UNIVERSITE SIDI MOHAMED BEN ABDELLAH
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES - FES
Centre d'Etudes Doctorales : Sciences et Techniques de l'Ingénieur

N° d'ordre 01/2016.

THESE DE DOCTORAT

Présentée par

Mr: Ayoub Alami

Spécialité : Génie Industriel

Sujet de la thèse : Contribution à l'intégration des caractéristiques de la sûreté de fonctionnement au processus de conception

Thèse présentée et soutenue le samedi 09 janvier 2016 devant le jury composé de :

Nom Prénom	Titre	Etablissement	
Mohammed ET HAMMOUMI	PES	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	Président
Mohammed ELGHORBA	PES	ENSEM de Casablanca	Rapporteur
Mohammed SALLAOU	PH	ENSAM de Meknès	Rapporteur
Driss AMEGOUZ	PES	Ecole Supérieure de Technologie de Fès	Rapporteur
Anas CHAFI	PH	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	Examinateur
Said BOUTAHARI	PH	Ecole Supérieure de Technologie de Fès	Examinateur
Brahim HERROU	PH	Ecole Supérieure de Technologie de Fès	Directeur de thèse

Laboratoire d'accueil : Laboratoire de Techniques Industrielles

Etablissement : Faculté des Sciences et Techniques – Fès

À la mémoire de ma mère,

À mon père,

À ma femme et à mon fils Youssef.

À ma sœur et à mon frère ⋯

⋯ Je dédie ce mémoire

Résumé

De nos jours, les nouveaux produits mis sur le marché sont de plus en plus complexe. Cette complexité vient en partie du fait que les fonctions que les systèmes doivent assurer requièrent l'intégration de plusieurs composants utilisant des technologies différentes. Le concepteur doit intégrer dans son processus toutes les phases du cycle de vie du système et de ses composants. Il doit opter pour des solutions qui sont simples à produire, peu coûteuses, très fiables, sécuritaires, faciles à entretenir et ayant un coût global sur tout le cycle de vie qui soit attrayant pour le consommateur.

Les récentes préoccupations en matière d'environnement et de développement durable ont conduit à l'émergence de nouvelles façons de faire en matière de conception, de fabrication, de distribution, de récupération et de valorisation des produits. Ces nouvelles façons imposent d'accorder une place privilégiée à de caractéristiques qui définissent l'état du système tout au long de son cycle de vie. Parmi ces caractéristiques, on note : la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la sécurité.

Plusieurs outils existent ou sont en cours de développement pour améliorer ou pour évaluer la sûreté de fonctionnement d'un produit. Leurs intégrations dans un processus de conception sont toutefois mal établies. Le concepteur ne dispose pas, à l'heure actuelle, d'une vision globale de la disposition de ces méthodes. C'est dans cette optique que notre thèse vient de traiter la problématique de la prise en compte et la validation de la sûreté de fonctionnement au stade de la conception.

Notre contribution, dans ce travail, est d'élaborer des modèles et des outils permettant de répondre aux questions suivantes:

- **Comment prendre en compte la fiabilité en conception ?**
- **Comment peut-on intégrer la notion de la sécurité (Machine, utilisateur) dans la phase de conception des produits ?**
- **Comment mesurer la maintenabilité et la disponibilité dès le stade de conception?**

Mots clés : Intégration, sûreté de fonctionnement, fiabilité, disponibilité, maintenabilité, sécurité, maintenance, conception.

Abstract

Nowadays, new products on the market are increasingly complex. This complexity is in part because the functions that the systems must ensure require the integration of several components using different technologies. The designer must include in its process all phases of the life cycle of the system and its components. It should opt for solutions that are simple to produce, inexpensive, very reliable, safe, easy to maintain and has a total cost throughout the life cycle that is attractive to the consumer.

Recent environmental concerns and sustainable development have led to the emergence of new approaches in the design, manufacturing, distribution, recovery and recycling of products. These require new ways to give a privileged place to features that define the state of the system throughout its life cycle. Among these characteristics, there is: reliability, maintainability, availability and security.

Several tools exist or are under development to improve or to assess the safety of operation of a product. Their integration in a design process, however, are not well established. The designer does not have, at present, a comprehensive view of the provision of these methods. It is in this perspective that our thesis is to address the issue of recognition and validation of operational safety at the design stage.

Our contribution in this work is to develop models and tools to answer the following questions:

- **How to take into account the reliability design?**
- **How can we incorporate the concept of safety (machine, user) in the product design phase?**
- **How to measure the maintainability and availability right from the design stage?**

Keywords: Integration, dependability, reliability, availability, maintainability, safety, maintenance, design

Remerciements

J’exprime toute ma reconnaissance au Professeur Herrou Brahim, de l'Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, pour avoir assuré la direction et l'encadrement scientifique de mes travaux. Je le remercie également pour son écoute et sa sympathie. Ainsi que pour son soutien, ses conseils et la confiance qu’il m’a accordée tout au long de ces années.

Je remercie messieurs les membres du jury d’avoir accepté de participer au jury, ainsi que pour l’intérêt qu’ils ont porté à ce travail.

Merci à celles et ceux qui ont contribués de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Un grand merci à mes amis d'ici et d'ailleurs.

Merci à ma femme Oumaima pour sa patience tout au long de ces trois ans, pour avoir supporté mon humeur et pour m'avoir permis de continuer dans les moments de doute.

Enfin, je remercie ma famille qui m'a soutenue et encouragée sans faille au cours de toutes mes années passées et qui continue à le faire.

Table des matières

Résumé.....i

Abstract.....ii

Remerciements..... ……iii

Table des matières iv

Liste des tableaux..... v

Liste des figures vi

Introduction générale 1

Chapitre I Généralités

1.1 Introduction 4

1.2 Etat de l'art maintenance 5

1.3 Définition de la maintenance 9

1.4 Rôle de la maintenance 9

1.5 Politiques de maintenance 10

1.5.1 Maintenance corrective *10*

1.5.2 Maintenance préventive *10*

1.5.3 Maintenance mixte *11*

1.6 L'optimisation de la maintenance 12

1.7 La maintenance et son intégration dans la conception 13

1.7.1. Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité *13*

1.7.1.1. La fiabilité 13

1.7.1.2. La maintenabilité.....17

1.7.1.3. La disponibilité 19

1.7.1.4. La Sûreté de fonctionnement Sdf.....19

1.7.1.5. Le soutien de logistique intégré (Sli) 20

1.7.1.6. Le Life cycle Cost 21

1.8 L'intégration de la maintenance dans la conception : Le Design For X (DFX) 22

1.8.1. Design For Assembly (DFA) *23*

1.8.2. Design For Manufacturing (DFM) *26*

1.8.3. Design For Maintenability (DFMt) *27*

1.8.3.1. L'accessibilité 27

1.8.3.2. La démontabilité 27
1.8.3.3. L'aptitude à la pose et à la dépose 28
1.8.3.4. L'interchangeabilité 28
1.8.3.5. La modularité 28
1.8.3.6. La standardisation 29
1.8.3.7. La détectabilité 29
1.8.4. Design For Reliability (DFR) ***29***
1.8.5. Design For Maintenance (DFMAIN) ***31***
1.9 L'ingénierie de la conception **32**
1.9.1 L'évolution de la pensée moderne de la conception. ***32***
1.9.2 Processus de conception. ***34***
1.9.2.1 Planification et clarification des tâches. 35
1.9.2.2 Conception conceptuelle. 36
1.9.3 Conception architecturale ou conception de réalisation. ***38***
1.9.3.1 Etape de la conception architecturale. 38
1.9.3.2 Conception détaillée. 40
1.10 Conclusion **40**

