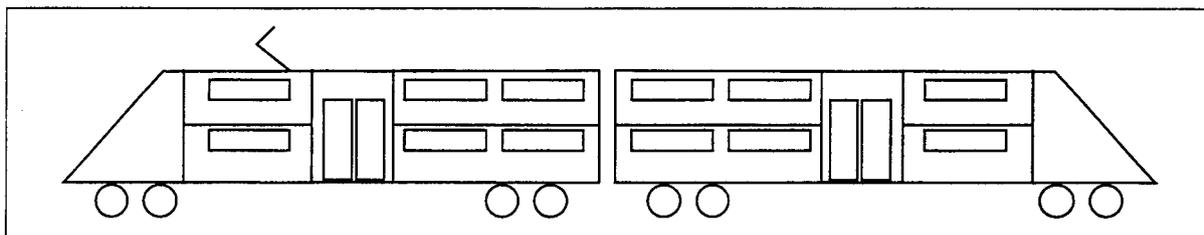


Figure 4.1 : Schéma d'un élément bicaisse automoteur à deux niveaux.

Une remorque est considérée comme moteur (sur deux bogies moteurs) et l'autre comme porteur (sur deux bogies porteurs). Chacune dispose d'une cabine de conduite. Un bogie comporte deux essieux à deux roues en acier. Quatre éléments au maximum peuvent être assemblés pour former une unité multiple (cf. figure 4.2).

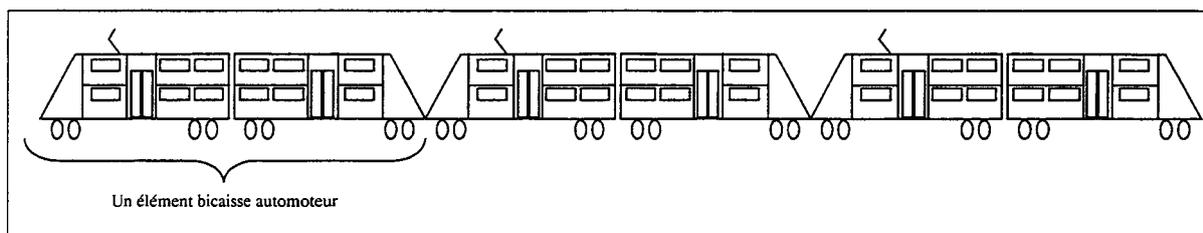


Figure 4.2 : Exemple d'une unité multiple composée de trois éléments.

Le système de freinage à commande électro-pneumatique permet de réaliser cinq types de freinage :

- un freinage de service,
- un freinage d'urgence par appui sur un "coup de poing",
- un freinage de secours en cas de défaillance du frein de service,
- un freinage d'immobilisation du train en ligne,
- un freinage d'immobilisation du train pour essai de frein.

Dans le cadre de cette expérimentation, nous nous sommes uniquement intéressés au freinage de service.

L'étude expérimentale nous a permis d'appliquer, en suivant les différentes étapes du processus de conception, un certain nombre des propositions décrites dans les chapitres II et III que nous présentons dans la partie suivante.

I.2. Cadrage du système à concevoir

Rappelons que l'étape de cadrage du système à concevoir comporte deux grandes phases : l'initialisation et le lancement de la conception.

I.2.1. Initialisation de la conception

La phase d'initialisation correspond aux trois activités principales (figure 4.3) :

- le choix de la structure organisationnelle de travail,
- l'analyse du cahier des charges,
- l'analyse du retour d'expérience.

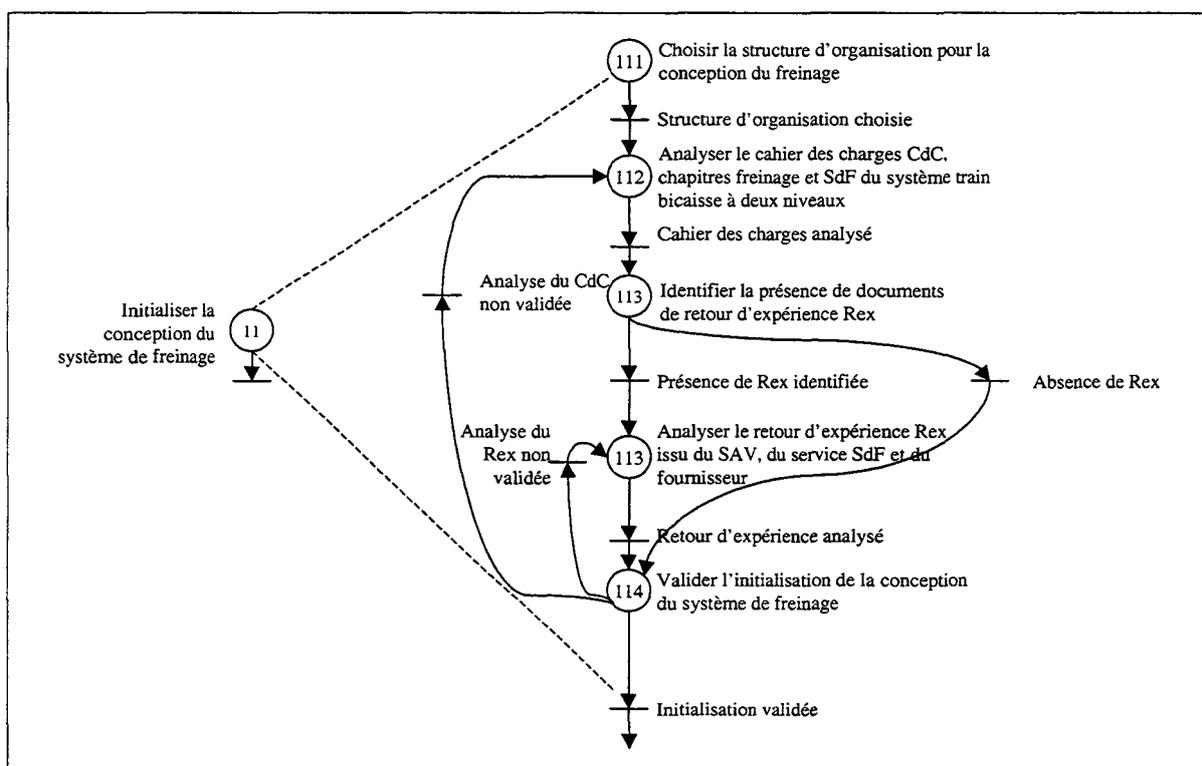


Figure 4.3 : Les étapes de l'initialisation de la conception.

Nous présentons dans les paragraphes suivants le contenu de ces trois activités dans le cadre du cas d'application.

I.2.1.1 Choix de la structure organisationnelle

Lors de l'étape d'initialisation de la conception du système de freinage, la structure organisationnelle du projet de conception était fixée a priori. En effet l'entreprise dans laquelle nous avons réalisé notre expérimentation fonctionne en structure matricielle. Cependant le groupe de décision étant déjà constitué, dans le cadre de l'étude

expérimentale sur le système de freinage, nous avons constitué un groupe d'études composé :

- du responsable du bureau d'étude pour le lot freinage à commande électro-pneumatique,
- d'un représentant du service sûreté de fonctionnement,
- d'un représentant du service après-vente de l'entreprise, qui participe au suivi des matériels durant leur garantie,
- du responsable sûreté de fonctionnement d'une des entreprises, fournisseur des principaux composants du système de freinage.

Ce groupe de travail est intervenu à la fois au niveau du système de décision et du système opérant du schéma de pilotage (figure 4.4). Il peut être assimilé en partie au groupe de travail défini dans le chapitre précédent.

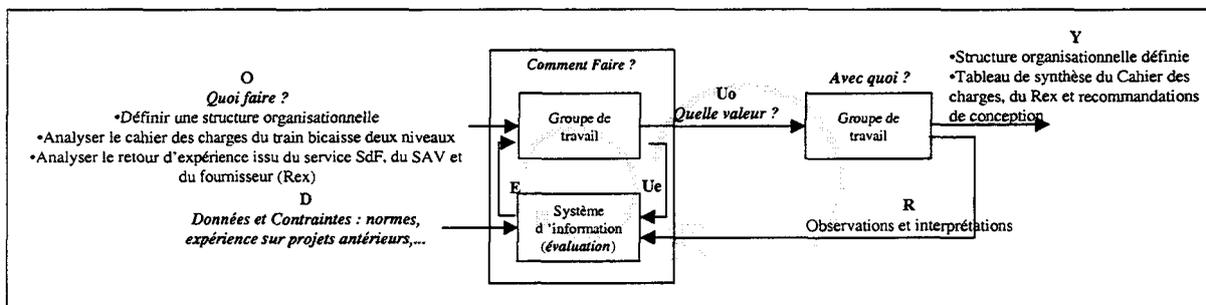


Figure 4.4 : Schéma de pilotage des activités de l'initialisation de la conception.

1.2.1.2 Analyse du cahier des charges

La figure 4.5 suivante représente l'enchaînement des étapes que nous avons mis en œuvre pour l'analyse du cahier des charges. Il faut noter que, par rapport au modèle du chapitre III, nous avons fait apparaître une étape d'émission de recommandations pour la conception que nous décrivons dans le paragraphe suivant.

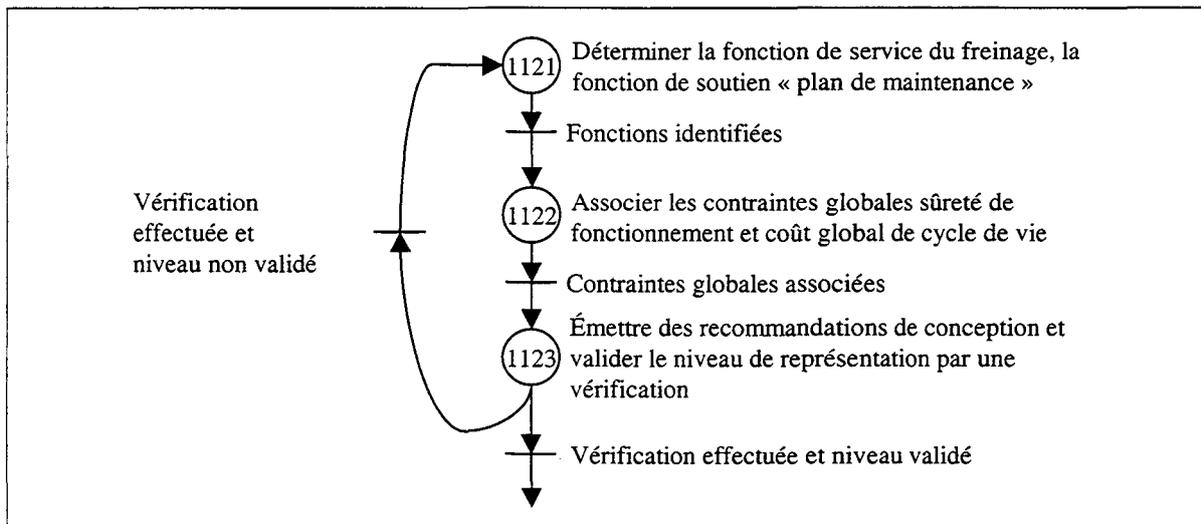


Figure 4.5 : Enchaînement des activités d'analyse du cahier des charges.

Le cahier des charges correspondant au système train considéré, rédigé par le client, est organico-fonctionnel. Il comporte en effet un chapitre par élément fonctionnel du train (freinage, portes, climatisation, traction, etc.) ; le vocabulaire utilisé correspond à des éléments physiques connus, voire même des composants. En outre un chapitre indépendant regroupe les exigences du client en termes de sûreté de fonctionnement concernant l'ensemble du système train.

Le cadrage du système à concevoir a consisté en l'analyse de ce cahier des charges. Dans le cadre de l'étude expérimentale, nous nous sommes naturellement intéressés plus particulièrement aux parties du cahier des charges consacrées au freinage et à la sûreté de fonctionnement globale du système.

Nous n'avons mis en œuvre aucune procédure particulière d'analyse. Une lecture détaillée de chaque paragraphe des chapitres du cahier des charges nous a permis de dégager les exigences concernant le dimensionnement du système de freinage en fonction des différents profils d'emploi du système, ainsi que certaines exigences globales de sûreté de fonctionnement. Dans le cas d'étude, ces spécifications étaient quasiment inexistantes et limitées aux respects de normes ferroviaires. C'est pourquoi nous nous sommes fixé un objectif de fiabilité, pour le système de freinage, de 1,05 incidents par million de kilomètres. Ce chiffre est issu d'une analyse réalisée auparavant sur le suivi de fiabilité d'autres systèmes trains.

La lecture du cahier des charges a permis également de dégager un certain nombre de remarques concernant la conception du système. Nous les avons classées dans le tableau d'analyse du retour d'expérience. En effet, ces remarques sont issues de réflexions des membres du groupe en fonction de leur expérience de la conception ou du service

après-vente. Le tableau 4.1 suivant en donne un exemple. A partir de ces remarques, nous avons proposé plusieurs recommandations pour la conception du système étudié. (Lorsque aucune remarque n'a été émise, les cases du tableau sont grisées.) Le cahier des charges étant organico-fonctionnel, nous avons, suivant les cas, associé ces remarques à un élément physique ou à une fonction.

L'analyse du cahier des charges correspond à l'instanciation du niveau de représentation du besoin du modèle de produit global (schéma de pilotage du niveau 1 de représentation figure 4.6).

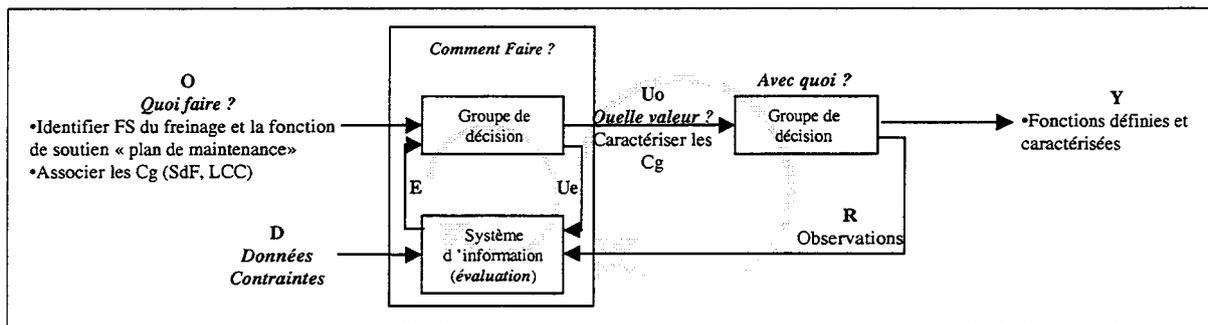


Figure 4.6 : Schéma de pilotage du niveau 1 de représentation du cas d'étude.

Tableau 4.1 : Extrait de l'analyse du cahier des charges.

| Document source | Fonction / organe | Fiabilité | Maintenabilité | Disponibilité | Sécurité | Coûts | Recommandation de conception |
|--------------------|--|--|---|-----------------|-------------------------|---|--|
| Cahier des charges | Sécheur d'air | Qualité de l'air | | | | | Freinage assuré sans séchage de façon temporaire Détection de la perte du séchage sans perte de mission Redondance du séchage Détection par activité de maintenance |
| | Réservoir auxiliaire (réservoir exclusivement réservé au freinage) | | | Dimensionnement | Réalimentation freinage | | |
| | Raccord liaison intercaisse | | | | | | Accouplement rapide proscrit Facilité d'accès Utilisation d'un outillage standard |
| | Perte de la fonction frein électrique | Perte de performance du freinage par échauffement des garnitures des freins mécaniques | Pas d'intervention pour changement des garnitures | | | Voyant pour détection de la perte du frein électrique | Usure du système et des garnitures |

Dans le cadre de l'étude expérimentale, la décomposition fonctionnelle est réalisée en grande partie dans le cahier des charges organico-fonctionnel fourni par le client. Nous avons développé une partie du modèle de produit, décrit au chapitre II, relative au système de soutien. Nous avons en particulier développé la fonction soutien logistique *FSL2 = plan de maintenance* relative à la fonction de freinage étudiée. La figure 4.7 et le tableau 4.2 suivants représentent la décomposition fonctionnelle du niveau 1 de représentation du besoin correspondant à notre étude.

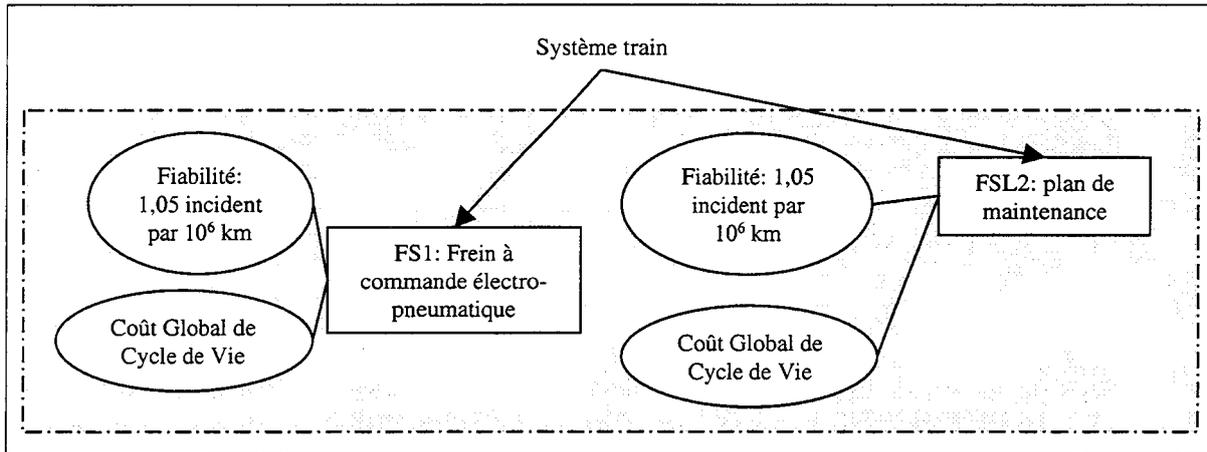


Figure 4.7 : Niveau 1 associé au cas d'étude.

| Nature | Description |
|----------|---|
| Item | FS1 : Frein à commande électro-pneumatique |
| Item | FSL2 : Plan de maintenance |
| Attribut | Fiabilité : 1,05 incidents par 10 ⁶ km |
| Attribut | Coût global de cycle de vie |

Tableau 4.2 : Description des items et attributs extraits du niveau 1 de représentation du système train.