Chapitre 2 Fiabilité en conception

2.1 Introduction **41**
2.2 Concepts et caractéristiques de la fiabilité. **41**
2.2.1 Concepts de base de la fiabilité. ***41***
2.2.1.1 Fiabilité à l'instant t, R(t) 42
2.3.1.2 Distribution cumulative des durées de vie, F(t) 42
2.2.1.3 Taux de panne 43
2.2.1.4 La Moyenne des Temps de Bon Fonctionnement. 43
2.2.2 Estimation des indices de fiabilité. ***44***
2.2.3 Elaboration de la fiabilité. ***44***
2.2.4 Les phases du cycle de vie d'un produit: ***45***
2.2.5 Recueil de données de fiabilité. ***47***
2.3 Méthodes et outils pour l'évaluation de la fiabilité. **48**
2.3.1 Modélisation et évaluation de la fiabilité d'un système multi-composant. ***48***
2.3.1.1 Schémas blocs. 48
2.3.1.2 Système en série. 49

2.3.1.3 Système en parallèle. 49
2.3.1.4 Diagramme d'états. 50
2.3.2 Les principales méthodes de sûreté de fonctionnement ***50***
2.3.2.1 Les arbres de défaillance (AdD). 51
2.3.2.2 Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leurs Criticités (AMDEC). 54
2.3.2.3 Déploiement de la fonction qualité. 58
2.3.3 Approche probabiliste de la conception. ***60***
2.3.3.1 L'approche probabiliste "Contrainte- Résistance". 61
2.3.3.2 Evaluation de la fiabilité d'un produit avec l'approche probabiliste " Contrainte - Résistance ". 62
2.3.3.3 Méthodes d'approximation Premier/seconde ordre 63
2.3.4 Méthodes de simulation de Monte-Carlo (SMC) ***68***
2.4 Modèle de prise en compte de la fiabilité au processus de conception. **69**
2.4.1 Phase de planification et identification des besoins. ***69***
2.4.1.1 Application de la méthode à une pompe immergée. 71
2.4.2 Phase conceptuelle. ***74***
2.4.2.1 Application. 76
2.4.3 Phase architecturale ***79***
2.4.3.1 Application 80
2.4.4 Phase détaillée. ***83***
2.5 Conclusion **86**

Chapitre 3 : Indicateurs de maintenabilité et de disponibilité en conception

3.1 Introduction **87**
3.2 Rappels des concepts et notions utilisés **89**
3.2.1 Maintenabilité ***89***
3.2.1.1 Définition 89
3.2.1.2 Critères de maintenabilité 90
3.2.1.3 Indicateurs de maintenabilité. 90
3.2.2 Disponibilité ***91***
3.2.2.1 Définitions 91
3.2.2.2 Indicateurs de disponibilité 91

3.3 Indicateurs de maintenabilité en conception 92

3.3.1 Indicateurs de maintenabilité en exploitation 92

3.3.1.2 Indicateurs de fréquence des activités de maintenance, 95

3.3.1.3 Indicateurs de temps de main d'œuvre de maintenance 96

3.3.2 Obtention des données 97

3.3.2.1 Sources de données en exploitation 98

3.3.2.2 Autres sources de données pouvant être exploitées en conception 99

3.3.3 Indicateurs de maintenabilité pouvant être évalués en conception 103

3.4 Indicateurs de disponibilité en conception 104

3.4.1 Indicateurs de disponibilité en exploitation 104

3.4.1.1 Disponibilité stationnaire ou Up Time Ratio UTR 105

3.4.1.2 Disponibilité inhérente, A_a 105

3.4.1.3 Disponibilité opérationnelle, A_O 106

3.4.2 Sources d'obtention des données 107

3.4.3 Indicateurs de disponibilité pouvant être évalués en conception 107

3.5 Conclusion 108

Chapitre 4 Sécurité en conception

4.1 Introduction 109

4.2 Sécurité et conception 110

4.3 Comment prendre en compte la sécurité dès la conception ? 111

4.4 Etat de l'art et définitions sur la sécurité 112

4.5 Analyse et évaluation des Risque 114

4.5.1 Les mécanismes simplifiés du risque ---------- 115

4.5.2 Identification du risque---------- 115

4.5.3 Analyse Evaluation des risques---------- 116

4.5.3.1 Méthodes du type "Audit" 116

4.5.3.2 Méthodes du type "ergonomie" 117

4.5.3.3 Méthodes du type "sûreté de fonctionnement" 118

4.6 Méthodes principales du courant de la sûreté de fonctionnement 118

4.6.1 Analyse préliminaire des risques ---------- 118

4.6.2 Analyse des modes de défaillance et de leurs effets ---------- 119

4.6.3 Analyse par arbre des défauts (ou des causes, des défaillances, des fautes MAC,) ---------- 121

4.6.4 Analyse par arbre d'événements ou arbre des conséquences (event tree)----- 122

4.6.5 Diagramme causes - conséquences ---------- 123

4.6.6 Méthode MOSAR (Méthode Organisée et Systémique d'Analyse des Risques) *Erreur ! Signet non défini.*

4.7 Méthode d'intégration de sécurité dans la conception. 127

4.7.1 Une intégration de la sécurité dans la conception d'une machine par des voies « directes » et « indirectes » (De la Garza 2005). ---------- 127

4.7.2 Une sécurité portée par le collectif des concepteurs et l'organisation de retours d'expériences (De la Garza 2005). ---------- 128

4.7.3 La notion barrière de sécurité ---------- 130

4.7.3.1 Classification des barrières 130

4.7.3.2 Classification de barrières par fonction 130

4.7.3.3 Classification des systèmes de barrières 131

4.7.3.4. Critères de performance des barrières 132

4.7.3.5 Analyse des barrières assistée par ordinateur 133

4.7.4 TRIZ (Théorie de la Résolution des Problèmes d'Invention) ---------- 134

4.7.4.1 TRIZ une méthode de conception créative 134

4.7.4.2 TRIZ une méthode de résolution des contradictions 135

4.8 Modèle d'intégration de la sécurité au stade de conception 135

4.8.1Phase de planification et identification des besoins.---------- 136

4.8.2 Phase conceptuelle---------- 137

4.8.3 Phase architecturale ---------- 139

4.8.4 Phase détaillée. ---------- 140

4.9 Conclusion 142

Conclusion générale 143

Références Bibliographiques 146

Liste des tableaux

Tableau 1.1 Règles de conception pour intégrer la fiabilité 30

Tableau 2.1 Relations entre quatre caractéristiques de fiabilité f(t), F(t), R(t) et r(t) 43

Tableau 2.2 Recueils de données de fiabilité en mécanique. 47

Tableau 2.3 Evénements et opérateurs fondamentaux 52

Tableau 2.4 Classes de probabilité d'occurrence d'un événement (Salamone, 1995) 55

Tableau 2.5 Exemple de classes de gravité d'un événement (Salamone, 1995) 55

Tableau 2.6 Paramètres de la loi de défaillance des éléments de la pompe immergée (distributionde Weibull) (Ayoub et al 2014a). 81

Tableau 3.1 Étapes du cycle de maintenance (ayoub et al 2015) 94

Tableau 3.2 Indicateurs de durées de maintenance active(ayoub et al 2015) 94

Tableau 3.3 Indicateurs de fréquence des activités de maintenance (ayoub et al 2015) 95

Tableau 3.4 Indicateurs de temps de main d'œuvre (ayoub et al 2015) 96

Tableau 3.5 Indicateurs de coûts de maintenance (ayoub et al., 2015) 97

Tableau 3.6 Quelques bases de données de fiabilité (ayoub et al 2015) 100

Tableau 3.7 Synthèse des paramètres dans chaque famille d'indicateurs de maintenabilité (ayoub et al 2015) 104