Une vérification, menée suivant le schéma de la figure 4.5, a permis de valider la décomposition fonctionnelle adoptée.

Après l'analyse du cahier des charges, nous avons mené une analyse du retour d'expérience, comme le représente la figure 4.3.

1.2.1.3 L'analyse du retour d'expérience

La dernière étape de l'initialisation de la conception consiste en une analyse du retour d'expérience dont la figure 4.8 représente l'enchaînement des activités. Nous avons mené cette analyse à partir des éléments suivants :

- documents de suivi de fiabilité du service après-vente de l'entreprise qui réalise le suivi de garantie des matériels,
- documents de suivi de fiabilité des composants, établis par le fournisseur,
- études réalisées par le service de sûreté de fonctionnement sur des systèmes trains existants.

Comme pour l'analyse du cahier des charges, nous n'avons utilisé aucune procédure particulière. La lecture détaillée des documents a permis de dégager des remarques résultant des réflexions des membres du groupe.

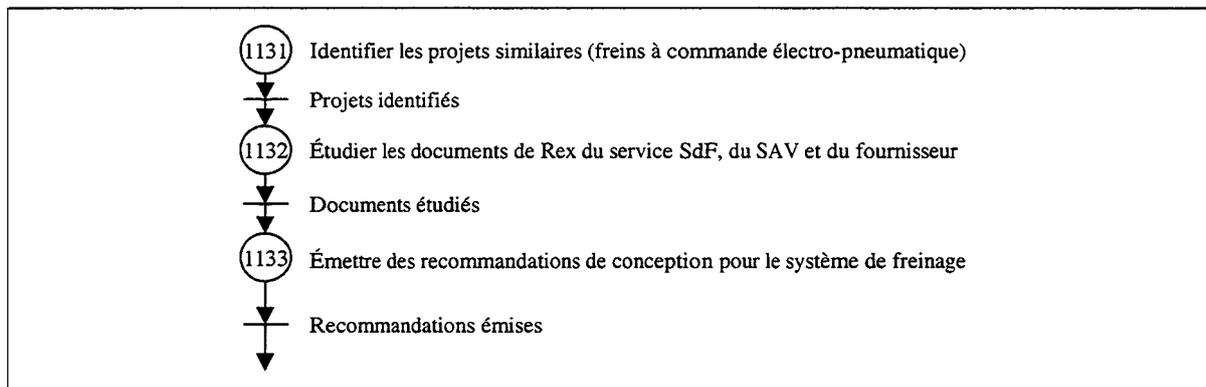


Figure 4.8 : Enchaînement des activités d'analyse du retour d'expérience.

Nous avons pu compléter le tableau 4.1 (analyse du cahier des charges) par des informations issues de l'ensemble des documents cités précédemment. Ces informations correspondent à des composants du système de freinage étudié. Nous leur avons associé un certain nombre de recommandations de conception (cf. tableau 4.3). (Lorsque aucune remarque n'a été émise, les cases du tableau sont grisées.)

Ces tableaux contiennent des recommandations pour la conception du système futur. Ces recommandations, issues d'expériences replacées dans leur contexte (profil de mission du système, architecture...) sont adaptées au contexte de conception considéré. Toutefois elles ne constituent qu'une liste de remarques dont la prise en compte et surtout la réalisation dépendent de la décision des acteurs effectifs de la conception.

| Document source | Fonction / organe | Fiabilité | Maintenabilité | Disponibilité | Sécurité | Coûts | Recommandation de conception |
|-------------------------------|--|--|------------------------|---|--------------------------------------|--|---|
| Rex SAV Alstom projet X | Frein bogie moteur | Vanne électro- modérable (VEMD) Clapet | Problème de réglage | Empêche la mission de s'effectuer | | Fréquence d'occurrence élevée | Vérifier si la fiabilité de la VEMD est satisfaisante Questions auxquelles il faudra répondre : Y'a-t-il une évolution de la politique de maintenance ? Faut-il l'utiliser absolument ? Y'a-t-il eu modification du seuil d'acceptabilité (lors des tests) ? |
| Rex Fournisseur | Détendeur du réservoir auxiliaire sur la remorque | Dérive à l'essai | | | Résultat des tests de sécurité | <10% de remplacement pour non- conformité | Les appareils réglables (détendeur, relais auto variable, ou tout appareil à ressort) doivent faire l'objet d'un ré-étalonnage périodique (pour tenir les tolérances) |
| Rex bureau d'étude | Freinage | Attention : tenir les performances de distance de freinage ≠ tenir les performances globales (thermique, usure, coûts, durée de vie des équipements) | | | | | L'architecture doit prendre en compte l'ensemble des paramètres (distances, énergie, temps,...) pour le calcul du dimensionnement |

Tableau 4.3 : Extrait de l'analyse du retour d'expérience.

Conformément au processus décrit dans le chapitre III, l'initialisation de la conception est suivie d'une phase de lancement de la conception (figure 4.3).

I.2.2. Le lancement de la conception

La deuxième étape du cadrage de la conception est le lancement de la conception. Cette étape permet (cf. chapitre III) de répartir les tâches à réaliser et de planifier la suite de l'étude. Dans le cadre de l'étude expérimentale, nous avons identifié les tâches à réaliser lors du pilotage de la conception.

Ces tâches correspondent :

- dans un premier temps, à la mise en œuvre du 2^{ème} niveau du modèle de produit, c'est à dire à :
 - l'analyse fonctionnelle du système de freinage,
 - l'analyse dysfonctionnelle du système à partir de laquelle nous avons émis quelques recommandations destinées aux concepteurs (les personnes qui réalisent les études) pour l'atteinte de l'objectif de fiabilité que nous nous sommes fixé,
- dans un second temps, nous avons mis en œuvre une partie du 4^{ème} niveau du modèle de produit qui a consisté en une sélection des tâches de maintenance constituant le plan de maintenance.

C'est le groupe d'étude, qui a mené ces différentes activités décrites dans le cadre du paragraphe suivant.

I.3. Pilotage de la conception

Le pilotage de la conception défini dans le chapitre III, correspond à la mise en œuvre par les différents groupes de travail de la conception effective du système. Le schéma de pilotage de la figure 4.9 représente les activités du groupe de décision.

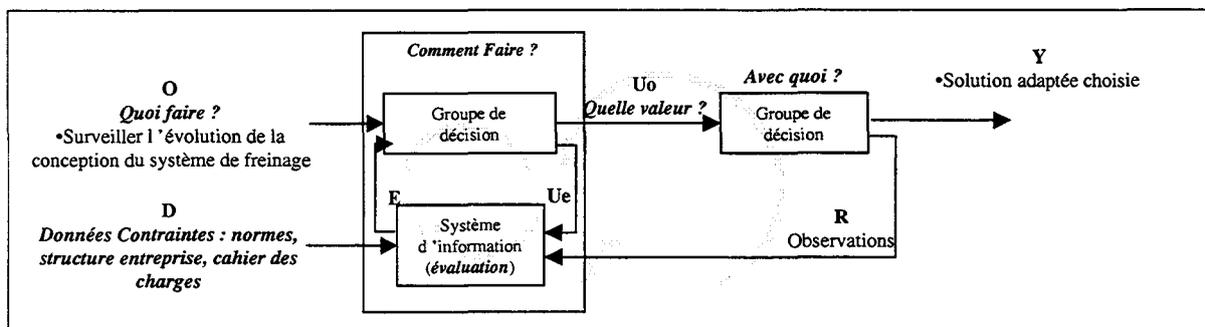


Figure 4.9 : Modèle de pilotage de la conception sur le cas expérimental.

Dans le cadre de l'étude expérimentale, c'est le groupe d'étude qui a mis en œuvre les activités de pilotage et les activités identifiées dans les paragraphes précédents (cf. figure 4.10).

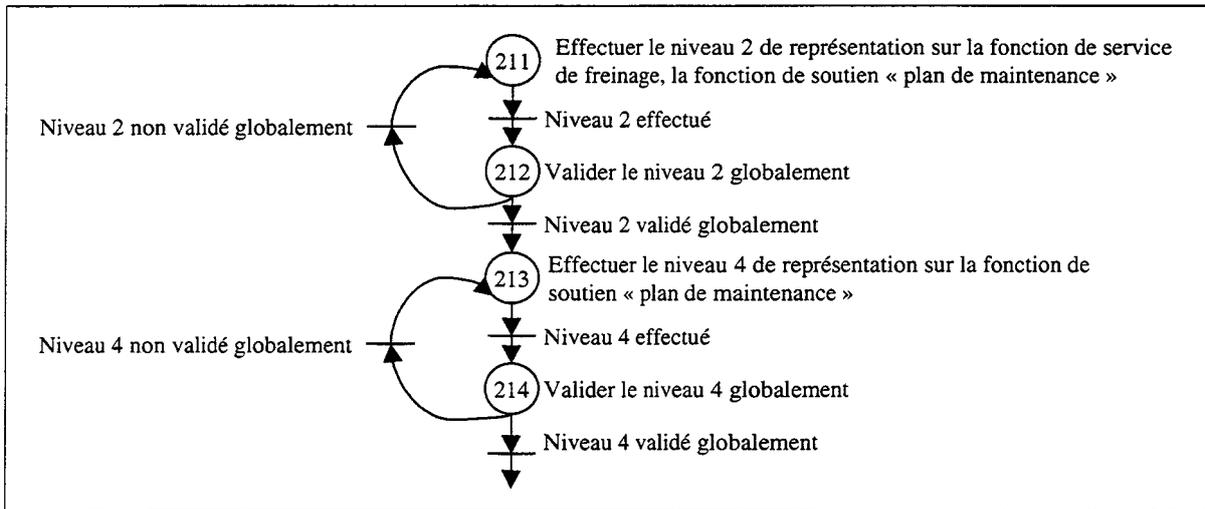


Figure 4.10 : Enchaînement des activités de pilotage de la conception.

Dans le paragraphe suivant, nous décrivons les activités liées à la mise en œuvre du niveau 2 de représentation du modèle de produit global.

I.3.1. Niveau 2 de représentation

Les figures 4.11 et 4.12 représente les activités de mise en œuvre du niveau 2 de représentation et leur enchaînement.

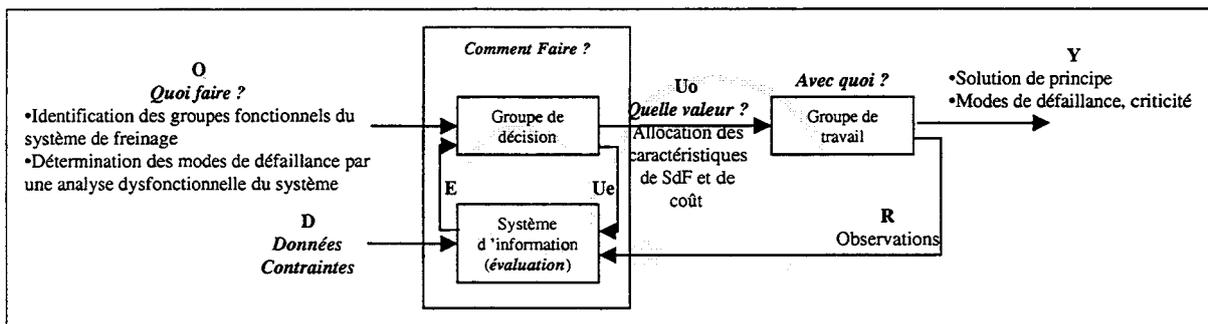


Figure 4.11 : Modèle de pilotage du niveau 2 – cas expérimental.

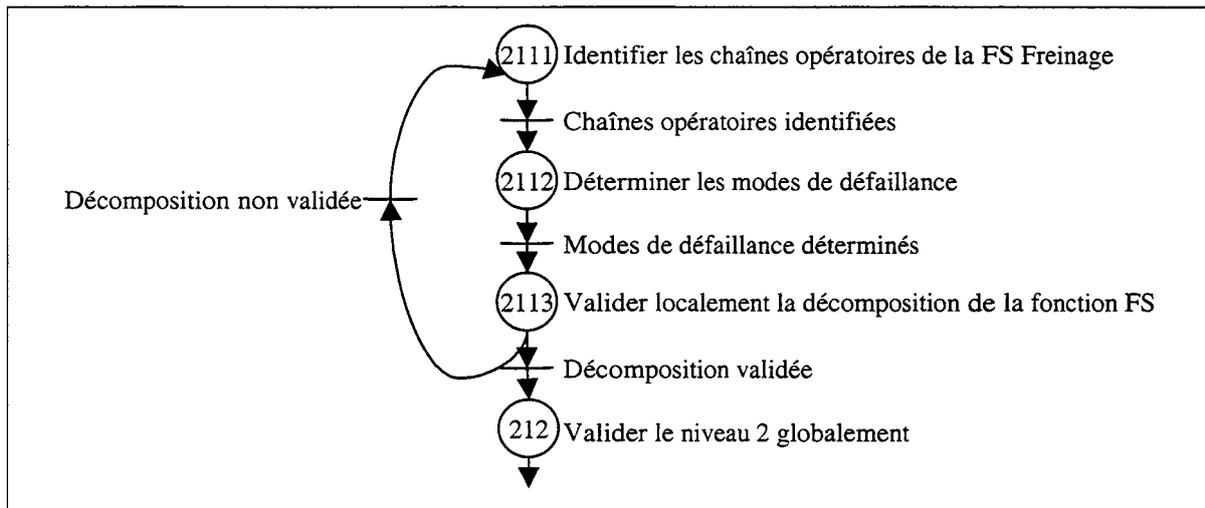


Figure 4.12 : Enchaînement des activités du niveau 2 – cas d'étude.

Nous avons donc réalisé la description fonctionnelle correspondant au premier niveau de décomposition en fonctions opératoires du niveau de représentation des exigences fonctionnelles du besoin. Bien que cette décomposition soit organique du fait du vécu de l'entreprise, nous avons pu identifier les fonctions relatives au freinage. Nous avons limité le périmètre de notre étude aux fonctions principales du freinage de service. Comme nous l'avons précisé au début de ce chapitre, seul le freinage de service a été abordé.

Pour l'étude expérimentale, nous avons dû différencier le système de la motrice du système de la remorque. Nous avons schématisé le système de freinage comme représenté sur les figures 4.13, 4.14 et 4.15 suivantes. Le tableau 4.4 contient la description des fonctions opératoires que nous avons identifiées correspondant au freinage de service du système train. Ces fonctions correspondent aux organes décrits dans les figures 4.13, 4.14 et 4.15.

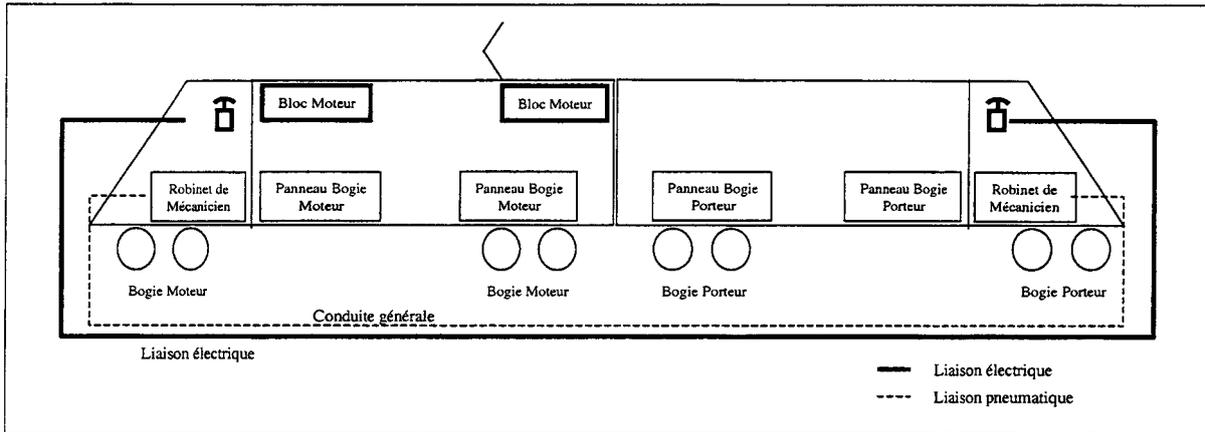


Figure 4.13 : Schéma simplifié des éléments du système de freinage complet d'un élément bicaisse automoteur.

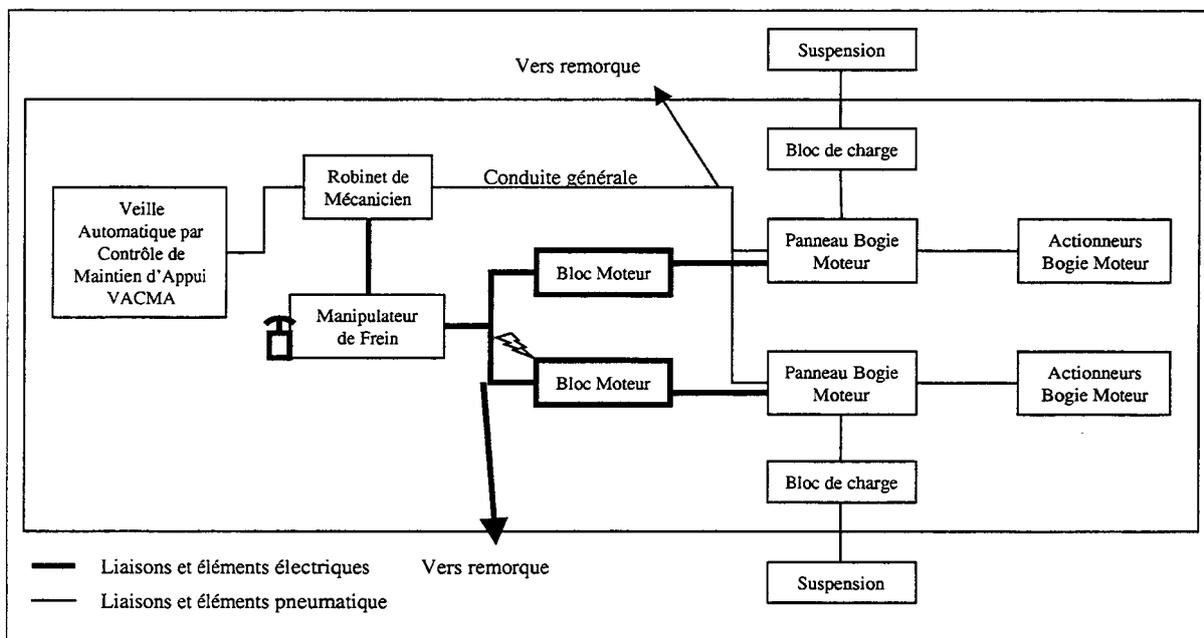


Figure 4.14 : Schéma du système de freinage pour la motrice.

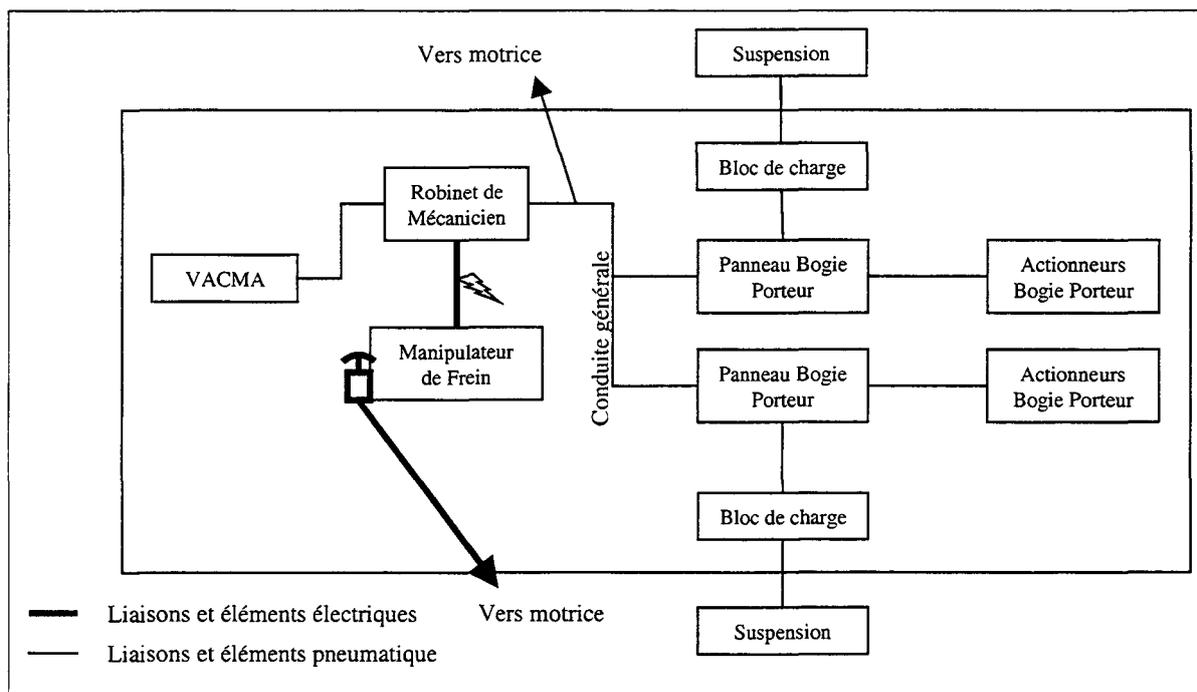


Figure 4.15 : Schéma du système de freinage pour la remorque.

| Fonction opératoire de premier niveau | Organe correspondant | Se trouvant sur la Motrice et/ou sur la remorque | Description de la fonction |
|---------------------------------------|-----------------------------|--|--|
| Fo01-Fo12 | VACMA | Motrice et remorque | Mettre à l'atmosphère la conduite générale pour effectuer un freinage d'urgence (VACMA : veille automatique par contrôle de maintien d'appui) |
| Fo02-Fo13 | Robinet de mécanicien | Motrice et remorque | Transformer la consigne électrique du manipulateur de frein en consigne pneumatique pour assurer le serrage / desserrage |
| Fo03-Fo14 | Manipulateur de frein | Motrice et remorque | Transformer les actions manuelles du conducteur en consigne électrique pour le serrage / desserrage pour le robinet de mécanicien et les blocs moteurs |
| Fo04-Fo05 | Blocs moteurs | Motrice | Générer une consigne de frein électro-pneumatique sur les motrices |
| Fo06-Fo07 | Panneaux Bogies Moteurs | Motrice | Générer une pression aux cylindres de frein sur la motrice |
| Fo08-Fo09 Fo17-Fo18 | Blocs de charge | Motrice et remorque | Générer une pression de pesée en fonction de la charge du véhicule aux panneaux bogies moteur pour asservir la pression des cylindres de frein à la charge du véhicule |
| Fo10-Fo11 | Actionneurs bogies moteurs | Motrice | Fournir l'effort de freinage sur la motrice |
| Fo15-Fo16 | Panneaux Bogies Porteurs | Remorque | Générer une pression aux cylindres de frein sur la remorque |
| Fo19-Fo20 | Actionneurs bogies porteurs | Remorque | Fournir l'effort de freinage sur la remorque |

Tableau 4.4 : Description des fonctions opératoires du niveau 2 de représentation du freinage du système train.

Nous avons également décrit la fonction de soutien *FSL2 = Plan de maintenance*, non intégrable dans le cadre de l'étude expérimentale (il n'y a aucun objectif d'intégration des éléments du soutien logistique hormis quelques éléments de la fonction contrainte *FR1 = équipements de tests de soutien*).

Les fonctions opératoires de soutien associées à la fonction de soutien *FSL2* correspondent aux activités à mener pour réaliser le plan de maintenance. Ces activités identifiées au niveau 2 se déroulent tout au long de la définition du produit, c'est à dire jusqu'au niveau 4 de représentation du modèle de produit. Nous avons identifié les fonctions suivantes (tableau 4.5).

| Fonction | Description |
|----------|---|
| FoSL01 | Définir la grille de criticité relative au système étudié |
| FoSL02 | Réaliser une analyse des dysfonctionnements des fonctions étudiées |
| FoSL03 | Sélectionner les tâches de maintenance |
| FoSL04 | Réaliser un bilan technico-économique du plan de maintenance rédigé |

Tableau 4.5 : Description des fonctions opératoires de soutien associées à la fonction *FSL2 = Plan de maintenance*.

Ces activités permettent également de définir les attributs "Modes de défaillance" de chacune des fonctions opératoires. Pour établir l'analyse des dysfonctionnements et identifier les modes de défaillance, nous avons défini la grille de criticité (tableau 4.6), qui constitue une instantiation du tableau 2.7.

La figure 4.16 suivante représente le niveau 2 de représentation du modèle de produit. Dans cette figure, nous avons désigné les fonctions par les organes correspondants (cf. tableau 4.4).

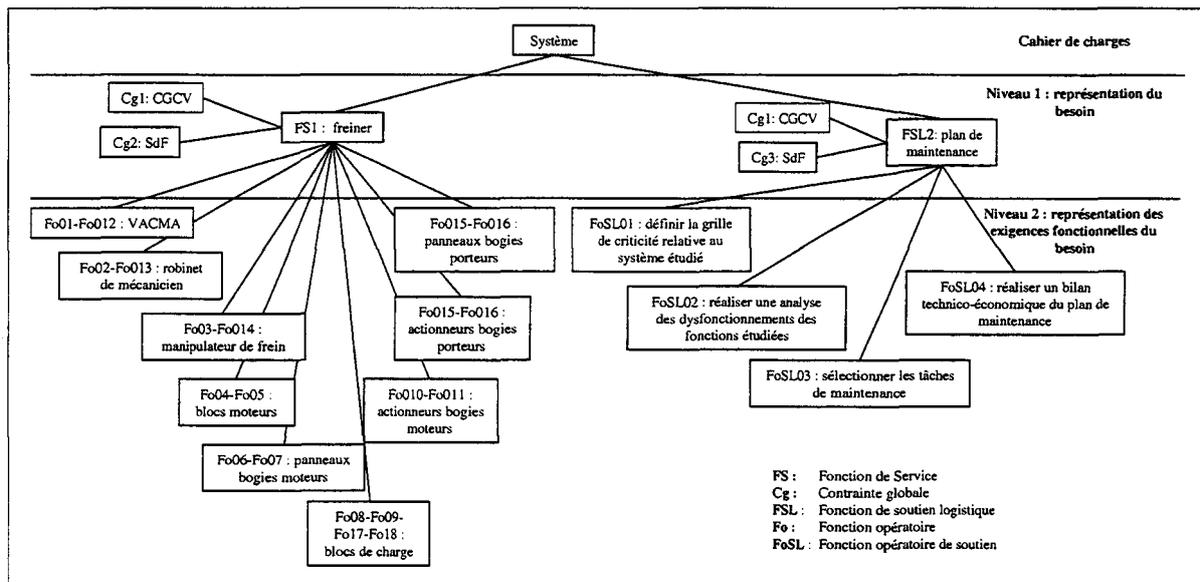


Figure 4.16 : Extrait du niveau 2 de représentation du modèle de produit – cas d'étude. (Les modes de marches et de défaillance n'apparaissent pas, pour plus de clarté).

Nous posons l'hypothèse (fondée sur l'expérience et généralisant le profil d'emploi des trains) qu'un élément roule 800 km par jour, 10h par jour, 300 jours par an. Pour calibrer la grille de criticité, nous nous basons sur l'objectif de fiabilité que nous nous sommes fixé (1,05 incidents par million de kilomètres). Cette fiabilité correspond à un effet sur le train tous les 4 ans. Ceci nous a permis de définir l'échelle de fréquence de défaillance des unités maintenables.

Pour la sécurité, l'objectif normatif est de 10^{-9} par événement redouté. Ceci signifie que pour les événements redoutés, la fiabilité demandée est de l'ordre d'un incident tous les 300 ans.

Nous avons identifié, sur le système train complet, les effets des modes de défaillance suivants :

- Simple retard,
- Retrait fin de service commercial,
- Retrait début de service commercial ou prochain terminus,
- Retrait station suivante,
- Demande de secours.

Ces informations nous permettent d'instancier le tableau 3.3 pour construire le tableau 4.6.

| | | | | | | |
|--|---------------------------|---|--|--------------------------------------|--------------------------------|----------------------|
| F1 : Très fréquent (1 mois) | Avis d'Expert | Critique | Critique | Critique | Critique | Critique |
| F2 : Fréquent (2 ans) | Non Critique | Avis d'Expert | Critique | Critique | Critique | Critique |
| F3 : Peu fréquent (4 ans) | Non Critique | Avis d'Expert | Avis d'Expert | Critique | Critique | Critique |
| F4 : Rare (10 ans) | Non Critique | Non Critique | Non Critique | Avis d'Expert | Critique | Critique |
| | G1 : Simple retard | G2 : Retrait fin de service commercial | G3 : Retrait début de service commercial ou prochain terminus | G4 : Retrait station suivante | G5 : Demande de secours | GS : Sécurité |

Gi : niveau de gravité, Fi : fréquence d'apparition.

Tableau 4.6 : Grille de criticité définie pour le cas d'étude expérimentale.

Nous avons alors pu mener l'analyse dysfonctionnelle sur les fonctions opératoires identifiées. Nous avons appliqué chacun des modes de défaillance identifiés (pas de fonction, plus de fonction, fonction dégradée, fonction intempestive, non-arrêt de la fonction) à chacune des fonctions opératoires. Le tableau 4.7 suivant représente un extrait des résultats obtenus.

Cette analyse des dysfonctionnements a permis d'identifier les fonctions et les modes de défaillance présentant une criticité.

| Fo | MD | EMD | Effet sur le système train | Gi | Unités maintenables en cause | Fi | M P | Criticité | Observations |
|--------------------------|------------------------------------|--|--|----------------------------------|--|----|--------|-----------|--|
| Fo1- Fo12 | Pas de fonction / plus de fonction | Caché* | Lors du test de prise de service, la fonction est assurée par la seconde VACMA placée dans la seconde cabine. Perte de la redondance, train rebuté | G1 | Electrovalve bloquée au travail (grippage) | F1 | O | C* | *en exploitation, un test est effectué à chaque prise de service |
| | | | | | Valve pneumatique bloquée au repos (grippage) | F1 | O | C** | |
| | | Caché* | En exploitation : la fonction est assurée par l'autre VACMA | G2 | Alimentation intempestive de la bobine de l'électrovalve | F1 | O | C** | **à valider : pas de contrôle de la redondance |
| | Fonction dégradée | Non pertinent | | | | | | | |
| | Fonction intempestive | Evident | Isolement de la VACMA, test de la seconde. Si le test est positif, le train termine sa mission | G3 | Bobine de l'électrovalve coupée | F1 | O | NC | |
| | | | | | Défaut câblage de l'électrovalve | F1 | | NC | |
| Non-arrêt de la fonction | Evident | Isolement de la VACMA, si en exploitation, test de la seconde. Si le test est positif, le train termine sa mission. Au test, le train est rebuté. | G3 | Bobine de l'électrovalve coupée | F1 | O | NC | | |
| | | | | Défaut câblage de l'électrovalve | F1 | O | NC | | |

Fo : Fonction opératoire, MD : Mode de Défaillance, EMD : Evidence du Mode de Défaillance,
Gi : Gravité, Fi : Fréquence, MP : présence de Maintenance Préventive.

Tableau 4.7 : Analyse des dysfonctionnements : extrait du tableau des résultats.

Pour les modes de défaillance critiques, nous avons émis plusieurs recommandations destinées aux concepteurs. Nous en donnons quelques exemples :

1. Sur la fonction Fo1-Fo12 (VACMA), aujourd'hui le test effectué à chaque prise de service vérifie la disponibilité de la fonction. En revanche, il faut vérifier dans les schémas de conception, qu'il permet également de vérifier la disponibilité des éléments redondants. La vérification de la redondance devrait se faire au plus près de la mise à l'air libre de la conduite générale.
2. La Vanne Electro-modérable (VEMD) sur le robinet de mécanicien et sur les panneaux bogies moteurs est un élément sensible dont la fiabilité est limitée par rapport aux objectifs.
3. Pour les blocs moteurs et les manipulateurs de frein, l'analyse des dysfonctionnements ne peut être menée de façon complète par les concepteurs, la conception de ces éléments étant sous-traitée. Cependant nous avons alloué à ces éléments une fréquence de défaillance maximum correspondant aux objectifs de fiabilité de la fonction freinage. Les concepteurs devront valider le respect de ces fréquences avec le fournisseur des éléments considérés.
4. Pour les modes de défaillance notés "cachés" ayant une incidence sur la perte d'efficacité du freinage (de $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$...), il faut vérifier que les études de sécurité ont analysé tous les événements redoutés.

Ces informations doivent être prises en compte par les concepteurs dans la suite du processus de conception. La modélisation du système aux trois derniers niveaux de représentation du modèle de produit global doit intégrer ces remarques et les concepteurs doivent justifier comment elles ont été prises en compte. Le pilotage de la conception (figures 4.10 et 4.11) permet alors de vérifier la prise en compte des remarques et de valider à nouveau le respect des objectifs de fiabilité.

Par ailleurs, pour poursuivre la décomposition de la fonction de soutien *FSL2 = plan de maintenance*, nous avons mis en œuvre le niveau 4 de représentation du modèle de produit global.

I.3.2. Niveau 4 de représentation

Pour déterminer la fonction de soutien *FSL2*, comme nous avons intégré à notre processus de conception les principes de la méthode de Maintenance Basée sur la Fiabilité, nous avons également appliqué le logigramme de sélection des tâches de maintenance représenté figure 4.17.

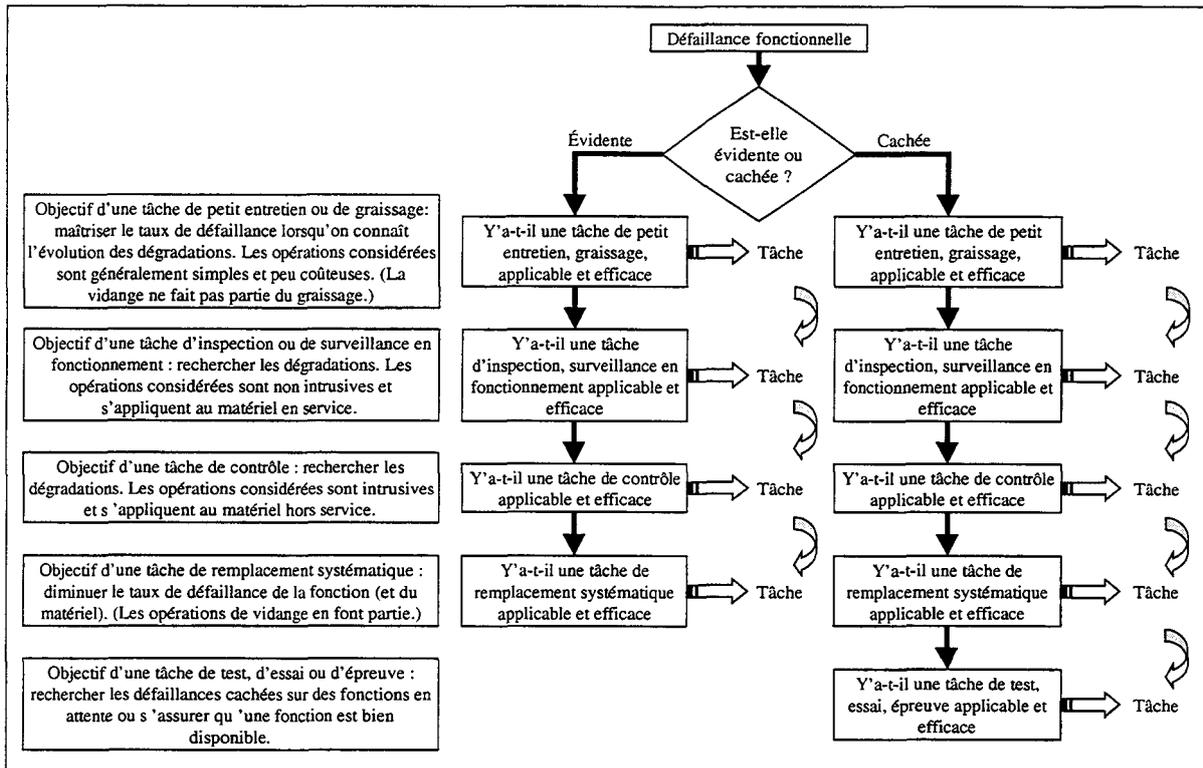


Figure 4.17 : Logigramme de sélection des tâches de maintenance type RCM.