Tableau 3.8 Expressions des temps logistiques et administratifs 106

Tableau 3.9 Paramètres d'indicateurs de disponibilité (ayoub et al 2015) 108

Tableau 4.1 Grille d'analyse pour l'APD 119

Tableau 4.2 Exemple de la présentation d'une AMDE ou d'une AMDEC [Lievens 1976] 120

Liste des figures

Figure 1.1 Hiérarchie de la fonction maintenance 5
Figure 1.2 Diagramme des différents concepts de maintenance 12
Figure 1.3 Taux de défaillance en fonction de l'âge : courbe en baignoire (Chapouille, 1999) 15
Figure 1.4 Intégration au niveau du produit (Aoussat et Le Coq, 1998) 23
Figure 1.5 Intégration au niveau du composant (Allen, 1987) 26
Figure 1.6 Comparaison entre l'ingénierie séquentielle et l'ingénierie concourante inspiré de. 33
Figure 1.7 Modèle de Pahl et Beitz d'après Pahl et al. (2007) 35
Figure 1.8 Principales étapes de la conception conceptuelle 37
Figure 1.9 Principales étapes de la conception architecturale 39
Figure 2.1 La fiabilité décroissante avec le temps. 42
Figure 2.2 Allure du taux de panne r(t) en fonction de l'unité d'usage 46
Figure 2.3 La courbe du taux de défaillance pour des composants mécaniques 46
Figure 2.4 Configuration d'un système : a) en série, b) en parallèle. 49
Figure 2.5 Diagramme de transition associée à un système ne peuvent occuper que deux états. 50
Figure 2.6 Structure d'un arbre de défaillance 52
Figure 2.7 Principales étapes pour effectuer une AMDEC 56
Figure 2.8 Type d'AMDEC 56
Figure 2.9 Maison de la qualité 58
Figure 2.10 Diagramme de Warmer 62
Figure 2.11 Fonction de densité de probabilité de G(□) 64
Figure 2.12 Transformation de deux variables du système de coordonnées original 65
Figure 2.13 Algorithme FORM pour l'estimation de l'indice de habilité (Rojas, 2008) 67
Figure 2.14 Illustration de la simulation d'importance dans l'espace physique (Deheeger,2008). 69
Figure 2.15 Phase de planification des tâches (Ayoub et al 2014a). 70
Figure 2.16 Maison de qualité d'une pompe immergée. (Ayoub et al 2014a). 74
Figure 2.17 Pré-validation du concept dans la phase conceptuelle (Ayoub et al 2014a). 75
Figure 2.18 Concept choisit pour le diffuseur (Ayoub et al 2014a). 76
Figure 2.19 l'arbre de défaillance du diffuseur(Ayoub et al 2014a). 77
Figure 2.20 Concept optimisé du diffuseur(Ayoub et al 2014a). 77
Figure 2.21 concept choisit pour la turbine(Ayoub et al 2014a). 78
Figure 2.22 Concept optimisé de la turbine(Ayoub et al 2014a). 78
Figure 2.23 Pré-validation dans la phase architecturale (Ayoub et al 2014a). 79
Figure 2.24 Plan d'ensemble de la pompe immergée (Ayoub et al 2014a). 80
Figure 2.25 Modélisation de la pompe immergée en schéma bloc. (Ayoub et al 2014a). 81
Figure 2.26 Présentation graphique de la fiabilité du système et de ses composants, (Ayoub et al 2014a). 82
Figure 2.27 Pré-validation dans la phase détaillée(Ayoub et al 2014a). 84
Figure 4.1 Matrice de criticité réalisée dans le cadre d'une AMDEC 120

Figure 4.2 Exemple de représentation de l'arbre des causes 121
Figure 4.3 Identification de l'ordre des coupes 122
Figure 4.4 Intégration de la sécurité dans la Phase de planification des tâches (Ayoub et al 2014b). 136
Figure 4.5 Intégration de la sécurité dans la Phase conceptuelle tâches (Ayoub et al 2014b) 138
Figure 4.6 Intégration de la sécurité dans la phase architecturale (ayoub et al 2014b) 140
Figure 4.7 Intégration de la sécurité dans la phase détaillée (ayoub et al 2014b) 141

AVANT PROPOS

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une thèse de Doctorat National préparée à l'Université Sidi Mohamed Ben Abdellah de Fès au sein du Laboratoire de Techniques Industrielles (LTI) à FST de Fès et rattaché au Centre d'Etudes Doctorales Sciences et Techniques de l'Ingénieur. Cette thèse a été dirigée par le Professeur Herrou Brahim.

Les travaux de cette thèse ont fait l'objet de trois publications dans la revue scientifique "International Journal of Scientific and Engineering Research" (**facteur d'impact 3.2**).

- Integration of reliability in the design process, a case study of a submersible pump,. International Journal of Scientific & Engineering Research Volume 5, Issue 2, February-2014, ISSN 2229-5518
- Consideration of security in the design process. International Journal of Scientific & Engineering Research Volume 5, Issue 7, July 2014, ISSN 2229-5518
- Consideration of indicators maintainability design International Journal of Scientific & Engineering Research Volume 6, Issue 2, February 2015 Edition, ISSN 2229-5518

Sept communications ont été présentées dans différentes manifestations scientifiques, dont principalement :

- Analyse des défaillances d'une unité de production, étude de cas d'une PME marocaine". 1er édition du Congrès International en Génie Industriel et Management des Systèmes CIGIMS 2012.
- Application de l'analyse fonctionnelle au coût global de maintenance". Colloque International sur le Monitoring des Systèmes Industrielles, 19-20 Décembre 2012, Marrakech, Maroc
- Vers un soutien logistique intégré support d'une maintenance prévisionnelle". 6ème édition du Colloque International LOGISTIQUA L'Ecole Nationale des sciences appliquées de Tanger. 30 & 31 Mai 2013.
- Prise en compte de la fiabilite en conception ". 8ème Conférence International CPI, Conception et Production Intégrées, 23 octobre Algérie

- L'AMDEC un outil puissant d'optimisation de la maintenance informatique. 4th Workshop on Codes, Cryptography and Communication Systems 07-08 November 2013
- Démarche du soutien logistique intégré application à LIL. 7ème édition du Colloque International LOGISTIQUA. 29 & 30 Mai 2014.
- E-maintenance: Etude et analyse de plateforme. 2 éditions du Congrès International en Génie Industriel et Management des Systèmes CIGIMS 2015

Parallèlement aux travaux de cette thèse, nous avons participé aux formations doctorales organisées par le CED de la FST et la Cité d'Innovation, et nous avons assuré plus de 200 heures de vacation au sein de FSTF.

Introduction générale

L'évolution des besoins et la compétition féroce font en sorte que les entreprises doivent revoir leur processus de développement et de mise en marché de leurs produits.

La mobilisation des ressources, l'innovation, la réduction des délais de mise en marché, la réduction du prix, l'amélioration de la qualité du produit et de service, l'élimination de toutes les sources de gaspillage, sont autant d'exigence à prendre en compte dès le stade de la conception. L'ingénierie simultanée (concourante) s'est révélée particulièrement efficace (Tichkiewitc, 2011), son intégration a contribué notamment, à la réduction des délais de mise en marché du produit, à l'amélioration de la conception et la réduction des coûts grâce en particuliers à la mobilisation des ressources, et au travail d'équipe pluridisciplinaires.

Dans l'équipe inter-fonctionnelle qui intervient dans l'ingénierie concourante, on retrouve celle du service de commercialisation, de conception, des tests, et celle de la production. L'équipe ne comprend pas systématiquement un représentant de la sûreté de fonctionnement (fiabilité, disponibilité, maintenabilité, sécurité), car cela fait partie de la responsabilité de l'équipe des tests qui effectue la validation des caractéristiques définissant l'état du système tout au long de son cycle de vie (fiabilité, disponibilité, maintenabilité, sécurité), selon un protocole bien défini.