Certains auteurs traitant de la RCM identifient 6 cinétiques de dégradations [Moubray-91]. Dans le cadre de notre application, nous avons retenu les trois cinétiques de dégradation principales représentées dans la figure suivante (4.18).

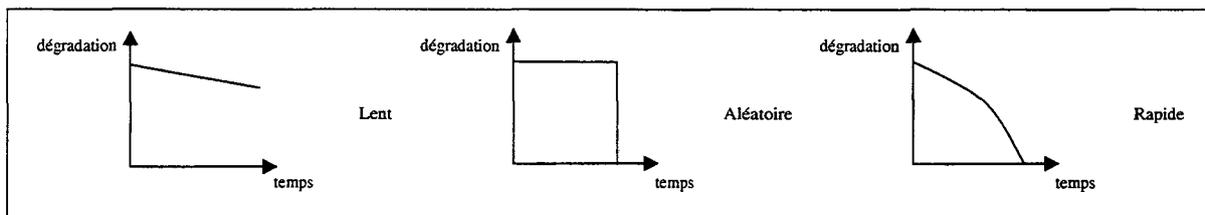


Figure 4.18 : Cinétiques de dégradation des matériels.

La sélection des tâches de maintenance est synthétisée dans un tableau dont la suite (tableau 4.8) représente un extrait.

| Fonction | Types de tâche | Causes contrées | VD | Périodicité | Cette tâche maîtrise-t-elle le taux de défaillance ? | Observations |
|----------|--|--|-----------|---------------------------|---|---|
| Fo1-Fo12 | Test VACMA (si la modification a été réalisée) | Défaut électrovalve ou défaut relais ou défaut bobine de l'électrovalve | Aléatoire | A chaque prise de service | Détection de l'éventuelle indisponibilité de la VACMA | Mesurer la tenue de l'objectif de sécurité avec les tâches actuelles pour valider la modification |
| | Révision générale | Usure des joints et des membranes | Lent | 5 ans* | Maîtrise du taux de défaillance | *Préconisation minimale pouvant être détendue en fonction du retour d'exploitation |
| Fo2-Fo13 | Contrôle des pressions (détendeur pilote, conduite générale, réservoir...) et réglage éventuel si dérive hors tolérances | Vérifier les dérives des organes à réglage de pression (VEMD et détendeur) | Lent | 18 mois | Maîtrise des dérives des organes à réglage | |
| | Révision générale | Usure des joints (caoutchouc) marquage des clapets, défauts électrovalve, relais | Lent | 5 ans* | Maîtrise des taux de défaillance par durée de vie des matériels | *Préconisation minimale pouvant être détendue en fonction du retour d'exploitation |

VD : Vitesse de Dégradaion

Tableau 4.8 : Extrait de la sélection des tâches de maintenance sur la fonction freinage.

La sélection des tâches de maintenance en conception permet de décrire un plan initial de maintenance préventive qui devra être mis à jour dès que le système sera totalement défini. En outre, les tâches préconisées dans ce plan étant justifiées, le plan constitue un document contractuel entre le constructeur et le client.

Après l'établissement du plan initial de maintenance préventive sur la fonction freinage, nous avons réalisé le bilan technico-économique correspondant à la fonction opératoire de soutien FoSL4. Ce bilan dont le tableau 4.9 donne un extrait, permet de valider à la fois la conception du produit et le plan de maintenance de la partie du système de freinage que nous avons étudiée.

| Tâche | Requis pour la réalisation de la tâche | | Coût (estimation 300F/h) | Périodicité | Temps annuel | Coût annuel |
|--|--|------------------------|--------------------------|--|--------------------|---------------------|
| | Temps | Nombre de personnes | | | | |
| Test VACMA | 3 min | 1 personne | 15 F | A chaque prise de service (5 /jour en moyenne) | 75 h | 22,5 KF |
| Révision générale VACMA (*2) | Dépose/repose/ test : 45 min | 1 personne | 675 F | 5 ans | ≈1 h pour les deux | 270 F pour les deux |
| | Visite : 1h30 | 1 personne | | | | |
| Graissage Actionneurs Bogies Moteurs et Porteurs (8 moteurs, 8 porteurs et 4 disques porteurs) | 1 h | 1 personne pour les 20 | 300 F | 6 mois | 2 h | 600 F |
| Contrôle semelle/jeux actionneurs (20) | 1 h | 1 personne pour les 20 | 300 F | 2 mois | 6 h | 1,8 KF |
| Révision générale actionneurs (20) | Dépose/repose/ test : 1h30 | 2 personnes | 33 KF | 5 ans | 22 h | 6,6 KF |
| | Visite : 2h30 | 1 personne | | | | |

Tableau 4.9 : Extrait du bilan technico-économique sur une partie du système de freinage.

Le bilan technico-économique réalisé, dans le cas précis de l'étude pour laquelle le client n'avait formulé aucune exigence de maintenance, constitue un bilan indicatif non exhaustif du coût de maintenance. Dans un autre cas, ce bilan permet de valider les recommandations et la conception du système étudié. Mais la comparaison des informations contenues dans ce tableau avec les exigences du même client sur un autre

système train et faisant l'objet d'un contrat futur, dérivé de celui étudié, en particulier le chiffre encadré dans le tableau 4.9, met en évidence que ce qui est validé pour ce système train ne le sera pas pour l'autre. En effet dans le cas précis de la révision générale des actionneurs (voir encadré dans tableau 4.9), les exigences du client sont beaucoup plus fortes pour le système similaire futur. Cette remarque pourra donc être prise en compte lors de la conception du système futur.

Cependant si l'étude expérimentale avait été réalisée sur un projet de conception de train non achevé, et si la mise en œuvre de la boucle de pilotage (figures 4.9 et 4.10) avait permis d'identifier des problèmes lors de ce bilan, nous aurions pu revenir sur la conception des éléments incriminés afin d'envisager des solutions permettant d'atteindre les objectifs fixés (par exemple par une reconception des groupes fonctionnels, un choix différent de composants).

1.4. Conclusion de la conception

L'étape de conclusion de la conception, comme elle est décrite dans le chapitre III, permet de réaliser un bilan de la phase de conception. Nous rappelons que cette étape consiste à prendre note des informations mises en évidence au cours de la conception. Par exemple les fonctions notées non critiques mais dont la fiabilité est juste en deçà de la limite des objectifs lors de l'étude sont transformées en informations venant compléter le tableau d'analyse du retour d'expérience.

II. Validation

L'étude expérimentale a été réalisée sur un projet de conception de système train terminé afin de disposer d'un référentiel et mettre ainsi en évidence le gain généré par l'application de la méthode. Réaliser l'étude expérimentale sur un projet en cours ne nous aurait pas permis (ou très difficilement) de comparer les apports de la méthode.

Au cours de cette étude expérimentale, nous avons pu valider un certain nombre de nos propositions que nous développons dans les paragraphes suivants.

1. Modèle de produit

La mise en œuvre du modèle de produit a été réalisée dans un cadre particulier. En effet l'analyse a été effectuée à partir d'un cahier des charges organico-fonctionnel. Cependant les groupes fonctionnels identifiés forment la chaîne opératoire réalisant la fonction de freinage de service. De plus la fonction de soutien logistique développée a pu être mise en œuvre tout au long du processus de conception.

2. Processus de conception

Concernant le processus de conception, l'enchaînement des étapes décrit dans les chapitres précédents a pu être validé partiellement. Il correspond à une démarche logique de conception applicable dans un contexte industriel. Nous avons également pu valider l'importance de l'analyse du cahier des charges et du retour d'expérience. Ces deux activités ont permis de mettre en évidence des points importants de la spécification client qui ont tendance à être sous-estimés par les concepteurs du fait de l'habitude et de leur expérience de la conception.

Nous n'avons pu mettre en œuvre l'intégralité de la méthode. Le modèle de produit n'a pu réellement être développé que sur les deux premiers niveaux de représentation. De plus le cas de l'étude expérimentale ne se prêtait pas à la validation de l'intégration de certaines des fonctions du soutien.

Le processus de conception a pu être en partie validé (en particulier l'enchaînement des étapes). Pourtant le pilotage n'a pu être complètement mis en œuvre sur les étapes de conception. En effet il aurait été souhaitable que l'on puisse suivre la prise en compte des recommandations émises au second niveau de représentation, lors des reprises de conception. Mais, l'étude expérimentale ayant été réalisée sur un projet de conception terminé, cela n'a pas été possible.

Par ailleurs nous ne connaissons pas encore les gains réels de l'exploitation de nos propositions dans le cadre de l'étude expérimentale, car elle n'est pas terminée. Cependant une analyse des recommandations émises permet d'estimer un gain substantiel engendré par l'application de la méthode. L'importance des sommes mises en jeu dans le cadre de la conception de tels systèmes complexes justifie la mise en œuvre de ce type de méthode, même si le gain n'est que de quelques pour cent.

Dans le contexte de la recherche de la performance globale, l'étude réalisée en milieu industriel nous a permis d'identifier l'intérêt de la mise en place d'une méthode de conception utilisant l'expérience de l'entreprise pour concevoir des systèmes dont la sûreté de fonctionnement, le coût et le soutien logistique ont été conçus au plus tôt dans la phase de conception, et qui sont donc globalement plus performants.

Dans le paragraphe suivant, nous effectuons une synthèse des propositions mises en œuvre et proposons quelques perspectives d'amélioration de notre méthode.

III. Synthèse et perspectives

Au cours de cette étude expérimentale, nous avons pu mettre en œuvre les propositions suivantes :

- composition d'un groupe d'étude, composé de personnes représentatives des différents domaines concernés par la phase de conception (choix de la structure organisationnelle),
- définition des premiers niveaux de représentation du modèle de produit, appliqués à une fonction de service du système principal et une fonction de soutien du système de soutien (niveau 1 et 2, cf. tableaux 4.4 et 4.5),
- initialisation de tableaux d'analyse du retour d'expérience, d'analyse dysfonctionnelle (cf. tableaux 4.1, 4.3 et 4.7).

Ceci constitue une validation partielle de notre proposition. Nous pouvons en déduire les commentaires suivants concernant notre proposition :

- la description des fonctions du système principal et des fonctions du système de soutien doit être réalisée en parallèle afin de garantir une conception atteignant les objectifs fixés,
- la mise en œuvre du modèle de produit et du processus de conception proposés semble relativement claire et complète pour permettre la définition d'un produit performant,
- la méthode souffre à ce jour d'un manque de précision concernant les outils nécessaires à la définition des fonctions et ressources du soutien,
- la prise en compte des remarques formulées reste du ressort des concepteurs du système. Mais nous ne connaissions pas l'intégralité des contraintes qu'ils ont à prendre en compte (dimensionnement, temps, coût).

Au cours de cette étude expérimentale, nous avons illustré puis validé a posteriori l'apport de la mise en œuvre de la méthode sur une partie restreinte d'un projet de conception. En perspective, la mise en œuvre complète de la méthode permettra une validation totale. Cette démarche est saine car elle est progressive. Elle permet d'éviter les risques inhérents à tout changement en profondeur de la conception d'un produit complexe.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit l'étude expérimentale réalisée sur un système de transport ferroviaire. La mise en œuvre sur un cas industriel nous a permis de valider une partie des propositions décrites dans les chapitres précédents.

Nous en avons déduit un certain nombre de perspectives d'amélioration de notre proposition. En particulier, la définition précise des fonctions et ressources du soutien logistique reste une étape difficile de la conception d'un produit global.

En outre, la recherche de la performance globale implique la définition conjointe du produit et de son industrialisation, qui n'a pas été abordée dans notre proposition. La réalisation de l'étude expérimentale a mis en évidence que les remarques et recommandations formulées pour l'atteinte des objectifs sont souvent liées à l'industrialisation du système. La prise en compte de ces remarques constitue un point important de la recherche de la performance globale.

Conclusion générale

Dans le premier chapitre de ce mémoire, nous avons présenté et défini les concepts de système et de cycle de vie, fondamentaux dans notre démarche. Nous avons ensuite caractérisé la performance globale d'un produit qui constitue actuellement un paramètre important de la compétitivité des entreprises. L'importance de la phase de conception dans la recherche de cette performance globale nous a conduit à dresser un état de l'art des méthodes de conception. Nous avons mis en évidence que ces méthodes ne répondent que partiellement à l'objectif de performance globale et proposé les caractéristiques nécessaires d'une méthode de conception. Elle doit s'appuyer sur un modèle de produit et un processus de conception mettant en œuvre ce modèle ; elle doit être de type hybride (algorithmique à composante axiomatique) et prendre en compte l'ensemble du cycle de vie du produit.

Conformément aux conclusions de l'analyse précédente, nous avons tout d'abord spécifié dans le deuxième chapitre, un modèle de produit global prenant en compte les aspects soutien logistique du système à concevoir. Dans le troisième chapitre, nous avons décrit un processus de conception constituant avec le modèle précédent, la méthode de conception que nous proposons. Ce processus de conception s'appuie sur la relation existant entre processus de conception et management de projet et sur la notion de pilotage.

Le quatrième chapitre nous a permis d'expérimenter notre méthode en traitant une étude de cas industriel en cours dans une entreprise de transport ferroviaire. L'état actuel d'avancement de cette étude nous a permis de valider l'applicabilité et l'intérêt de notre proposition. Des résultats quantifiés devraient prochainement nous permettre d'apporter une validation plus complète de nos propositions.

Le travail présenté dans ce mémoire et les réflexions qu'il a suscitées permettent d'envisager un certain nombre de perspectives à nos travaux.

Nous avons montré dans le premier chapitre que la performance globale dépend également de la production et du recyclage du système. Comme nous l'avons signalé, des travaux réalisés au laboratoire ont permis d'intégrer au modèle de produit sur lequel nous avons élaboré notre proposition, les aspects calcul et fabrication. La prise en compte

simultanée de ces différents aspects du soutien logistique, de la production et du recyclage du produit constitue une première perspective importante de nos travaux. Cette prise en compte doit se traduire au niveau du modèle de produit global et au niveau du processus de conception. En outre, nous avons limité nos recherches à l'intégration du premier niveau de soutien. Il faudrait également tenir compte des niveaux inférieurs, c'est à dire du soutien du système de soutien.

Par ailleurs les aspects liés aux outils de la conception n'ont pas été abordés. Une étude approfondie des différents outils mis en œuvre pour les ingénieries de conception, de sûreté de fonctionnement et logistique doit permettre de mettre en évidence des analogies entre ces outils afin de les coordonner au sein du modèle de produit global, et ainsi améliorer le délai de conception. Cette étude constitue une deuxième perspective de nos travaux.

Une troisième perspective concerne l'évaluation de la performance. Dans le cadre du pilotage, nous avons abordé cette notion, mais nous n'avons pu répondre à ce problème. Il existe des méthodes d'optimisation qu'il peut être intéressant d'appliquer en conception afin d'aider les concepteurs dans le choix de la solution la plus représentative de la performance globale. Par exemple, nous pouvons citer l'optimisation multi-critères et la recherche de l'idéal par calcul de la distance à cet idéal [Pomerol et Barba-Romero-93].

D'autre part notre méthode de conception repose sur l'analyse du retour d'expérience. Les méthodes d'analyse du retour d'expérience ne faisaient pas partie de nos travaux et nous ne les avons pas étudiées. L'analyse des méthodes du retour d'expérience constitue une quatrième perspective de nos travaux. Elle permettra de compléter la méthode proposée et d'assister les concepteurs dans un choix adapté à leur entreprise.

Enfin, il apparaît nécessaire d'appliquer la méthode proposée à un cas réel complet qui permettrait de mettre en évidence de façon plus globale l'apport d'une méthode de conception contribuant à la recherche de la performance globale.

Bibliographie

- [ADEPA-81] Le GEMMA, guide d'étude des modes de marches et d'arrêts, ADEPA, Collection Génie Productique, Paris, France, 1981.
- [AFAV-89] Association Française pour l'Analyse de la Valeur (AFAV), "Exprimer le besoin applications et démarche fonctionnelle", Edition AFNOR Gestion, 1989.
- [AFGI-92] Association Française de Gestion Industrielle, "Evaluer pour évoluer, les indicateurs de performance au service du pilotage industriel", ouvrage collectif AFGI, Paris, France, 1992.
- [AFNOR-88] Association Française pour la Normalisation (AFNOR), "Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité", Recueil de Normes Françaises, 3^{ème} édition, 1988.
- [AFNOR-94] Association Française pour la Normalisation (AFNOR), "Management de projet. Qualité et efficacité des organisations", Recueil de Normes Françaises, 1994.
- [Akao-93] Yoji AKAO, "QFD, Prendre en compte les besoins du client dans la conception du produit", AFNOR, Paris, France, 1993.
- [Aouassat-96] Améziane AOUSSAT, "Contribution à la modélisation du processus de conception de produits industriels", *Habilitation à Diriger des Recherches*, Paris, France, 1996.
- [ARINC-95] ARINC Research Corporation, "Product reliability, maintainability and supportability handbook", Edited by Michael PECHT, CRC Press, 1995.
- [Azambre et Audousset-92] Jacques AZAMBRE et Jean-Georges AUDOUSSET, "Maîtriser une conception de qualité", Masson, Paris, France, 1992.
- [Beauxerois-95] Eric BEAUXEROIS, "La maintenance", Revue annuelle de l'union des élèves Art et Métiers, UE ENSAM, Paris, France, 1995.
- [Bellut-90] Serge BELLUT, "La compétitivité par la maîtrise des coûts. Conception à coût objectif et analyse de la valeur.", AFNOR gestion, Paris, France, 1990.
- [Benamara-98] Abdelmejid BEN AMARA, "Contribution à l'intégration de la composante calcul dans une démarche de conception fonctionnelle intégrée. Application aux mécanismes.", *Thèse de Doctorat*, Université de Valenciennes, France, 1998.

- [Berrah-97] Lamiah-Amel BERRAH, "Une approche d'évaluation de la performance industrielle. Modèle d'indicateur et techniques floues pour un pilotage réactif", *Thèse de Doctorat*, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 1997.
- [Bétourné et Van der Vliet-98] François Jérôme BETOURNE, Jacques VAN DER VLIET, "Exemple d'application d'une démarche simultanée SDF et SLI", 11^{ème} Colloque National de Fiabilité et Maintenabilité, pp. 493-498, Arcachon, France, 1998.
- [Blanchard et al.-95] Benjamin S. BLANCHARD, Dinesh VERMA et Elmer L. PETERSON, "Maintainability, a key to effective serviceability and maintenance management", John Wiley and Sons, Inc., New York, Etats-Unis, 1995.
- [Blanchard-92] Benjamin S. BLANCHARD, "Logistics engineering and management", Prentice Hall International Series in Industrial and Systems Engineering, Englewood Cliffs, Etats-Unis, 1992.
- [Boisvert-95] H. BOISVERT, "Comprendre, mesurer et gérer la productivité, la compatibilité par activités", Congrès International de Génie Industriel de Montréal : La productivité dans un monde sans frontière, pp. 835-844, Montréal, Canada, 18-20 octobre, 1995.
- [Bon-95] Jean-Louis BON, "Fiabilité des systèmes – Méthodes mathématiques", Collection Techniques Stochastiques, Masson, Paris, France, 1995.
- [Boucly et Ogus-87] Francis BOUCLY et Arnold OGUS, "Le management de la maintenance", AFNOR Gestion, Paris, France, 1987.
- [Boucly-88] Francis BOUCLY, "Maintenance : les coûts de la non-efficacité des équipements", AFNOR Gestion, Paris, France, 1988.
- [Bourdichon-94] Patrick BOURDICHON, "L'ingénierie simultanée et la gestion d'informations", Collection Systèmes d'information, Hermès, Paris, France, 1994.
- [BTE-92] "Maîtrise et gestion de la maintenance", Tome 1, BTE Collection, Technique & Documentation – Lavoisier, Paris, France, 1992.
- [Bucciarelli-88] L. L. BUCCIARELLI, "An ethnographic perspective on engineering design", *Design Studies*, vol 9, n°3, pp. 159-168, 1988.
- [Cabarbaye et al.-99] André CABARBAYE, Julien SEROI et Linda TOMASINI, "Optimisation dans le domaine de la sûreté de fonctionnement", 3^{ème} Congrès International de Génie Industriel, *L'intégration des Ressources Humaines et des Technologies : le défi*, Editeurs : André LANGEVIN, Diane RIOPEL et Pierre LADET, Presses Internationale Polytechnique, Montréal, Québec, 1999.
- [CETIM-99] "Sûreté de Fonctionnement et maîtrise des risques. La maintenabilité.", Ouvrage sous la direction de Philippe BLANCHO et Jacques DURAND, CETIM, Paris, France, 1999.

-
- [Crauet-96] Laurent CRAUET, "Intégration de la sûreté de fonctionnement en conception : Applications aux systèmes de traitement des fluides", *Thèse de Doctorat*, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris, France, 1996.
- [Cuenca-92] A. CUENCA, "Méthode d'attribution des objectifs de sûreté de fonctionnement aux systèmes composants la future base de lancement Ariane et Hermes de Kourou", Safety and Reliability'92, Proceedings of the European Safety and Reliability Conference", pp. 213-224, Elsevier, Amsterdam, Pays Bas, 1992.
- [Darses-94] F. DARSES, "Gestion des contraintes dans la résolution de problème de conception", *Thèse de Doctorat*, Université de Paris VIII-Saint Denis, France, 1994.
- [Delafollie-91] Gérard DELAFOLLIE, "Analyse de la Valeur", Hachette Technique, Paris, France, 1991.
- [Delsaut et al.-99a] Stéphanie DELSAUT-FURON, Damien TRENTESAUX, Christian TAHON, "Industrial State of Art in Logistic Support and Future Trends", International Conference on Industrial Engineering and Production Management, pp.418-425, Glasgow, Royaume Uni, 1999.
- [Delsaut et al.-99b] Stéphanie DELSAUT-FURON, Damien TRENTESAUX, Christian TAHON, "Soutien Logistique Intégré et Méthodologie de conception", Actes des Journées Doctorales en Automatique, pp. 321-324, Nancy, France, 1999.
- [Delsaut et al.-2000] Stéphanie DELSAUT-FURON, Damien TRENTESAUX, Christian TAHON, "Le soutien Logistique Intégré pour la Conception de Systèmes Sûrs de Fonctionnement", 12^{ème} Colloque National de Sûreté de Fonctionnement, pp. 463-471, Montpellier, France, 2000.
- [Deneux et al., 00] Dominique DENEUX, Olivier SENECHAL, Frédéric TOMALA et Massi LAWSON, "Towards a methodology for estimating the global impacts of innovative design scenarii", Knowledge Intensive Computer Aided Design (KI-C 4, Parma, Italy), 21-24 May , 2000.
- [Ducq-99] Yves DUCQ, "Contribution à une méthodologie d'analyse de la cohérence des systèmes de production dans le cadre du modèle GRAI", *Thèse de Doctorat*, Université de Bordeaux I, France, 1999.
- [Fadier-90] Elie FADIER, "Fiabilité humaine : les méthodes d'analyse et domaines d'application", Ed. Jacques LEPLAT et Guy de TERSAC, "Les facteurs humains de la fiabilité dans les systèmes complexes", Octarès Entreprises, pp. 47-80, Paris, France, 1990.
- [Gama-98] Groupe GAMA, "Modélisation des contraintes de fabrication en conception (DFM)", chapitre 2 dans "Conception de produits mécaniques. Méthodes, modèles et outils", sous la direction de Michel TOLLENAERE, Hermès, Paris, France, 1998.

- [Gandois-92] J. GANDOIS, "France : le choix de la performance globale", Rapport de la Commission du onzième Plan sur la compétitivité française, La Documentation Française, Paris, France, 1992.
- [Giachetti-99] Ronald E. GIACHETTI, "A standard manufacturing information model to support design for manufacturing in virtual enterprises", *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol 10/1, pp. 49-60, Kluwer Academic Publishers, Boston, États Unis, 1999.
- [Gormand-86] Claude GORMAND, "Le coût global (Life Cycle Cost). Pour investir plus rationnellement", Edité par Afnor Gestion, Diffusé par Eyrolles, Paris, France, 1986.
- [Grudzien-99] Laurent GRUDZIEN, "Contribution à l'intégration de la sûreté de fonctionnement au sein d'une démarche de conception multimétiers", *Thèse de Doctorat*, Université de Valenciennes, France, 1999.
- [Harani-97] Yasmina HARANI, "Une approche multi-modèles pour la capitalisation des connaissances dans le domaine de la conception", *Thèse de Doctorat*, Université de Metz, France, 1997.
- [Ifaoui et Deneux-99] Nizar IFAOUI et Dominique DENEUX, "Conception à base de caractéristiques de calcul", MICAD'99, 9-12 Février, pp. 45-52, Hermès, Paris, France, 1999.
- [IGL-89] I.G.L. Technology, "SADT, un langage pour communiquer", Editions Eyrolles, Paris, France, 1989.
- [Jacot et Micaelli-96] Jacques-Henri JACOT et Jean-Pierre MICAELLI, "Chapitre I: La question de la performance globale", "La performance économique en entreprise", Coordonnateurs: J.H. JACOT et J.P. MICAELLI, Hermès, Paris, France, 1996.
- [Jacot-95] Jacques-Henri JACOT, "De la terminologie à la problématique de la performance globale", dans "Performance économique et performance globale de l'entreprise – stratégies", Université d'été du pôle Productive Rhône-Alpes sur les "Concepts et ingénieries économiques pour la productique", Aussois, France, 4-8 septembre, 1995.
- [Jacot-97] Jacques-Henri JACOT, "De la trilogie : productivité, compétitivité, rentabilité à l'évaluation sociale de la performance industrielle", dans "Entreprise et performance globale. Outils, évaluation, pilotage", Groupe Présidé par Jacques BARRAUX, Economica, Paris, France, 1997.
- [Jacquet-98] Laurent JACQUET, "Contribution à l'élaboration d'une démarche de spécification fonctionnelle", *Thèse de Doctorat*, Université de Valenciennes, France, 1998.
- [Joly et Muller-94] Michel JOLY et Jean-Louis G. MULLER, "De la gestion de projet au management par projet", AFNOR, Paris, France, 1994.

-
- [Krause et al.-93] F.L. KRAUSE, F. KIMURA, T. KJELLBERG, S.C.Y. LU, "Product modelling", CIRP Annals Manufacturing Technology, vol 42/2, 1993.
- [Lafont-98] Jean LAFONT, "Méthode d'ICS, Intégration de la Conception et du Soutien", Document élaboré par un groupe de travail, ISDF-SOLE, Paris, France, 1998.
- [Larousse-84] Petit Larousse Illustré, Paris, France, 1984.
- [Le Gallou-92] Francis LE GALLOU et Bernadette BOUCHON-MEUNIER, Coordonnateurs, "Systémique, Théorie et applications", Technique & Documentation – Lavoisier, Paris, France, 1992.
- [Le Moigne-94] Jean-Louis LE MOIGNE, "La théorie du système général, Théorie de la modélisation", 4^{ème} édition mise à jour (1^{ère} édition 1977), Presses Universitaires de France, Paris, France, 1994.
- [Lebas-95] M.J. LEBAS, "Performance measurement and performance management", International Journal Production Economics, 41, pp. 99-115, 1995.
- [Lee et Hahn-96] David E. LEE et H. Thomas HAHN, "A coordinated product and process development environment for design for assembly", Proceedings of the 1996 ASME Design Engineering Technical Conference and Computers in Engineering Conference, Irvine, California, Etats Unis, 1996.
- [Lorino-91] Pierre LORINO, "Le contrôle de gestion stratégique. La gestion par les activités", Dunod, Paris, France, 1991.
- [Lorino-97] Pierre LORINO, "Méthodes et pratiques de la performance. Le guide du pilotage", Les Editions d'Organisation, Paris, France, 1997.
- [Maders et al.-98] Henri-Pierre MADERS, Elizabeth GAUTHIER, Cyrille LE GALLAIS, "Conduite un projet d'organisation, guide méthodologique", Editions d'organisation, Paris, France, 1998.
- [Manata-96] Joao Paulo Dos Santos MANATA, "Approche méthodologique de la conception des lignes de production industrielles intégrant les impératifs de maintenance, de performance et de coût global de possession. Application à des équipements sidérurgiques", *Thèse de Doctorat*, Université de Nancy I, France, 1996.
- [Maranzana-99] Roland MARANZANA, pour le consortium IFC2F, "Intégration des fonctions de conception, Calcul et Fabrication IFC2F", 3^{ème} congrès international de génie industriel "L'intégration des ressources humaines et des technologies : le défi", Montréal, Québec, Presses Internationales POLYTECHNIQUE, Québec, Canada, Mai 1999.
- [Meinadier-98] Jean-Pierre MEINADIER, "Ingénierie et intégration des systèmes", Etudes et logiciels informatiques, Hermès, Paris, France, 1998.
- [Mostow-85] J. MOSTOW, "Toward better models of the design process", the AI magazine, Spring, 1985.
-

- [Moubray-91] John MOUBRAY, "RCM II. Reliability Centred Maintenance", Industrial Press Inc., New York, Etats-Unis, 1991.
- [Neubert-97] Gilles NEUBERT, "Contribution à la spécification d'un pilotage proactif et réactif pour la gestion des aléas", *Thèse de Doctorat*, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 1997.
- [O'Connor-91] Patrick D. T. O'CONNOR, "Practical Reliability Engineering", John Wiley and Sons, Chichester, Royaume-Uni, 1991.
- [Pahl et Beitz-84] G. PAHL, W. BEITZ, "Engineering Design", edited by Ken Wallace, published by The Design Council, Londres, Royaume-Uni, 1984.
- [Perrin-99] Jacques PERRIN, "Diversité des représentations du processus de conception, diversité des modes de pilotage de ces processus", dans "Pilotage et évaluation des processus de conception", Jacques PERRIN éditeur, Editions L'Harmattan, Paris, France, 1999.
- [Pesin et al.-97] Philippe PESIN, Damien TRENTESAUX, Christian TAHON, "The event filter concept : a way to improve the reactive management of complex industrial systems", International Conference on Industrial Engineering and Production Management (IEPM), Lyon, France, 1997.
- [Petitdemange-91] Claude PETITDEMANGE, "La maîtrise de la valeur. La gestion de projet et l'ingénierie simultanée.", AFNOR Gestion, Paris, France, 1991.
- [Pomerol et Barba-Romero-93] Jean-Charles POMEROL et Sergio BARBA-ROMERO, "Choix multicritère dans l'entreprise. Principe et pratique.", Collection informatique, Hermès, Paris, France, 1993.
- [Pons et Chevalier-93] Jacques PONS et Pascal CHEVALIER, "La logistique intégrée", Collection Systèmes d'information, Hermès, Paris, France, 1993.
- [Prévost et Waroquier-94] Michel PREVOST et Charles WAROQUIER, "L'analyse du soutien logistique et son enregistrement", Technique & Documentation - Lavoisier, Paris, France, 1994.
- [Sénéchal-96] Olivier SENECHAL, "Proposition d'une méthodologie pour l'aide à l'estimation des performances physico-économiques des systèmes de production dans une approche concourante", *Thèse de Doctorat*, Université de Valenciennes, France, 1996.
- [Shirose-94] Kunio SHIROSE, "Le guide TPM de l'unité de travail", Dunod, Paris, France, 1994.
- [Sourisse et Klaye-99] Claude SOURISSE et François KLAYE, "Management des moyens de production. Efficacité, disponibilité, rentabilité", Hermès, Paris, France, 1999.

- [Stephanopoulos-89] G. STEPHANOPOULOS, "Artificial intelligence and symbolic computing in process engineering and design", Proceedings of the 3rd International Conference on Foundation of Computer-Aided design, Snowmass Village, pp. 21-47, Colorado, Etats Unis, 1989.
- [Suh-90] Nam P. SUH, "The principles of design", Oxford University Press, Oxford, Royaume Uni, 1990.
- [Tiger et Millet-98] Henri TIGER et Dominique MILLET, "Conception pour l'environnement : inventer de nouveaux outils et de nouveaux systèmes d'action", Chapitre 10 dans "Conception de produits mécaniques. Méthodes, modèles et outils", sous la direction de Michel TOLLENAERE, Hermès, Paris, France, 1998.
- [Trentesaux-96] Damien TRENTESAUX, "Conception d'un système pilotage distribué, supervisé et multicritère pour les systèmes automatisés", *Thèse de Doctorat*, Université de Valenciennes, France, 1996.
- [Villemeur-88] Alain VILLEMEUR, "Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels", Editions Eyrolles, Paris, France, 1988.
- [Yoshikawa-89] H. YOSHIKAWA, "Design philosophy : the state of the art", CIRP Annals Manufacturing Technology, vol 38/2, pp.579-586, 1989.
- [Zeid-91] Ibrahim ZEID, "CAD/CAM theory and practice", Series in Mechanical Engineering, McGraw Hill Inc., Etats unis, 1991.
- [Zwingelstein-96] Gilles ZWINGELSTEIN, "La maintenance basée sur la fiabilité. Guide pratique d'application de la RCM", Collection Diagnostic et Maintenance, Hermès, Paris, France, 1996.

Sigles et Abréviations

| | |
|----------------|---|
| AMDE(C) | Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets (et de leur Criticité) |
| ASL | Analyse du Soutien Logistique |
| AV | Analyse de la Valeur |
| CCG | Conception à Coût Global |
| CCO | Conception à Coût Objectif |
| CD | Cost Deployment |
| CDCC | Cahier des Charges Concepteur |
| CdCF | Cahier des Charges Fonctionnel |
| ICS | Intégration de la Conception et du Soutien |
| ISDF | Institut de Sûreté De Fonctionnement |
| LCC | Life Cycle Cost |
| MBF | Maintenance Basée sur la Fiabilité |
| PDS | Pilotage du Développement des Systèmes |
| QFD | Quality Function Deployment |
| RCM | Reliability Centred Maintenance |
| RD | Reliability Deployment |
| SdF | Sûreté de Fonctionnement |
| SLI | Soutien Logistique Intégré |
| SOLE | Society of Logistic Engineers |
| STB | Spécification Technique du Besoin |
| TQ | Technology Deployment |
| TPM | Total Productive Maintenance |
| TQC | Total Quality Control |
| TQM | Total Quality Management |

Glossaire

Analyse de la valeur : Méthode de compétitivité, organisée et créative, visant la satisfaction du besoin de l'utilisateur par une démarche spécifique de conception à la fois fonctionnelle, économique et pluridisciplinaire NF X 50-150 [AFNOR-94].

Analyse fonctionnelle : Démarche qui consiste à rechercher, ordonner, caractériser, hiérarchiser et/ou valider les fonctions NF X 50-150 [AFNOR-94].

Arborescence fonctionnelle : Résultat de la décomposition fonctionnelle du système [Meinadier-98].

Arborescence logistique : Arborescence produit complétée par les produits logistiques [Meinadier-98].

Arborescence produit : Résultat de la décomposition organique du système [Meinadier-98].

Cahier des charges : Terme générique pour désigner un document rassemblant les obligations et les éléments nécessaires pour définir un besoin et les principales contraintes à respecter pour le satisfaire NF X 50-106-2 [AFNOR-94].

Cahier des charges fonctionnel : Document par lequel le demandeur exprime son besoin (ou celui qu'il est chargé de traduire) en terme de fonctions de services et de contraintes. Pour chacune d'elles sont définis des critères d'appréciation et leurs niveaux. Chacun de ces niveaux doit être assorti d'une flexibilité NF X50-151 [AFNOR-94].

Coût Global de Cycle de Vie : Coût global de possession d'un système auquel on soustrait les taxes diverses et la marge commerciale du constructeur.

Coût Global de Possession : Somme des dépenses engagées par un utilisateur sur le cycle de vie du système.