Pourtant, pour valider caractéristiques de la sûreté de fonctionnement dans le processus de conception, le concepteur doit disposer des données une fois le modèle physique réalisé, ensuite l'information est remontée en amont dans le processus pour effectuer les modifications nécessaires (figure 0.1).

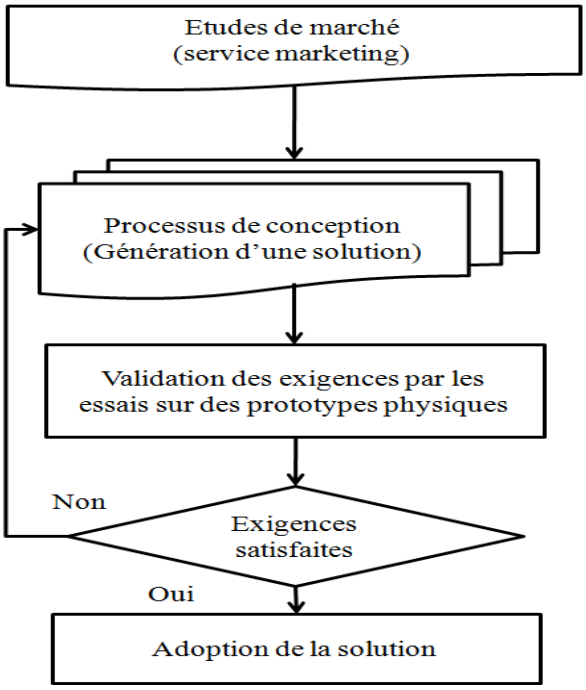


Figure 0.1 - Processus de conception sans pré-validation des exigences en conception.

Ainsi, le processus de conception se poursuit jusqu'à l'obtention d'un degré de satisfaction et l'adoption d'une solution finale. Ces modifications demandent plus de temps, et augmentent le nombre de modèles physiques à réaliser pour effectuer la validation appropriée. Selon Levin et Kalal (2003), 80% du coût de développement du produit est déterminé par le temps qu'il passe en prototypage (Levin et Kalal, 2003). Par conséquent, la réduction du coût de développement du produit via la considération de la sûreté de fonctionnement dès les premières phases de conception pourrait constituer un avantage concurrentiel pour les entreprises notamment en optimisant la phase de prototypage.

Le problème essentiel qui se pose est **comment prendre en compte la sûreté de fonctionnement (fiabilité, disponibilité, maintenabilité, sécurité) en conception ?**

Plusieurs outils existent ou sont en cours de développement pour améliorer ou pour évaluer la sûreté de fonctionnement d'un produit. Leurs intégrations dans un processus de conception sont toutefois mal établies. Le concepteur ne dispose pas, à l'heure actuelle, d'une vision globale de la disposition de ces méthodes. Pour résoudre cette problématique nous devrons répondre à trois questions:

- **Comment prendre en compte la fiabilité en conception ?**
- **Comment prendre en considération la sécurité des utilisateurs dans la conception des produits ?**

- **Comment mesurer, en conception, la maintenabilité et la disponibilité?**

Le contenu de ce mémoire est divisé en quatre chapitres.

Le **Chapitre 1** porte sur l'étude bibliographique de la maintenance et du processus de conception, en présentant un rappel des principaux concepts et des principales notions utilisées. Une revue des récents travaux traitant de chacun de ces concepts et notions est aussi présentée.

Le **Chapitre 2** présentera un rappel des principaux concepts de la fiabilité. L'accent sera mis sur l'estimation des indices de fiabilité, les différentes phases du cycle de vie d'un produit du point de vue de la fiabilité, et un recueil des données de la fiabilité des composants mécaniques. En suite on traitera des méthodes et des outils qui permettent l'évaluation de la fiabilité et, plus précisément, ceux qu'on peut utiliser dans le processus de conception. Finalement on exposera le modèle d'évaluation de la fiabilité dès les premières phases de conception.

Le chapitre 3 analyse les indicateurs de maintenabilité et de disponibilité couramment utilisés dans la littérature afin de déterminer ceux qui peuvent être évalués en conception.

Le chapitre 4 porte sur l'étude bibliographique de l'analyse de la sécurité et son positionnement vis-à-vis des approches de la conception, Après avoir expliqué les moyens existants pour étudier la sécurité et plus particulièrement les techniques d'analyse des risques et les solutions proposées pour l'améliorer, une synthèse de ces travaux est effectuée dégageant ainsi les avantages, les inconvénients et les manques éventuels. Ensuite, nous cherchons, à travers l'étude de la littérature des théories et méthodes de la conception, d'apporter des éléments de réponse à ces éventuelles faiblesses. Enfin, on exposera un modèle conceptuel d'intégration de la sécurité et de la conception. Ce modèle est basé sur une représentation systématique du processus de conception décrit par (Pahl&Beitz 2007).

Finalement, après avoir rappelé de manière synthétique les résultats obtenus, nous concluons ce manuscrit en proposant des perspectives pour des travaux futurs en continuité de ce travail de recherche.

Chapitre 1 Généralités

1.1 Introduction

La fonction maintenance conditionne fortement le niveau de performance d'une installation. Son optimisation est complexe car elle doit prendre en compte différents critères parfois antagonistes comme par exemple la disponibilité et les coûts (Lyonnet, 1999), (Glade, 2005). Par ailleurs, il y a une multitude de façons de maintenir une installation. On peut jouer sur le type de maintenance, sur les types de tâches, sur leur fréquence, sur le niveau d'intervention, etc…

Pour effectuer ces choix stratégiques, des méthodes permettant d'optimiser les performances des systèmes sont appliquées, parmi lesquelles l'Optimisation de la Maintenance basée sur la Fiabilité (Despujols, 2004). Les responsables de maintenance en viennent ainsi à envisager de véritables stratégies et ne se contentent plus de surveiller et de réparer. Ils cherchent à prévoir les événements et d'évaluer les différentes alternatives qui s'offrent à eux pour exploiter au mieux les installations en fonction des contraintes techniques et budgétaires imposées.

Les décisions sont majoritairement prises sur la base d'informations qualitatives fournies par des experts et quelquefois appuyées par des données de retour d'expérience. Il serait toutefois utile de pouvoir effectuer des choix sur des critères quantitatifs décrivant les performances des programmes de maintenance (Zille et al.,2007).

D'autre part le concept actuel de maintenance dans une entreprise de biens de consommation est l'aboutissement d'une longue évolution des services d'entretien traditionnel qui commença après la seconde guerre mondiale. Jusqu'alors considéré comme une sous fonction de la production dans l'entreprise, le service d'entretien était souvent excentré et ne reposait que sur les métiers du dépannage : mécaniciens, dépanneurs électriciens, graisseurs et régleurs.

L'entretien consistait principalement à dépanner et à repérer après la défaillance, avec comme objectif la remise en état rapide de la machine. Les seules actions de prévention concernaient la lubrification et les rondes de surveillance (Monchy, 2000).

Mais l'enjeu des années 70 et 80, marqué par une production massive de produits de grande consommation (automobile, électronique grand public, téléphonie, etc.), une évolution rapide des techniques, un objectif de forte rentabilité, impose une nouvelle façon d'organiser l'entretien au niveau de l'entreprise : les pertes liées aux défaillances sont

désormais chiffrées et analysées. La connaissance du coût de la panne et de ses conséquences économiques sur le chiffre d'affaire de l'entreprise est désormais intégrée dans la gestion globale. L'émergence de nouveaux concepts de management et d'intégration de la maintenance dans l'entreprise se développe. L'objectif principal est de maîtriser le coût de la défaillance en l'anticipant dés la conception et pendant l'utilisation de l'équipement.

Plusieurs concepts sur la maintenance et son intégration dans la conception en réponse aux effets de la mondialisation sont de nos jours utilisés. Ces effets sont entre autres le respect de normes de qualité internationales, la concurrence au niveau de la commercialisation des produits.

1.2 Etat de l'art maintenance

Avant de présenter les travaux menés dans la littérature dédiés à la maintenance, il est nécessaire de faire un focus sur la classification des activités de maintenance (voir Figure 1.1).

Dans une entreprise, les activités de maintenance sont, soit des activités de maintenance externe pour des interventions de sous traitant, soit des activités de maintenance interne pour des actions internes à l'unité de production. Dans ce dernier cas soit la maintenance est intégrée à la production, on appelle ce type « maintenance intégrée », soit les activités de maintenance sont regroupées dans un atelier central. On appelle ce type de maintenance «maintenance centralisée».

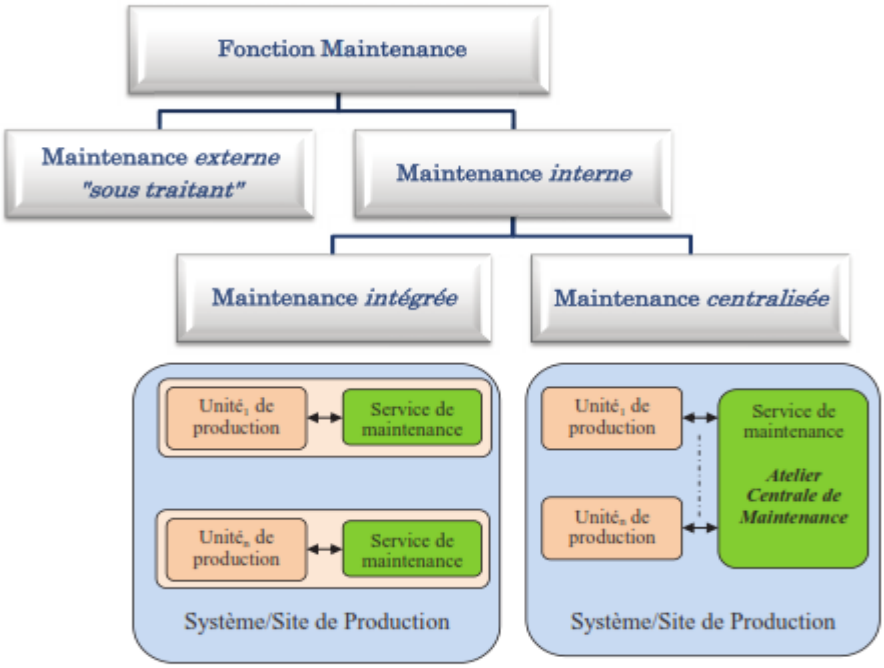


Figure 1.1 Hiérarchie de la fonction maintenance

Différents travaux ont été réalisés autour de la Maintenance Intégrée. (Sassine Ch., 1998) a introduit dans ses recherches la prise en compte des interrelations entre les services de production et de maintenance. Leurs objectifs étaient d'améliorer la disponibilité des unités de production et de réduire le coût de maintenance en réduisant le coût de ses ressources.

La notion de la maintenance centralisée, dans la thèse de (Abbou R., 2003) à travers la conception d'un atelier central de maintenance, qui a prouvé que la centralisation de maintenance permet, d'optimiser les ressources nécessaires aux activités de maintenance. De plus elle assure une assistance technique, une standardisation des procédures de maintenance et l'amélioration du niveau de communication et du retour d'expérience. En conséquence, une meilleure maîtrise des durées d'intervention ainsi que des coûts engendrés est obtenue.

Les premiers travaux qui synthétisent la méthodologie des stratégies de maintenance, ont été introduits par (Zwingelstein G., 1996).

La Maintenance Basée sur la Fiabilité (MBF) est née dans le secteur aéronautique à la fin des années 1970 avec les avions gros porteurs. Normalisée sous le nom de RCM (Reliability Centered Maintenance), elle est aujourd'hui utilisée par toutes les compagnies aériennes majeures et dans les autres secteurs industriels en quête de compétitivité. Le principe de cette politique de maintenance, structurée et rationnelle, est d'identifier les matériels dont les modes de défaillances ont des conséquences significatives pour les objectifs de l'entreprise (productivité, sécurité, qualité, coûts...) et de ne retenir que des tâches efficaces et applicables de maintenance préventive. L'ouvrage analyse en détail les étapes indispensables pour établir les programmes de maintenance préventive, met en relief les problèmes de changement de culture associée à une mise en place et à la pérennité d'une démarche MBF. L'ouvrage est illustré d'exemples de ses applications industrielles et d'un historique de son développement dans l'industrie aéronautique. Il précise l'importance des rôles de l'analyse fonctionnelle et du retour d'expérience. En conclusion, il fournit un ensemble de recommandations pour une mise en place efficace de la MBF en précisant les avantages et limitations des différentes variantes opérationnelles de celle-ci.

Il est noté que parmi les facteurs qui contribuent au maintien et l'amélioration de la disponibilité et à la sûreté de fonctionnement des installations industrielles complexes, les méthodes de diagnostic de défaillances représentent des leviers significatifs. Le diagnostic industriel peut se formuler comme la modélisation de la relation de cause à l'effet sous l'angle d'une relation de causalité déterministe. Dans (Zwingelstein G., 1995) des méthodologies associées à la résolution du problème de diagnostic des défaillances des systèmes industriels complexes sont proposées avec un ensemble de solutions inductives et déductives pour le

diagnostic interne et externe de système. Chaque méthode est exposée avec des recommandations sur leurs limites d'utilisation. L'ouvrage constitue un support pour mettre en œuvre les méthodes de diagnostic de défaillances des systèmes industriels.

Concernant la gestion de la maintenance dans les systèmes industriels, plusieurs travaux proposent des démarches méthodologiques :

(Deborde R., Georjon A., 1999), (Francastel J-C., 2001), (Principe R., Jacquemyns Y.) (Rustenburg J., 2000) Et (Gosse B., Sargis C., Sprimont P., Benavent C., 2000).

Dans (Deborde R., Georjon A., 1999), une approche appelée " technicien de maintenance" est définie. Elle est basée sur l'analyse des principes de fonctionnement sans oublier la conception et l'étude des solutions technologiques. Son ouvrage comporte des dossiers techniques qui peuvent être utilisés tels quels ou rebâtis pour créer de nouvelles situations d'apprentissage.

Dans le cas de l'externalisation de la maintenance, (Francastel J-C., 2001), s'intéresse à la prise en compte de compétences externes. Les exigences accrues de flexibilité et de réactivité, le développement de spécialisations pointues, obligeant les exploitants industriels et les propriétaires de patrimoines à se tourner vers des compétences extérieures. Sous-traitance, partenariat, ou alliance. Il existe des méthodes, des lois, des normes et des résultats d'expériences qui restent à valoriser. Cet ouvrage propose des solutions pour l'externalisation de la maintenance, en abordant :

- la stratégie : présentation du marché et des acteurs de la maintenance, critères de choix de l'externalisation.

- le cadre relationnel : textes de lois et normes relatifs au sujet, clés pour le choix du prestataire.

- le contrat : éléments contractuels (cahier des charges, clauses juridiques et commerciales), exemples de rédaction, et contrôle des performances.