Critère d'appréciation d'une fonction : Caractère retenu pour apprécier la manière dont une fonction est remplie ou une contrainte respectée NF X 50-150 [AFNOR-94].

Criticité : Mesure d'un risque exprimée par le produit de sa probabilité d'occurrence par la gravité ou sévérité de ses conséquences [Meinadier-98].

Cycle de vie : organisation phasée des activités qui jalonnent la vie du système depuis l'émergence de son besoin jusqu'à son obsolescence ou son retrait de service [Meinadier-98].

Disponibilité : Aptitude d'un produit à être en état d'accomplir une fonction requise, à un instant donné, dans des conditions données et pendant un intervalle de temps donné, compte tenu du système de soutien mis en place NF X 60-500 [AFNOR-88].

Disponibilité effective : aptitude du produit à effectuer une fonction requise dans des conditions données et à un instant donné, tenant compte des modes dégradés acceptables par l'utilisateur [Lafont-98].

Efficacité opérationnelle : elle caractérise la performance opérationnelle moyenne du produit, calculé à partir de paramètres de maintenance corrective et préventive pondérés par l'essentialité [Lafont-98].

Fiabilité : Aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise dans des conditions données, pendant un intervalle de temps donné NF X 60-500 [AFNOR-88a].

Flexibilité d'un niveau : ensemble d'indications exprimées par le demandeur sur les possibilités de moduler le niveau recherché pour un critère d'appréciation NF X 50-150 [AFNOR-94].

Fonctions : Actions d'un produit ou de l'un de ses constituants exprimées exclusivement en terme de finalité NF X 50-150 [AFNOR-94].

Maintenabilité : Aptitude d'une entité, dans des conditions données d'utilisation à être maintenue ou rétablie, sur un intervalle de temps donné, dans un état dans lequel elle peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits NF X 60-010 [AFNOR-88a].

Maintenance : Ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié dans les périodes ultérieures NF X 60-110 [AFNOR88].

Méthode : Ensemble de démarches s'appuyant sur des modèles, les transformant et les intégrant, permettant de réaliser tout ou partie du passage de l'expression d'un besoin à la définition d'une solution à ce besoin [Meinadier-98]. Ensemble d'outils organisés entre eux suivant une certaine démarche NF X 50-150 [AFNOR-94].

Méthode de conception : ensemble d'activités ordonnées et structurées mises en œuvre lors de la phase de conception d'un produit pour répondre à un besoin. Une méthode de conception comporte un modèle de produit et un processus de conception mettant en œuvre ce modèle de produit.

Méthodologie : Etude des méthodes que les sciences utilisent [Larousse-84].

Modèle : Système plus ou moins homomorphe au système à étudier ou construire, qui en donne une vue partielle plus ou moins abstraite et permet d'en étudier certaines caractéristiques [Meinadier-98].

Niveau d'un critère d'appréciation : Grandeur repérée dans l'échelle adoptée pour un critère d'appréciation d'une fonction. Cette grandeur peut être celle recherchée en tant qu'objectif ou celle atteinte pour une solution proposée NF X 50-150 [AFNOR-94].

Performance globale : Performance estimée ou calculée sur la totalité du cycle de vie de l'entité considérée, en prenant en compte les aspects physiques et économiques de l'entité, de son système de soutien et du système de production qui les génère.

Piloter : (1) Définir et mettre en œuvre des méthodes qui permettent d'apprendre, ensemble : à agir ensemble de manière performante, à agir ensemble de manière de plus en plus performante [Lorino-97]. (2) Accomplir de manière continue deux fonctions complémentaires : déployer la stratégie en règles d'actions opérationnelles (déploiement) et capitaliser les résultats et les enseignements de l'action pour enrichir la réflexion sur les objectifs (retour d'expérience) [Lorino-97].

Processus : (1) Ensemble des phénomènes conçus comme une chaîne causale progressive [Larousse-84]. (2) Enchaînement de tâches concourant à l'obtention d'un résultat défini, RG Aéro 000 40 [AFNOR-94]. (3) Ensemble d'activités reliées entre elles par des flux d'information ou de matière significatifs, et qui se combinent pour fournir un produit matériel ou immatériel important et bien défini [Lorino-97]. (4) Enchaînement logique d'activités avec critères de transition entre activités, défini en vue d'aboutir à un résultat par progression d'activité en activité [Meinadier-98].

Processus de conception : Le processus de conception comporte deux processus : le processus de conception préliminaire et le processus de conception détaillée. Le processus de conception préliminaire est l'ensemble des tâches permettant d'explorer les divers concepts de solutions pour aboutir au choix de la solution optimale. Le processus de conception détaillée est l'ensemble des tâches destinées à [AFNOR-94]:

- Mettre en place et valider les moyens et les méthodes de conception,
- Elaborer un dossier de définition suffisamment structuré pour permettre de fabriquer, utiliser et soutenir des exemplaires du produit compte tenu des impératifs industriels,
- Concevoir et valider les moyens et méthodes de formation, d'utilisation et de soutien nécessaires à la mise en œuvre opérationnelle du produit,
- S'assurer que la conception est terminée et que les justifications sont suffisantes,

- Réaliser les premiers exemplaires du produit et les mettre au point, en vue de la qualification de la définition.

Processus de qualification : Ensemble des tâches qui concourent à fournir des preuves en se basant sur des justifications théoriques et expérimentales que le produit défini répond au besoin spécifié et est productible RG Aéro 000 40 [AFNOR-94].

Produit : Ce qui est (ou sera) fourni à un utilisateur pour répondre à son besoin. Résultat d'une activité, il peut être un matériel, un service, un système, un ouvrage, un processus industriel ou administratif (procédé, logiciel, procédure, etc.) ou toute combinaison de ceux-ci NF X 50-150 [AFNOR-94].

Profit Global de Possession : le profit global de possession est, en faisant abstraction des subtilités comptables et en utilisant des francs constants, le résultat de la soustraction entre les gains et les coûts sur l'ensemble du cycle de vie de l'équipement [Manata-96].

Projet : Processus de mise en œuvre de ressources mobilisées en vue du développement d'un système doté de fonctions, performances et aptitudes définies, dans des conditions de coût et délai fixées [Meinadier-98].

Sécurité : Aptitude d'un produit à respecter, pendant toutes les phases de sa vie, un niveau acceptable de risques d'accident susceptible d'occasionner une agression du personnel ou une dégradation majeure du produit ou de son environnement RG Aéro 000 40 [AFNOR-94].

Système : Ensemble structuré de produits constitutifs et faisant l'objet d'un cycle de vie. Il est constitué du système principal et du système de soutien RG Aéro 000 40 [AFNOR-94].

Tâche : Description de ce qu'il convient d'accomplir dans des conditions fixées, pour obtenir un résultat attendu et identifié RG Aéro 000 40 [AFNOR-94].

Valeur : jugement porté sur le produit sur la base des attentes et des motivations de l'utilisateur, exprimé par une grandeur qui croît lorsque, toute chose égale par ailleurs, la satisfaction du besoin de l'utilisateur augmente et/ou que la dépense afférente au produit diminue NF X 50-150 [AFNOR-94].

Table des matières

| | |
|---|----------|
| Introduction générale | 1 |
| Chapitre I. De la performance globale d'un produit..... | 3 |
| Introduction | 3 |
| I. Système, cycle de vie | 3 |
| I.1. Définition d'un système | 4 |
| I.1.1. Quelques définitions existantes | 4 |
| I.1.2. Système principal..... | 4 |
| I.1.3. Logistique de soutien et système de soutien logistique | 5 |
| I.1.4. Analyse des définitions..... | 7 |
| I.2. Cycle de vie d'un produit..... | 8 |
| II. Performance et performance globale | 10 |
| II.1. Caractérisation de la performance globale..... | 11 |
| II.1.1. Axe cycle de vie | 11 |
| II.1.2. Axe composition et acteurs intervenants..... | 12 |
| II.1.3. Axe évaluation..... | 12 |
| II.2. Performance sur le cycle de vie (P1)..... | 12 |
| II.3. Performance en fonction de la composition et des acteurs (P2) | 14 |
| II.4. Evaluation de la performance globale du produit (E(P1, P2))..... | 15 |
| II.4.1. La composante physique de la performance globale..... | 15 |
| II.4.2. La composante économique de la performance globale | 16 |
| II.5. Synthèse | 18 |
| II.6. Problématique de la recherche de la performance globale..... | 19 |
| III. Méthodes de conception | 21 |
| III.1. Typologie des méthodes de conception | 21 |
| III.2. Etat de l'art des méthodes de conception | 23 |
| III.2.1. Le Design For Manufacturing (DFM) | 23 |
| III.2.2. Le management total de la qualité (TQM)..... | 24 |
| III.2.3. La Conception à Coût Objectif (CCO) | 25 |

| | |
|--|-----------|
| III.2.4. Le Soutien Logistique Intégré | 26 |
| III.2.5. Démarche de conception simultanée Sûreté de Fonctionnement et Soutien Logistique Intégré..... | 28 |
| III.2.6. Démarche globale de conception de produits nouveaux | 29 |
| III.2.7. Démarche de conception multimétiers | 31 |
| III.3. Synthèse..... | 32 |
| Conclusion | 34 |
| Chapitre II. Modèle de produit..... | 35 |
| Introduction..... | 35 |
| I. Spécification d'un modèle de produit global | 35 |
| I.1. Niveau 1 : Représentation du besoin..... | 39 |
| I.1.1. Modèle initial | 39 |
| Les fonctions de service..... | 40 |
| Les contraintes globales..... | 40 |
| I.1.2. Spécifications du niveau de représentation du besoin..... | 40 |
| I.2. Niveau 2 : représentation des exigences fonctionnelles du besoin | 42 |
| I.2.1. Modèle initial | 42 |
| Les fonctions opératoires | 42 |
| Les modes de marche et les modes de défaillance..... | 44 |
| I.2.2. Spécification du niveau de représentation des exigences fonctionnelles ... | 45 |
| I.3. Niveau 3 : représentation technologique..... | 46 |
| I.3.1. Modèle initial | 46 |
| Fonctions de base..... | 46 |
| Les solutions technologiques | 47 |
| I.3.2. Spécification du niveau de représentation technologique | 48 |
| I.4. Niveau 4 : représentation technique et niveau 5 : représentation détaillée | 48 |
| I.4.1. Modèle initial | 48 |
| I.4.2. Spécification des niveaux de représentation technique et détaillée | 49 |
| I.5. Synthèse | 50 |
| II. Proposition d'un modèle de produit global..... | 50 |
| II.1. Niveau 1 : Représentation du besoin | 50 |
| II.1.1. Contraintes globales..... | 53 |
| II.1.2. Les fonctions de soutien..... | 54 |
| II.1.3. Les fonctions ressources | 55 |
| II.1.4. Intégration des fonctions et ressources du soutien..... | 56 |
| II.2. Niveau 2 : représentation des exigences fonctionnelles du besoin..... | 58 |
| II.2.1. Les fonctions opératoires de soutien..... | 59 |
| II.2.2. Intégration des fonctions opératoires de soutien..... | 60 |
| II.2.3. Les fonctions ressources | 63 |
| II.2.4. Les modes de marches et les modes de défaillance | 65 |
| II.3. Niveau 3 : représentation technologique | 66 |

| | |
|---|------------|
| II.3.1. Fonctions de base de soutien | 66 |
| II.3.2. Les solutions technologiques..... | 67 |
| Conclusion..... | 68 |
| Chapitre III. Processus de conception..... | 69 |
| Introduction | 69 |
| I. Processus de conception initial et spécifications | 69 |
| I.1. Méta-modèle d'élaboration des concepts..... | 69 |
| I.2. Spécification d'un processus de conception | 72 |
| II. Proposition d'un processus de conception | 73 |
| II.1. Processus de conception et pilotage..... | 74 |
| II.2. Processus de conception et projet | 76 |
| II.3. Processus de conception..... | 78 |
| II.3.1. Cadrage du produit à concevoir..... | 78 |
| II.3.1.1 Initialisation de la conception..... | 79 |
| II.3.1.2 Lancement de la conception | 86 |
| II.3.2. Piloter la conception..... | 87 |
| II.3.2.1 Niveau 2 : représentation des exigences fonctionnelles | 89 |
| II.3.2.2 Niveau 3 : représentation technologique | 95 |
| II.3.2.3 Niveaux 4 et 5 : représentation technique et détaillée | 98 |
| II.3.3. La conclusion de la conception | 100 |
| Conclusion..... | 101 |
| Chapitre IV. Application et validation..... | 103 |
| Introduction | 103 |
| I. Application..... | 103 |
| I.1. Présentation du contexte d'application | 103 |
| I.2. Cadrage du système à concevoir | 105 |
| I.2.1. Initialisation de la conception..... | 105 |
| I.2.1.1 Choix de la structure organisationnelle..... | 105 |
| I.2.1.2 Analyse du cahier des charges | 106 |
| I.2.1.3 L'analyse du retour d'expérience..... | 111 |
| I.2.2. Le lancement de la conception | 113 |
| I.3. Pilotage de la conception..... | 113 |
| I.3.1. Niveau 2 de représentation | 114 |
| I.3.2. Niveau 4 de représentation | 122 |
| I.4. Conclusion de la conception..... | 126 |
| II. Validation..... | 126 |

| | |
|---|------------|
| III. Synthèse et perspectives..... | 128 |
| Conclusion | 129 |
| Conclusion générale | 131 |
| Bibliographie..... | 133 |
| Sigles et Abréviations..... | 140 |
| Glossaire..... | 141 |
| Table des matières..... | 145 |
| Table des Illustrations..... | 150 |
| Liste des tableaux | 153 |
| Annexes | 155 |
| IV. Les outils de la conception..... | 155 |
| IV.1. L’outil d’adéquation fonctionnelle..... | 155 |
| IV.2. La Sûreté de Fonctionnement..... | 155 |
| IV.3. L’Analyse de la Valeur | 158 |
| IV.4. Méthode d’Intégration de la Conception et du Soutien ICS : un nouvel outil | 159 |
| V. Les méthodes d’estimations prévisionnelles des caractéristiques de SdF..... | 161 |
| V.1. L’Analyse Préliminaire des Risques, des Dangers (APR, APD) | 161 |
| V.2. L’Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE) | 161 |
| V.3. L’analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC)..... | 162 |
| V.4. La Méthode des Combinaisons des Pannes Résumées (MCPR)..... | 162 |
| V.5. La méthode d’analyse HAZOP (HAZard and OPerability Study)..... | 163 |
| V.6. La Méthode du Diagramme de Succès ou de Fiabilité (MDS/MDF)..... | 163 |
| V.7. La Méthode de l’arbre des causes ou de Défaillance (MAC/MAD)..... | 163 |
| V.8. La méthode de la Table de Vérité et de la Table de Décision (MTV/MTD) . | 164 |
| V.9. La Méthode de l’Arbre des Conséquences ou des Arbres d’Evénements (MACQ/MAE) | 164 |

| | |
|---|-----|
| V.10. La Méthode du Diagramme Causes-Conséquences (MDCC), | 165 |
| V.11. La Méthode de l'Espace des Etats (MEE) | 165 |
| VI. Les critères de conception d'un système maintenable | 165 |
| VI.1. Détectabilité / Testabilité..... | 165 |
| VI.2. Accessibilité / Identification / Repérage / Visibilité..... | 166 |
| VI.3. Aptitude à la pose / dépose / Connectique / Démontabilité / Modularité / Interchangeabilité / Standardisation..... | 166 |
| VI.4. Manutention / Réglages / Etalonnage / Nettoyage | 167 |
| VII. Les Built-in Test ou Tests intégrés | 167 |
| VIII. La Maintenance Basée sur la Fiabilité..... | 168 |