D'autres travaux concernent directement les responsables maintenance, directeurs techniques, chefs d'entreprise, et aux consultants en gestion industrielle, par exemple (Cuignet R, 2002). Il propose une approche pour améliorer les performances opérationnelles et financières de maintenance dans les entreprises industrielles. Il est précisé dans cet ouvrage que pour éviter les problèmes liés aux retards de livraison, stocks surdimensionnés, problèmes de trésorerie... il est nécessaire de mettre en place un management efficace et pertinent de la maintenance. Cet ouvrage décrit les méthodes et les outils qui permettent d'assurer cette efficacité. Il présente des critères d'un référentiel de bonnes pratiques de management et des actions à mettre en œuvre afin de valoriser ces enjeux et améliorer les

performances de la maintenance au niveau opérationnel (fiabilité et volumes de production), financier (coûts et rentabilité des capitaux engagés) et humain.

Certains travaux concernent l'évaluation de l'impact des politiques de maintenance appliquées sur des machines de production comme (Ait-Kadi D., Et Al.,2010) (Enscore E. Et Burns D., 1983), (Banerjee A., Flynn B, 1987),(Kelly C. Et Al., 1997), (Kuhn H., 1999), (Chatelet E. Et Al., 2002),(Zemouri R. Et Al., 2003). Ce dernier présente les résultats d'une étude d'amélioration des performances d'un service de maintenance des unités de production dans un site d'Automobile. Sa mission s'appuie principalement sur une étape de modélisation par les réseaux de Petri Stochastiques. Il calcule le taux d'occupation de chaque place du modèle. Ce taux d'occupation prend en considération les taux d'entrée et de sortie correspondant aux différentes étapes du processus de réparation. Il considère ce taux comme un indicateur de performances du système. Les problèmes de manque de données dans l'historique de réparation de l'entreprise, ont été contournés grâce à une démarche déductive itérative par simulation.

Dans les travaux concernant le problème d'optimisation des coûts de maintenance : certains auteurs se basent sur la marge du coût dans le cas de maintenance préventive (Ait-Kadi D., Et Al., 2010) (Kaffel H., 2001) (Dekker R. Et Roelvink I., 1995) Et (Frenk J. B. G., Dekker R., Kleijn M. J., 1995), d'autres références considèrent l'optimisation du point de vue management (Lounis, Vanier D.J., 1998) ou d'ordonnancement (Tianhai Z., Yong Q.I, Junyi S., Di H., Xiaomei Z., 2006). Ce dernier, présente des résultats numériques qui montrent qu'une meilleure réorganisation du calendrier des activités de maintenance peut réduire les coûts de maintenance.

Au niveau de logiciel nous trouvons : (Harry M. S., 2004), (Jansen S., Rijsemus W., 2006), (Jonge M., Monajemi R., 2001) et (Keizers J.,Adan I., Van Der Wal J., 2001)

Pour plus d'informations, le lecteur peut consulter d'autres travaux concernant la gestion de maintenance et son optimisation. Il nous suffit ici de signaler ces références,comme (Simeu-Abazi, 2000), (Ait-Kadi D., Nourelfath M., 2007) et (Simeu Abaziet al.,2000).

Le problème « L'organisation et la structuration de la maintenance » n'a pas été trop abordé. Peu de travaux ont considéré la fonction maintenance comme une fonction stratégique au sein de l'entreprise et ont pris en compte ses activités dans la structuration en phase de conception du système de production conjointement avec la fonction de production.

- ***Conclusion de l'état de l'art***

Les références existantes traitent de la maintenance dans l'optique d'améliorer la production, d'optimiser la maintenance par la résolution des problèmes d'organisation et de

gestion les ressources de maintenance, et qui sont trop centrés sur le maintien des systèmes à risque (avion, nucléaire, naval, …) et un peu moins sur les secteurs de production manufacturiers.

Ils s'intéressent à la résolution des problèmes qui peuvent apparaître, et ceci dans les meilleurs cas, prévenir ces problèmes et proposer des pré-solutions, toujours pour des systèmes qui sont déjà structurés. Ainsi, dans ce cas, la fonction de maintenance reste toujours une fonction insérée dans un bloc de taille déterminée et souvent limité, et elle doit s'adapter avec les contraintes et les critères de ce bloc.

1.3 Définition de la maintenance

Selon l'AFNOR par la norme NF X 60-010, la maintenance se définit comme étant : ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé. Bien maintenir, c'est assurer l'ensemble de ces opérations au coût optimal.

La définition de la maintenance fait donc apparaître 4 notions :

- Maintenir qui suppose un suivi et une surveillance ;
- Rétablir qui sous-entend l'idée d'une correction de défaut ;
- Etat spécifié et service déterminé qui précise le niveau de compétences et les objectifs attendus de la maintenance ;
- Coût optimal qui conditionne l'ensemble des opérations dans un souci d'efficacité économique.

Le rôle de la fonction maintenance dans une entreprise (quelque soit son type et son secteur d'activité) est donc de garantir la plus grande disponibilité de équipements au meilleur rendement tout en respectant le budget alloué.

1.4 Rôle de la maintenance

Le service maintenance doit mettre en œuvre la politique de maintenance définie par la direction de l'entreprise ; cette politique devant permettre d'atteindre le rendement maximal des systèmes de production. Cependant, tous les équipements n'ont pas le même degré d'importance d'un point de vue maintenance. Le service devra donc, dans le cadre de la politique globale, définir les stratégies les mieux adaptées aux diverses situations. La fonction maintenance sera alors amenée à établir des prévisions ciblées :

- **Prévisions à long terme :** elles concernent les investissements lourds ou les travaux durables. Ce sont des prévisions qui sont le plus souvent dictées par la politique globale de l'entreprise ;

- **Prévisions à moyen terme :** la maintenance doit se faire la plus discrète possible dans le planning de charge de la production. Il lui est donc nécessaire d'anticiper, autant que faire se peut, ses interventions en fonction des programmes de production. La production doit elle aussi prendre en compte les impératifs de suivi des matériels ;
- **Prévisions à courts termes :** elles peuvent être de l'ordre de la semaine, de la journée, voire de quelques heures. Même dans ce cas, avec le souci de perturber le moins possible la production, les interventions devront elles aussi avoir subi un minimum de préparation.

1.5 Politiques de maintenance

Par définition, la maintenance vise \ *toutes les activités destinées à maintenir ou à rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise. Ces activités sont une combinaison d'activités techniques, administratives et de management*" (AFNOR, 1988). Au sein du service de maintenance, on distingue globalement deux politiques de maintenance : la maintenance corrective et la maintenance préventive. Toutefois, quand une tâche de maintenance préventive est réalisée sur un équipement suite à la défaillance d'un autre équipement, on parle de maintenance mixte ou opportuniste. La définition de chacune de ces politiques est donnée ci-dessous.

1.5.1 Maintenance corrective

Elle regroupe les différentes opérations effectuées après l'apparition d'une défaillance sur un équipement donné. Ces opérations comportent notamment la localisation de la défaillance et son diagnostic, la remise en état avec ou sans modification et le contrôle du bon fonctionnement. Il est à souligner que les activités de maintenance corrective sont subies et découlent directement des conséquences de l'apparition d'une défaillance. Ces activités englobent deux types d'interventions :

- Les interventions *palliatives* qui remettent l'équipement en état de fonctionnement provisoirement. Cette maintenance palliative est principalement constituée d'actions à caractère temporaire qui devront être suivies d'actions curatives;
- Les interventions dites *curatives*, qui réparent l'équipement d'une manière définitive. Ces activités peuvent être des réparations, des modifications ou des remplacements ayant pour objet de supprimer la ou les défaillance(s).

1.5.2 Maintenance préventive

Cette maintenance a pour objet d'éviter la dégradation de l'équipement et par conséquent réduire la probabilité d'occurrence d'une défaillance. Les activités correspondantes sont déclenchées selon un échéancier établi à partir d'un nombre prédéterminé de pièces usinées (*maintenance systématique)* ou à partir de critères prédéterminés significatifs de l'état de dégradation de l'équipement (*maintenance conditionnelle*). On trouve aussi une maintenance dite de *ronde* qui se caractérise par une surveillance régulière de l'équipement sous forme de visite à fréquence élevée, entraînant si nécessaire des travaux mineurs d'entretien. Sommairement, on distingue :

- Maintenance *systématique* : correspond à l'ensemble des actions destinées à restaurer, totalement ou partiellement, la marge de résistance des matériels non défaillants. Elle comprend le remplacement systématique de certains composants critiques en limite d'expiration de leur durée de vie, le remplacement de composants peu coûteux pour éviter les dépenses d'évaluation de leur état et l'essentiel des opérations de service (remplacement des filtres, du fluide, ...). Remarquons que ce type de maintenance est appliqué sur des composants dont on connaît de façon précise la durée de vie moyenne ou lorsque des contraintes réglementaires (souvent liées à la sécurité) sont obligatoires.
- Maintenance *conditionnelle* : elle est effectuée sur la base de critères d'acceptation préétablis, suite à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs. Elle admet toutefois que l'équipement puisse continuer à fonctionner en dépit de l'occurrence de défaillances progressives, tant que celles-ci n'ont pas atteint les limites spécifiées. En revanche, ce type de maintenance requiert des tâches additionnelles pour évaluer le niveau de dégradation de l'équipement et entamer ensuite les interventions nécessaires.
- Maintenance *prédictive* : ce type de maintenance est subordonné à l'analyse de l'évolution surveillée de la dégradation de l'équipement (par exemple autodiagnostic, information d'un capteur). Elle permet ainsi d'optimiser, en retardant ou en avançant, la planification des interventions.

1.5.3 Maintenance mixte

La maintenance mixte consiste à profiter de l'opportunité offerte par l'arrêt d'un système pour effectuer parallèlement d'autres interventions, prévues ou non, sur d'autres éléments. Le système considéré peut être :

- *une machine* : lors de la défaillance d'un équipement, on profite de l'arrêt de la machine pour effectuer des interventions sur d'autres équipements de la même machine ;

- *une ligne de production* : lors de l'arrêt de la machine, des interventions sont réalisées sur une ou plusieurs machines de la même ligne et dont l'arrêt ne pénalisera pas le fonctionnement de l'unité de production.

La figure 1.2 résume les différents concepts de maintenance qu'on trouve dans la littérature, en indiquant les événements initiateurs.

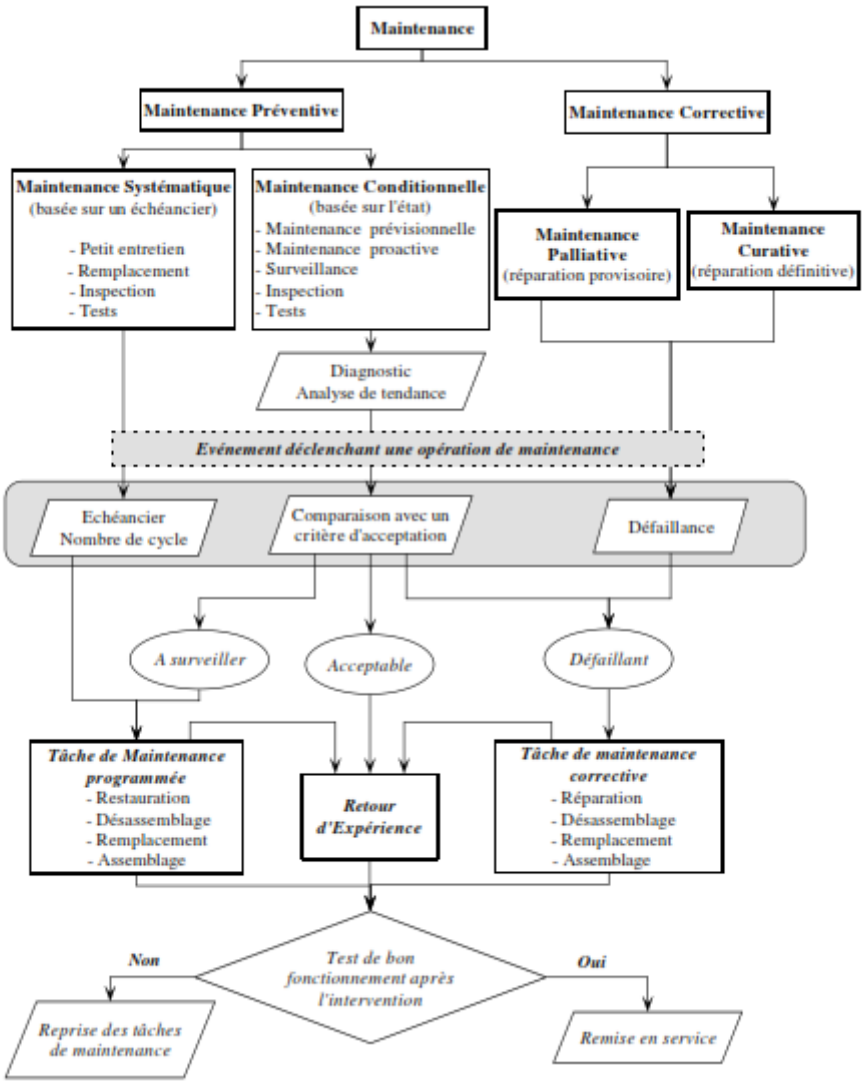


Figure 1.2 Diagramme des différents concepts de maintenance

1.6 L'optimisation de la maintenance

Au vu de l'importance du processus maintenance et de son impact sur les performances des installations, des méthodes d'optimisation ont été développées. Elles permettent d'aider les responsables de maintenance à construire ou à modifier les stratégies de maintenance.

L'étude de (Despujols, 2005) présente les principales méthodes d'optimisation des stratégies de maintenance en soulignant les différents objectifs qui ont guidé leur développement.

On peut noter que certaines méthodes d'optimisation de la maintenance ont été initialement développées dans les domaines de l'aéronautique et de la production d'énergie, en particulier pour les centrales nucléaires avant d'être adaptées et appliquées dans d'autres secteurs industriels. En effet, les risques présentés par ce type d'installations pour les personnes et l'environnement implique une vraie rigueur dans leur exploitation et leur utilisation. Il existe un réel souci d'appréhension des limites, pour réduire au maximum les dangers mais aussi diminuer les interventions inutiles. Ainsi, la sûreté et la sécurité ont été à la base des documents (MSG, 1993) établis par le Maintenance Steering Groug pour définir et décrire le programme de maintenance préventive du Boeing 747. Ces objectifs ont également guidé la définition de la Reliability Centred Maintenance, (Moubray, 1997), et des méthodes de Risk- Based et Risk-Informed.

Les études (EPRI, 1982) de Reliability Centred Maintenance menées par l'Electric Power Research Institute pour l'industrie nucléaire américaine ont été principalement motivées par la maîtrise des coûts. La disponibilité est le facteur prépondérant dans la mise en œuvre des actions Total Productive Management. Les approches japonaises s'intéressent quant à elles d'avantage aux processus de fabrication avec la recherche d'amélioration continue.

Les démarches d'optimisation de la maintenance consistent généralement à effectuer une analyse des risques ainsi qu'une étude du retour d'expérience de manière à pouvoir sélectionner les tâches de maintenance. Dans ce cadre, EDF a mis en œuvre une démarche nommée OMF, aujourd'hui utilisée par d'autres secteurs industriels, et motivée par l'ensemble des critères techniques : sûreté – disponibilité – coûts.