Table des Illustrations

| | |
|---|----|
| Figure 1.1 : Les fonctions et ressources du soutien logistique. | 6 |
| Figure 1.2 : Le processus itératif de décomposition des systèmes principaux et de soutien. | 6 |
| Figure 1.3 : Cycle de vie d'un produit [Deneux et al.-2000]..... | 8 |
| Figure 1.4 : Caractérisation de la performance globale. | 11 |
| Figure 1.5 : Impact des décisions prises en phases de conception et de production sur le cycle de vie. | 13 |
| Figure 1.6 : Performance externe et performance interne. | 14 |
| Figure 1.7 : Evolutions des coûts par rapport au cycle de vie d'un produit. | 20 |
| Figure 1.8 : Les phases de l'Analyse du Soutien Logistique [Blanchard-92] | 27 |
| Figure 1.9 : Modèle de produit [Grudzien-99] | 31 |
| Figure 2.1 : Schéma générique. | 37 |
| Figure 2.2 : Représentation générique des cinq niveaux de représentation du modèle de produit..... | 38 |
| Figure 2.3 : Représentation du niveau 1 du modèle de produit. | 39 |
| Figure 2.4 : Représentation du niveau 2 du modèle de produit. | 42 |
| Figure 2.5 : Exemple de chaîne opératoire. | 43 |
| Figure 2.6 : Exemple de décomposition de la fonction "arrêter"..... | 44 |
| Figure 2.7 : Représentation du niveau 3 du modèle de produit. | 46 |
| Figure 2.8 : Représentation des niveaux 4 et 5 du modèle de produit. | 49 |
| Figure 2.9 : Représentation du niveau 1 du modèle de produit global. | 52 |
| Figure 2.10 : Fonctions et ressources du soutien. | 54 |
| Figure 2.11 : Représentation du niveau 2 du modèle de produit global. | 59 |
| Figure 2.12 : Exemple partiel de décomposition du niveau 2 du modèle de produit global. | 61 |
| Figure 2.13 : Représentation de l'intégration d'une fonction ressource au niveau 3 du modèle de produit global. | 64 |

| | |
|---|-----|
| Figure 2.14 : Représentation du niveau 3 du modèle de produit global..... | 66 |
| Figure 3.1 : Méta-modèle d'élaboration des concepts..... | 70 |
| Figure 3.2 : Exemple de réseau de Petri associé au niveau Représentation des besoins. .. | 72 |
| Figure 3.3 : Modèle fondamental du pilotage. | 74 |
| Figure 3.4 : Modèle fondamental de pilotage et fonctions génériques du méta-modèle d'élaboration des concepts..... | 75 |
| Figure 3.5 : Schéma descriptif du contenu de la proposition..... | 77 |
| Figure 3.6 : Schéma global de l'enchaînement des étapes du processus de conception..... | 78 |
| Figure 3.7 : Enchaînement des activités du cadrage du produit à concevoir. | 79 |
| Figure 3.8 : Enchaînement des étapes d'initialisation de la conception. | 79 |
| Figure 3.9 : Modèle de pilotage associé à l'initialisation de la conception..... | 80 |
| Figure 3.10 : Modèle de pilotage pour le niveau représentation du besoin. | 82 |
| Figure 3.11 : Enchaînement des étapes du niveau 1 de représentation..... | 84 |
| Figure 3.12 : Enchaînement des étapes de l'analyse du retour d'expérience..... | 85 |
| Figure 3.13 : Modèle de pilotage de la phase de lancement de la conception. | 86 |
| Figure 3.14 : Enchaînement des activités du lancement de la conception. | 87 |
| Figure 3.15 : Modèle de pilotage de la conception du produit..... | 87 |
| Figure 3.16 : Activités de l'étape de pilotage de la conception..... | 88 |
| Figure 3.17 : Modèle d'élaboration des concepts du niveau Représentation des exigences fonctionnelles. | 90 |
| Figure 3.18 : Activités du niveau de représentation des exigences fonctionnelles..... | 91 |
| Figure 3.19 : Modèle de pilotage du niveau de représentation technologique..... | 95 |
| Figure 3.20 : Représentation de la coordination des activités du niveau 3. | 96 |
| Figure 3.21 : Modèle de pilotage du niveau de représentation technologique automatique. | 97 |
| Figure 3.22 : Modèle de pilotage du niveau de représentation technologique maintenance. | 97 |
| Figure 3.23 : Enchaînement des activités du niveau de représentation technologique..... | 98 |
| Figure 3.24 : Modèle de pilotage du niveau de représentation technique..... | 99 |
| Figure 3.25 : Enchaînement des activités des niveaux de représentation technique et détaillée. | 100 |
| Figure 4.1 : Schéma d'un élément bicaisse automoteur à deux niveaux..... | 104 |
| Figure 4.2 : Exemple d'une unité multiple composée de trois éléments..... | 104 |
| Figure 4.3 : Les étapes de l'initialisation de la conception..... | 105 |

| | |
|--|-----|
| Figure 4.4 : Schéma de pilotage des activités de l'initialisation de la conception. | 106 |
| Figure 4.5 : Enchaînement des activités d'analyse du cahier des charges. | 107 |
| Figure 4.6 : Schéma de pilotage du niveau 1 de représentation du cas d'étude. | 108 |
| Figure 4.7 : Niveau 1 associé au cas d'étude..... | 110 |
| Figure 4.8 : Enchaînement des activités d'analyse du retour d'expérience. | 111 |
| Figure 4.9 : Modèle de pilotage de la conception sur le cas expérimental. | 113 |
| Figure 4.10 : Enchaînement des activités de pilotage de la conception. | 114 |
| Figure 4.11 : Modèle de pilotage du niveau 2 – cas expérimental. | 114 |
| Figure 4.12 : Enchaînement des activités du niveau 2 – cas d'étude. | 115 |
| Figure 4.13 : Schéma simplifié des éléments du système de freinage complet d'un élément bicaïsse automoteur..... | 116 |
| Figure 4.14 : Schéma du système de freinage pour la motrice. | 116 |
| Figure 4.15 : Schéma du système de freinage pour la remorque. | 117 |
| Figure 4.16 : Extrait du niveau 2 de représentation du modèle de produit – cas d'étude. (Les modes de marches et de défaillance n'apparaissent pas, pour plus de clarté).. | 119 |
| Figure 4.17 : Logigramme de sélection des tâches de maintenance type RCM. | 123 |
| Figure 4.18 : Cinétiques de dégradation des matériels. | 123 |
| Figure A1 : La conception optimale d'un système et de son système de soutien [Lafont-98]..... | 160 |
| Figure A2 : Démarche Intégration de la Conception et du Soutien [Lafont-98]. | 160 |

Liste des tableaux

| | |
|--|-----|
| Tableau 1.1 : Liste des abréviations..... | 17 |
| Tableau 1.2 : Tableau de synthèse des méthodes de conception présentées..... | 33 |
| Tableau 2.1 : Description des items et attributs des cinq niveaux de représentation du modèle de produit..... | 37 |
| Tableau 2.2 : Description des items et attributs du niveau 1 du modèle de produit. | 39 |
| Tableau 2.3 : Description des items et attribut du niveau 2 du modèle de produit..... | 42 |
| Tableau 2.4 : Description des items et attributs du niveau 3 du modèle de produit. | 46 |
| Tableau 2.5 : Description des items et attributs des niveaux 4 et 5 du modèle de produit. | 49 |
| Tableau 2.6 : Description des items et attributs du niveau 1 du modèle de produit global. | 51 |
| Tableau 2.7 : Description des items et attribut du niveau 2 du modèle de produit global. | 58 |
| Tableau 2.8 : Description des items et attributs du niveau 3 du modèle de produit global. | 66 |
| Tableau 3.1 : Caractérisation des fonctions. | 83 |
| Tableau 3.2 : Tableau d'analyse du retour d'expérience..... | 85 |
| Tableau 3.3 : Tableau de criticité des dysfonctionnements. | 93 |
| Tableau 3.4 : Tableau d'analyse dysfonctionnelle..... | 94 |
| Tableau 4.1 : Extrait de l'analyse du cahier des charges. | 109 |
| Tableau 4.2 : Description des items et attributs extraits du niveau 1 de représentation du système train..... | 110 |
| Tableau 4.3 : Extrait de l'analyse du retour d'expérience..... | 112 |
| Tableau 4.4 : Description des fonctions opératoires du niveau 2 de représentation du freinage du système train. | 118 |
| Tableau 4.5 : Description des fonctions opératoires de soutien associées à la fonction <i>FSL2 = Plan de maintenance</i> | 119 |
| Tableau 4.6 : Grille de criticité définie pour le cas d'étude expérimentale. | 120 |
| Tableau 4.7 : Analyse des dysfonctionnements : extrait du tableau des résultats..... | 121 |

Liste des tableaux

Tableau 4.8 : Extrait de la sélection des tâches de maintenance sur la fonction freinage.
..... 124

Tableau 4.9 : Extrait du bilan technico-économique sur une partie du système de freinage.
..... 125

IV. Les outils de la conception

Les outils de la conception sont communément admis et utilisés. A chaque adéquation recherchée correspond un ou plusieurs outils [Manata-96]. Nous les présentons ici.

IV.1. L'outil d'adéquation fonctionnelle

Les méthodes d'Analyse Fonctionnelle permettent de décrire les caractéristiques d'un système et les fonctions qu'on en attend [Fadier-90][Grudzien-99]. Cette recherche peut être menée de différentes façons. Par exemple [Delafollie-91] :

- La méthode FAST, qui vise particulièrement à conduire l'analyse d'un produit existant, et qui consiste à en retrouver les fonctions techniques,
- La méthode intuitive qui consiste en une recherche intuitive du besoin et des fonctions de service du système (conçu ou à concevoir), complétée par des analyses (de séquences, des mouvements, de l'environnement, d'un produit type et d'un règlement et des normes),
- La méthode d'inventaire systématique du milieu environnant, propriété de la société APTE qui distingue trois étapes : 1) la recherche du besoin fondamental, 2) la recherche des milieux extérieurs, 3) la recherche des différentes fonctions de base (principales et de contraintes).

IV.2. La Sûreté de Fonctionnement

La sûreté de fonctionnement est l'outil permettant d'atteindre l'adéquation technique du système avec les besoins de l'utilisateur en termes de performances physiques. En effet, la Sûreté de Fonctionnement est la "science des défaillances". Elle correspond à l'aptitude d'un système, au maintien dans le temps de la qualité du service qu'il délivre. Elle consiste à connaître, évaluer, prévoir, mesurer et maîtriser les défaillances d'un système [Zwingelstein-96]. Il s'agit d'un concept global qui comprend

principalement les caractéristiques de fiabilité (aptitude à la non défaillance), de maintenabilité (aptitude à la réparation), de disponibilité (aptitude à l'emploi) et de sécurité (aptitude à la non-agression des individus et de l'environnement) [Villemeur-88][Prévoist et Waroquier-94][Aoussat-96][Bétourné et Van der Vliet-98]. Nous définissons rapidement ces caractéristiques.

La fiabilité est l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise dans des conditions données, pendant un intervalle de temps donné NF X 60-500 [AFNOR-88]. La connaissance des caractéristiques de fiabilité des systèmes a été rendue nécessaire par plusieurs facteurs, dont la complexité croissante des systèmes, le développement des études de gestion des matériels et de leur cycle de vie... Tout cela tend à imposer une quantification de la fiabilité mesurée par la probabilité qu'une entité E accomplisse une fonction requise, dans des conditions données, pendant l'intervalle de temps [0,t] [Villemeur-88] :

$$R(t) = P[E \text{ non défaillante sur } [0,t]]$$

Ainsi il est possible d'évaluer les risques, les besoins de maintenance, les moyens logistiques... nécessaires tout au long du cycle de vie des systèmes. [Boucly et Ogus-87]NF X 06-501 [AFNOR-88].

On distingue [Villemeur-88][Bon-95][Zwingelstein-96] :

- la fiabilité opérationnelle (ou fiabilité observée ou estimée), obtenue ou déduite à partir de l'exploitation du retour d'expérience (observation et analyse du comportement d'entités identiques dans des conditions opérationnelles),
- la fiabilité prévisionnelle (ou fiabilité prédite), correspondant à la fiabilité future d'un système connaissant les fiabilités de ses composants. Elle est estimée en phase de conception de façon théorique ou expérimentale,
- la fiabilité extrapolée déduite de la fiabilité opérationnelle par extrapolation ou interpolation pour des conditions de contraintes ou des durées différentes,
- la fiabilité intrinsèque ou inhérente, découlant directement des paramètres de conception. Sans modification de conception des entités, la maintenance visera à maintenir la fiabilité opérationnelle à un niveau au plus égal à la fiabilité intrinsèque.

La détermination et la prédiction de la fiabilité, et les analyses constituent une entrée majeure de la conception des systèmes pour la maintenabilité [Blanchard et al.-95].

La maintenabilité est l'aptitude d'une entité, dans des conditions données d'utilisation à être maintenue ou rétablie, sur un intervalle de temps donné, dans un état

dans lequel elle peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits NF X 60-010 [AFNOR-88]. Dans [Villemeur-88], la maintenabilité est définie comme la probabilité que la maintenance d'une entité E accomplie dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits, soit achevée au temps t, sachant que l'entité est défaillante au temps $t=0$:

$$M(t) = P[\text{la maintenance de E est achevée au temps t sachant que E est défaillante à } t=0]$$

$$= P[E \text{ est réparée sur } [0,t], E \text{ étant défaillante à } t=0]$$

Les caractéristiques de maintenabilité d'un système doivent représenter la relative facilité avec laquelle un système peut être conservé en condition opérationnelle ou restauré après défaillance. La maintenabilité est donc un attribut fondamental de la conception d'un système [ARINC-95][O'Connor-91].

La sécurité est l'aptitude d'une entité à ne pas générer, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques [Villemeur-88][Prévost et Waroquier-94].

La disponibilité est l'aptitude d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou pendant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs est assurée NF X 60-500 [AFNOR-88].

La disponibilité opérationnelle d'un système est la probabilité que le système fonctionne correctement au moment où l'utilisateur en a besoin. En d'autres termes, elle est généralement mesurée par la probabilité qu'une entité E soit en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données et à un instant t donné [Villemeur-88] :

$$A(t) = P[E \text{ non défaillante à l'instant t}]$$

On distingue plusieurs types de disponibilité [BTE-92][Boucly-88][Sourisse et Klaye-99]:

- la disponibilité intrinsèque / constructeur dépend seulement des caractéristiques de fiabilité et de maintenabilité d'un système, elle détermine la disponibilité opérationnelle prévisionnelle,

- la disponibilité opérationnelle réelle prend en compte les divers facteurs caractérisant l'efficacité réelle de l'organisation et des moyens de la maintenance (politique et logistique de soutien), ainsi que les conditions effectives d'utilisation.

L'analyse de la sûreté de fonctionnement est décrite dans [Grudzien-99]. Elle se décompose en quatre principales étapes successives. L'objectif est de rechercher la probabilité d'occurrence ainsi que la gravité des conséquences des événements redoutés au niveau du système à concevoir. En particulier l'analyse des caractéristiques de Sûreté de Fonctionnement en général (fiabilité, maintenabilité, disponibilité) permet une meilleure connaissance des systèmes et les diverses évaluations menées permettent de dimensionner correctement l'architecture et la mise en œuvre des systèmes. L'évaluation est menée au niveau du système complet, et non plus de ses seuls constituants, afin de maîtriser la disponibilité du service rendu à l'utilisateur, dès la phase de conception. Elle n'est plus considérée comme une étape de vérification contractuelle, mais peut être utilisée à des fins d'optimisation pour diminuer le coût global de cycle de vie des systèmes [Cabarbaye et al.-99]. Elle utilise d'autres modèles et méthodes : inductifs (Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets), déductifs (Arbre de Défaillance), événementielles par états (Réseaux de Pétri, graphe de Markov), statistiques, simulations [Aoussat-96]. Le lecteur intéressé par une description de ces outils pourra se reporter aux références suivantes [Villemeur-88][Akao-93][AFNOR-94][Prévost et Waroquier-94][Zwengelstein-96].

IV.3. L'Analyse de la Valeur

L'analyse de la valeur est définie par l'Association Française pour l'Analyse de la Valeur comme "une méthode de compétitivité, organisée et créative, visant la satisfaction du besoin de l'utilisateur par une démarche spécifique de conception à la fois fonctionnelle, économique et pluridisciplinaire" NF X 50-150 [AFAV-89][Petitdemange-91][AFNOR-94]. Besoin, fonction, coût, valeur sont les quatre mots qui résument les notions fondamentales et permettent de donner une définition correcte de l'Analyse de la Valeur.

L'Analyse de la Valeur a pour but d'aider à concevoir et réaliser un système au moindre coût. La méthode comporte sept phases [Petitdemange-91] et NF X 50-152 et X 50-153 [AFNOR-94].

La phase 1 consiste à définir les orientations de l'analyse de la valeur, c'est à dire à préciser l'objet de l'analyse, les données du problème, les enjeux (économiques, technologiques...), les limites et les contraintes, les objectifs, les moyens à disposition, les délais et les participants.

La phase 2 consiste à rechercher les informations nécessaires.

La phase 3 contient une analyse des fonctions et des coûts (analyse fonctionnelle et analyses des coûts par des modes analogiques), et la validation des besoins et des objectifs (formalisée par le Cahier des Charges Fonctionnel).

La phase 4 consiste à rechercher des idées et des voies de solutions (par l'utilisation de techniques de créativité), à les classant selon des critères adaptés (fonctions, coûts, délais...) et de retenir un premier ensemble d'idées qui sont étudiées et évaluées en phase 5.

Cette phase consiste à conduire des études techniques pour l'attribution de fonctions techniques aux constituants des solutions, des études de sûreté de fonctionnement de ses constituants et de l'ensemble du système ainsi que la vérification de la cohérence du système et de la satisfaction du besoin.

La phase 6 a pour but de dresser un bilan prévisionnel des solutions sélectionnées. La décision incombe au seul décideur.

La phase 7 est la phase de réalisation, de suivi et de bilan de l'analyse. Cette phase a pour but de noter au fil du déroulement les écarts entre la réalisation et les prévisions, de rendre compte des anomalies relevées et de provoquer, s'il y a lieu, une reprise partielle de l'étude.

IV.4. Méthode d'Intégration de la Conception et du Soutien ICS : un nouvel outil

La problématique de l'optimisation du couple (disponibilité, coût global de cycle de vie) a fait l'objet d'un groupe de recherche conjoint entre l'Institut Sûreté de Fonctionnement (ISDF) et la Society of Logistic Engineers (SOLE). Le résultat des travaux réalisés est une méthode d'Intégration de la Conception et du Soutien (ICS). Cette méthode concerne la conception de produits durables et réparables et doit permettre de trouver un compromis entre le coût et les performances d'efficacité et de disponibilité d'un système. La figure A1 représente la place de la méthode dans la phase de conception du système. On remarque que la phase de définition du système est décomposée en trois études : recherche des techniques et technologies envisageables, études de Sûreté de Fonctionnement et Analyse du soutien logistique. La phase de développement des systèmes est suivie de la définition de la politique de maintenance et du concept de maintenance.

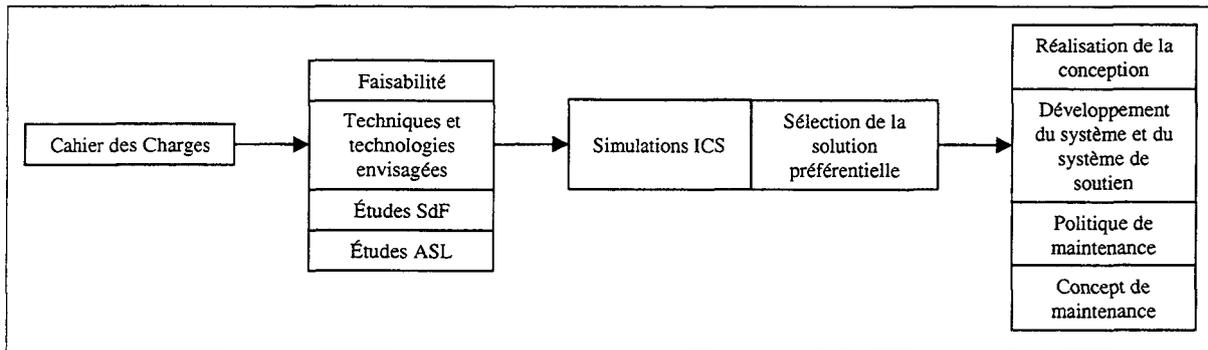


Figure A1 : La conception optimale d'un système et de son système de soutien [Lafont-98]

Le processus consiste en la réalisation en cours de conception et le plus tôt possible dans le planning de déroulement du projet, de simulations permettant d'associer à chaque solution potentielle, les estimations de cinq facteurs de base : l'efficacité opérationnelle^{*}, l'efficacité intrinsèque, la disponibilité effective^{*}, la disponibilité intrinsèque, le coût global^{*}. La méthode agrège ces cinq paramètres sous forme d'une fonction mathématique afin de comparer les solutions entre elles. La méthode illustre sa démarche par la figure A2 suivante. Sur un système logiciel, la méthode peut être appliquée dès la phase de pré-études, ou en étude détaillée et même en exploitation.

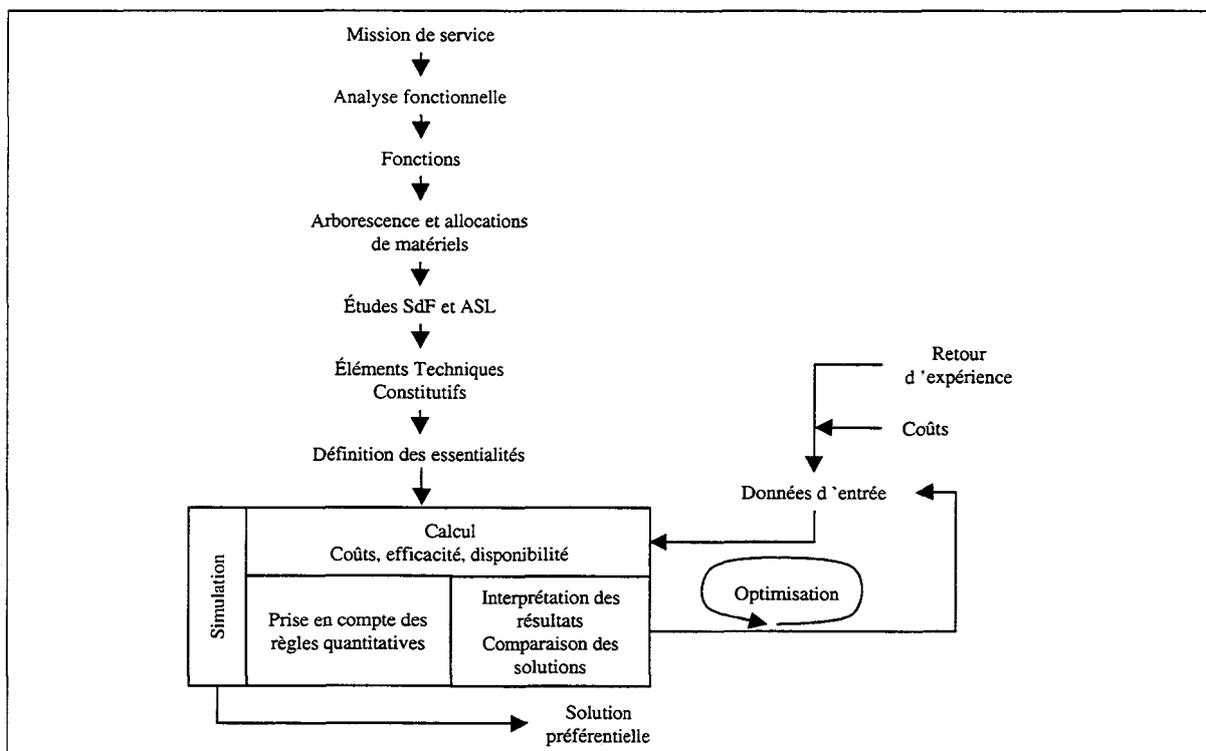


Figure A2 : Démarche Intégration de la Conception et du Soutien [Lafont-98].

La méthode Intégration de la Conception et du Soutien permet la recherche du "meilleur" compromis possible entre disponibilité et coût global de cycle de vie par la comparaison de plusieurs solutions techniques proposées à l'issue des études de Sûreté de Fonctionnement et de Soutien Logistique. Elle suppose donc que ces études ont permis d'identifier plusieurs configurations possibles du système principal et du système de soutien. Par comparaison des solutions entre elles et par rapport aux objectifs, elle permet de choisir la solution "optimale" du système principal et du système de soutien. Dans le cas où aucune solution ne serait satisfaisante, la méthode propose un éventuel retour en conception du système et de son système de soutien.

V. Les méthodes d'estimations prévisionnelles des caractéristiques de SdF

V.1. L'Analyse Préliminaire des Risques, des Dangers (APR, APD)

La méthode a pour objectif [Villemeur-88][Prévost et Waroquier-94][Zwingelstein-96] :

- d'identifier les dangers d'une installation et ses causes (éléments dangereux),
- d'évaluer les conséquences liées aux situations dangereuses et aux accidents potentiels.

On en déduit tous les moyens, toutes les actions correctrices permettant d'éliminer ou de maîtriser les situations dangereuses et les accidents potentiels mis en évidence précédemment.

V.2. L'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE)

La méthode AMDE est une méthode inductive d'analyse de système utilisée pour l'étude systématique des causes et des effets des défaillances qui peuvent affecter les composants de ce système [Villemeur-88][Zwingelstein-96]. Plus généralement l'AMDE permet :

- d'évaluer les effets de chaque mode de défaillance des composants d'un système sur les différentes fonctions de ce système,
- d'identifier les modes de défaillance ayant d'important effets sur la disponibilité, la fiabilité, la maintenabilité ou la sécurité de ce système.

Elle comporte quatre étapes :

1. Définition du système de ses fonctions et de ses composants,
2. Etablissement des modes de défaillance des composants – et de leurs causes –,
3. Etudes des effets des modes de défaillance,
4. Conclusions, recommandations.

V.3. L'analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC)

L'AMDEC est une extension de la méthode AMDE. Elle considère la probabilité d'occurrence de chaque mode de défaillance et la gravité des effets associés pour effectuer une classification suivant une échelle de criticité [Villemeur-88][Prévoist et Waroquier-94][Zwingelstein-96].

V.4. La Méthode des Combinaisons des Pannes Résumées (MCPR)

Cette méthode complète l'AMDE en incluant une étude des combinaisons de défaillances conduisant à des événements indésirables [Villemeur-88][Zwingelstein-96].

Elle se divise en quatre étapes :

- décomposition du système élémentaire : AMDE appliquée à chaque système élémentaire,
- élaboration des "pannes résumées internes" : regroupement des modes de défaillance qui, seuls ou groupés, produisent les mêmes effets sur le système élémentaire considéré ou les autres systèmes élémentaires,
- élaboration des "pannes résumées externes" : les pannes résumées internes ou leurs combinaisons relatives aux autres systèmes pouvant affecter le fonctionnement du système élémentaire étudié constituent des pannes résumées externes,
- élaboration des "pannes résumées globales" : elles sont composées des pannes résumées internes, externes et de leurs combinaisons ayant les mêmes effets sur le système élémentaire étudié et sur les autres systèmes élémentaires.

V.5. La méthode d'analyse HAZOP (HAZard and OPerability Study)

La méthode HAZOP est du même type que la méthode AMDE, mais elle s'applique à l'industrie chimique et est mieux adaptée pour l'analyse des circuits thermo-hydrauliques. Elle consiste à remplir un tableau standard contenant préalablement un certain nombre de mots clés. Ceux-ci permettent de passer en revue les déviations des paramètres importants en mettant en évidence les causes et les conséquences de leurs déviations éventuelles, ainsi que les moyens de détection et les actions correctrices possibles. Une hiérarchisation d'après la fréquence et la gravité des déviations possibles est alors effectuée [Villemeur-88][Zwingelstein-96].

V.6. La Méthode du Diagramme de Succès ou de Fiabilité (MDS/MDF)

Elle consiste à construire un diagramme composé de blocs, chacun d'eux représentant une entité (composant, sous-système, voire une fonction) reliés par des lignes orientées indiquant les dépendances des entités entre elles. Le comportement des entités est binaire (fonctionnement/défaillance) [Villemeur-88][Zwingelstein-96]. Un tel diagramme est une représentation statique du système. L'étude consiste à chercher les combinaisons de défaillances d'entités élémentaires conduisant à la défaillance du système, appelées "coupes". Les coupes ne comprenant aucune autre coupe sont dites "minimales". Les règles de transmission d'un signal sont les suivants [Zwingelstein-96] :

- en série : toutes les entités doivent fonctionner pour que le signal passe,
- en parallèle : il suffit que toutes les entités d'une branche fonctionnent pour que le signal passe,
- cas de redondance : la représentation fait apparaître un nœud commun spécifiant s'il s'agit d'un cas m/n ou non, et des "interrupteurs" si la redondance est passive.

V.7. La Méthode de l'arbre des causes ou de Défaillance (MAC/MAD)

Elle consiste à considérer une défaillance donnée du système et à construire d'une manière arborescente (descendante) l'ensemble des combinaisons de défaillances des composants mis en jeu (comportement binaire des événements élémentaires). L'événement indésirable ou non souhaité est au sommet de l'arbre [Villemeur-88][Prévost et Waroquier-94][Zwingelstein-96].

La méthodologie respecte les étapes suivantes [Prévost et Waroquier-94] :

- recensement des événements indésirables touchant la sécurité (en général ce recensement s'effectue à partir d'une APR complétée d'une AMDE),
- recherche des combinaisons de défaillances ou de pannes conduisant à la réalisation de l'événement indésirable,
- élaboration de l'arborescence,
- recherche des coupes minimales (réduction de l'arbre des causes),
- analyse quantitative.

Cette méthode permet donc d'identifier les points faibles de la conception. Mais elle est difficilement applicable pour des systèmes élémentaires en interaction et dépendant du temps [Villemeur-88].

V.8. La méthode de la Table de Vérité et de la Table de Décision (MTV/MTD)

Basée sur l'algèbre booléenne, la méthode permet d'identifier tous les états (fonctionnement ou panne) du système à partir de comportements binaires. Les premières étapes sont analogues à celles de l'AMDE. A chaque état du composant est associé une variable qui peut prendre la valeur 0 (fonctionnement) ou 1 (panne). Par définition, un vecteur des états sera une combinaison d'états des composants. Etablir la table de vérité consiste à analyser les effets de tous les vecteurs des états des composants ; l'étude de ces effets permet de recenser tous les fonctionnements anormaux du système [Villemeur-88][Zwingelstein-96].

V.9. La Méthode de l'Arbre des Conséquences ou des Arbres d'Evénements (MACQ/MAE)

Une séquence d'événement est constituée d'un événement initiateur et d'une combinaison de défaillances et de fonctionnements de systèmes de sûreté. Elle est qualifiée d'inacceptable ou d'acceptable suivant les conséquences qu'elle engendre. La méthode MACQ permet d'identifier ces séquences et ensuite de les étudier quantitativement et qualitativement. Il faut d'abord définir les fonctions de sûreté du système et les événements initiateurs (utilisation d'un arbre des causes) [Villemeur-88][Zwingelstein-96].

V.10. La Méthode du Diagramme Causes-Conséquences (MDCC),

La méthode MDCC est une combinaison des méthodes MAC et MACQ. Elle met en œuvre à la fois les logiques inductives de l'arbre de conséquences (AC) et déductives de l'arbre des causes (AdD). Un diagramme causes-conséquences (DCC) est constitué d'un ou plusieurs "sommets", comme un AdD, conduisant à des conséquences indésirables, redoutées ou inacceptables, et d'une partie "conséquences" qui correspond aux conséquences des événements sommets. L'établissement des coupes, puis des coupes minimales permet d'obtenir des résultats quantitatifs [Zwingelstein-96].

V.11. La Méthode de l'Espace des Etats (MEE)

On considère le système comme un ensemble de composants pouvant se trouver dans un nombre fini d'états de fonctionnement ou de pannes. On dispose donc d'un ensemble d'états de composants qui, combinés, permettent de définir l'ensemble des états du système. Les composants sont séparés. On obtient deux sous-ensembles : l'ensemble des états de fonctionnement et l'ensemble des états de panne. Ensuite il faut recenser toutes les transitions possibles entre les différents états du système en identifiant leurs causes [Villemeur-88][Zwingelstein-96].

VI. Les critères de conception d'un système maintenable

La maintenabilité d'un système dépend de plusieurs critères qui doivent tous être pris en compte pendant la phase de conception. Nous les décrivons dans ce paragraphe en suivant les étapes d'élaboration d'un diagnostic et d'une tâche de maintenance.

VI.1. Détectabilité / Testabilité

La détectabilité est l'aptitude d'un système à être détecté en état de défaillance. La testabilité est un sous-ensemble de la maintenabilité qui correspond aux dispositifs de test et de vérification dont dispose le système. Elle est définie en termes de détection de défaillance et d'isolation de la source. La définition peut être étendue pour inclure la rapidité et l'efficacité de la détection et de l'isolation. Idéalement, toutes les défaillances (et seulement les défaillances) sont détectées dès qu'elles surviennent, permettant à l'opérateur de réagir de façon adéquate. Les défaillances peuvent être détectées par l'observation humaine ou par le système lui-même. De façon similaire, le mainteneur peut isoler la source de défaillance et identifier la cause en utilisant des méthodes manuelles ou semi-automatiques pour vérifier les différents composants jusqu'à trouver la défaillance, ou en utilisant des tests intégrés automatiques (Built in Test) [AFNOR-88] [ARINC-95].

VI.2. Accessibilité / Identification / Repérage / Visibilité

L'accessibilité est une notion qui recouvre d'une part la relative facilité et rapidité avec laquelle les composants soumis à un échange ou une réparation sont atteignables, et d'autre part, l'espace laissé libre autour des composants pour que l'intervention humaine soit possible [AFNOR-88][Blanchard et al.-95][Zwingelstein-96].

Les systèmes doivent être conçus pour que le repérage, l'identification ainsi que la visibilité des composants défaillants soient aisés NF X 60-300 [AFNOR-88][CETIM-99].

VI.3. Aptitude à la pose / dépose / Connectique / Démontabilité / Modularité / Interchangeabilité / Standardisation

La pose et la dépose comprennent l'ensemble des opérations nécessaires à la suppression et au rétablissement des liaisons entre un élément et l'ensemble dont il fait partie afin de pouvoir en disposer isolément NF X 60-301 [AFNOR-88]. Ceci doit être facilité par la connectique, la démontabilité, la modularité des composants, l'interchangeabilité et la standardisation (des outils et des composants).

La connectique concerne les techniques utilisées pour le câblage et les connexions entre les différents composants pour permettre un démontage et un repérage facile NF X 60-301 [AFNOR-88][CETIM-99].

La démontabilité caractérise la possibilité de fractionner un ensemble en sous-ensembles et éléments constitutifs NF X 60-301 [AFNOR-88].

L'interchangeabilité des composants rend possible le remplacement d'un élément, d'un sous-ensemble, équipement... par un autre élément pouvant provenir NF X 60-301[AFNOR-88] :

- d'un stock,
- du système lui-même,
- d'un autre système du même type,
- d'un autre système d'un type différent,

en faisant appel éventuellement à des modifications sommaires de réglages, et/ou à l'adjonction de dispositifs adaptateurs simple, à l'exclusion de toute opération telle que la modification de l'élément et son usinage.

L'interchangeabilité est un autre aspect important de la conception pour faciliter la maintenance des systèmes réparables. Les composants et assemblages remplaçables doivent être conçus de façon à ce qu'un ajustement ou recalibrage ne soient pas nécessaires après un remplacement. Des tolérances d'interfaces doivent être spécifiées pour assurer que les unités remplaçables sont interchangeables [O'Connor-91].

VI.4. Manutention / Réglages / Etalonnage / Nettoyage

Un système doit être conçu de façon à être manipulable et nettoyable sans danger ni pour lui ni pour son environnement de façon rapide et simple. Les réglages / étalonnages doivent être faciles et rapides d'exécution [Blanchard-92][AFNOR-88]

VII. Les Built-in Test ou Tests intégrés

Les Built-in-Test ou tests intégrés consistent en des éléments additionnels qui sont utilisés pour effectuer des tests fonctionnels sur le système. Ils peuvent réduire de façon importante les temps de maintenance en fournissant une indication instantanée sur la localisation d'une défaillance et par conséquent la disponibilité peut être améliorée. Ils permettent également de réduire les besoins en équipements de test externes et les besoins de formation à la recherche de pannes. Ils doivent être conçus pour être activés par l'opérateur, ou ils peuvent surveiller le système de façon continue ou à des intervalles donnés. Ils peuvent être efficaces pour augmenter la disponibilité du système et la confiance de l'utilisateur en son système. Mais ils ajoutent inévitablement de la complexité et des coûts, et peuvent augmenter la probabilité de défaillance. Ils affectent également la fiabilité apparente du système en indiquant que le système est défaillant alors qu'il ne l'est pas. Ceci peut être dû à des défaillances du test intégré comme à des défaillances des capteurs, des connexions ou d'autres composants. Ils doivent donc être simples et limités au suivi des fonctions essentielles qui ne pourraient être facilement suivies autrement. Il est important d'optimiser la conception des tests intégrés en relation avec la fiabilité, la disponibilité et les coûts du système [O'Connor-91][ARINC-95].

VIII. La Maintenance Basée sur la Fiabilité

La Maintenance Basée sur la Fiabilité (Reliability Centred Maintenance RCM) est une méthode d'analyse systématique dans laquelle la conception des systèmes est évaluée en termes de défaillances potentielles, de conséquences de ces défaillances et de procédures de maintenance recommandées pour éviter ces défaillances [Blanchard-92]. La Maintenance Basée sur la Fiabilité utilise un ensemble de modèles et d'outils structurés et formels. Elle ne sélectionne que des tâches efficaces et applicables de maintenance préventive pour atteindre le niveau de fiabilité requis (intrinsèque) des fonctions assurées par les matériels en optimisant les coûts de maintenance. Cette méthode exhaustive est rationnelle recherche les matériels critiques dont les modes de défaillance ont un impact significatif sur la sûreté, la disponibilité, la qualité, l'environnement... Fondée sur la connaissance des taux de fiabilité des matériels, elle implique une maintenance préventive ou une modification de conception uniquement pour les matériels critiques. La maintenance corrective est la seule alternative proposée pour les matériels jugés non critiques [Zwingelstein-96].

Bibliothèque Universitaire de Valenciennes



00904496