1.7 La maintenance et son intégration dans la conception

L'intégration de la maintenance dans la conception d'un équipement conduit à considérer les concepts de fiabilité, de maintenabilité, disponibilité, sécurité et soutien logistique. Cette approche des choses vise à influencer les décisions pendant la conception afin de réduire le coût global de maintenance durant tout le cycle de vie de l'équipement. Les concepts globaux de Sûreté de fonctionnement (Sdf) et de Soutien logistique intégré (Sli) offrent un cadre méthodologique, pour assurer dès la conception, respectivement les facteurs de mise en sécurité, de conformité et de disponibilité du futur produit par rapport à son milieu. L'intégration d'un concept dans la conception doit être une réponse à un besoin bien fondé, spécifique à un contexte.

1.7.1. Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité

1.7.1.1. La fiabilité

La fiabilité a été définie pour la première fois par l' *Advisory Groupe on Reliability of Electronic Equipemnt (AGREE)* en 1957 aux Etats Unis (Chapouille, 1999) et repris en 1984 par l'AFNOR NF X 06-501, elle désigne *«la caractéristique d'un dispositif exprimée par la probabilité que ce dispositif accomplisse une fonction requise dans des conditions d'utilisation données et pour une période de temps déterminée ».* Elle traduit l'aptitude d'une entité à avoir une faible fréquence de défaillance.

La défaillance selon l'AFNOR NF X 60-11 désigne « *l'altération ou la cessation d'un bien à accomplir la fonction requise* ». La fonction requise ou fonction de service est définie en tenant compte d'un seuil d'admissibilité, au delà duquel pour cause de défaillance, la fonction n'est plus remplie. Ce seuil est fixé selon la nature du service, les exigences du client et les considérations de coût. La fiabilité est donc une caractéristique de la qualité car elle traduit un besoin à respecter dans la définition des performances de la fonction à remplir. Les concepteurs, pour intégrer la fiabilité, utilisent des indicateurs quantitatifs de fiabilité comme éléments de décision dans la conception des équipements. Ces indicateurs sont généralement le taux de défaillance (λ*)* et la Moyenne des Temps de Bon Fonctionnement (*MTBF)*. Ils sont établis rigoureusement sur la base de fonctions de probabilité de la fiabilité ou « Reliability » *R(t),* obtenue de deux manières :

- par la loi de survie, quant il s'agit d'avoir des précisions sur la défaillance dans le temps d'un dispositif. Elle est souvent appliquée pour tester l'endurance des composants mécaniques ou électroniques. La fiabilité *R(t)* est le rapport du nombre d'équipements *N(t)* qui fonctionnent encore au temps t sur le nombre *No* d'équipements identiques initiaux, pour une durée donnée de fonctionnement *t* :

$$R(t) = N(t)/N_0 \qquad [1.1]$$

- par le taux de défaillance λ *(t)* selon une approche probabiliste, *f(t)* étant la densité de probabilité de défaillance :

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int f(t)\, dt = e^{-\int \lambda(t)\, dt} \qquad [1.2]$$

Cette fonction est le complément de la fonction de répartition de défaillance, *F(t) = 1 - R(t)* dont la dérivé *f(t)* est la densité de probabilité des défaillances. La fonction de répartition de défaillance est construite sur la base d'un relevé rigoureux de la traçabilité des

défaillances (temps et description de l'événement) et la densité de probabilité de défaillances indique la loi de probabilité à retenir pour identifier λ (t), indispensable pour expliquer le comportement des défaillances (Figure. 1.3) en fonction de la période de vie d'un dispositif.

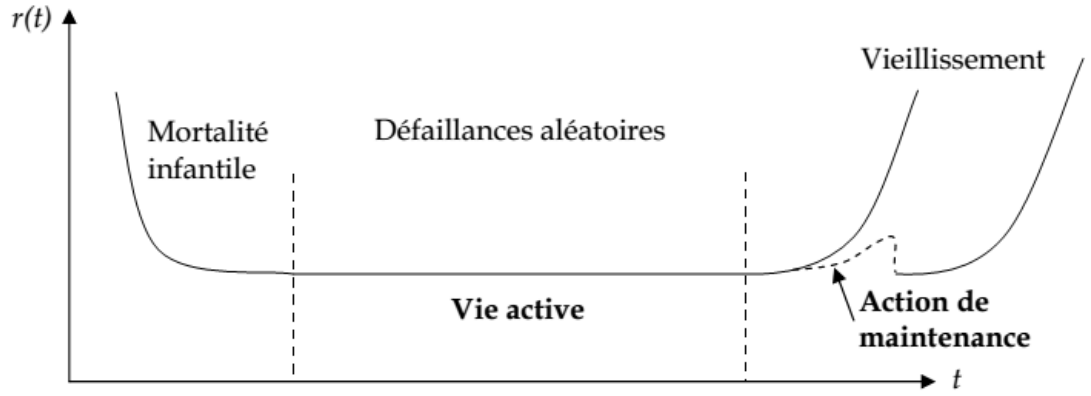


Figure 1.3 Taux de défaillance en fonction de l'âge : courbe en baignoire (Chapouille, 1999)

Le taux de défaillance λ *(t)* est quasi constant (période de vie utile) si *f(t)* est une loi exponentielle. L'utilisation de la loi de Weibull a l'avantage de couvrir toutes les périodes de vie de l'équipement, le taux de défaillance variable et décroissant, constant, variable et croissant correspondant respectivement aux périodes de vie de jeunesse (I), de vie utile (II) et de vieillesse (III). Cette loi donne également des détails sur le diagnostic de la défaillance. A la période de vieillesse il est conseillé pour des questions de rentabilité, d'effectuer des travaux de reconstruction, de rénovation ou de remplacer l'équipement.

Ces lois permettent de déduire les indicateurs MTBF et λ*(t)* :

$$MTBF = \int R(t)dt \qquad [1.3]$$

Ceci correspond à l'expression générale de la fiabilité.

$$\lambda(t) = 1/MTBF \qquad [1.4]$$

Cette égalité est valable si λ(t) = constant, c'est-à-dire la densité de probabilité des défaillances f(t) suit une loi exponentielle.

Dans le cas ou le système à étudier est composé de plusieurs éléments, la fiabilité se détermine en tenant compte de différentes configurations. Pour un système *S* de *i* éléments disposés en série :

$$R_S = \prod_{i=1}^{i} R_i(t) \qquad [1.5]$$

Pour un système *S* de *i* éléments disposés en parallèle :

$$R_S = 1 - \prod_{i=1}^{i}[1 - R_i(t)] \qquad [1.6]$$

L'étude de la fiabilité d'un composant ne tient pas compte des erreurs humaines lors de l'utilisation c'est à dire les fausses manœuvres, le mauvais emploi des équipements et l'exécution de tâches de maintenance non conformes(Monchy, 2000).

Monchy (2000) propose d'autres indicateurs moins rigoureux mais certainement plus accessibles pour évaluer la fiabilité des équipements:

- Le Nombre de défaillances *N* pour une période donnée ;
- Le *MTBF* déterminé à partir d'une moyenne statistique d'un échantillon de N durées, les *TBF* : Temps de Bon Fonctionnement exprimés en heure de fonctionnement ;

$$MTBF = \frac{\sum TBF}{N} \qquad [1.7]$$

- Le taux de défaillance moyen λ est exprimé en nombre de pannes / unité d'usage.

Les analyses de défaillance prévisionnelle ou opérationnelle, réalisées en complément d'informations liées aux indicateurs aident les concepteurs à mieux intégrer la fiabilité. Ces outils d'analyses de défaillance sont l'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leurs Criticités (AMDEC) (Riout, 1994; Ridoux, 1998; Monchy, 2000; Landy, 2002), le diagramme d'Ischikawa (Monchy, 2000; Schoefs, 2001) et les arbres de défaillance (Mortureux, 2001; Francastel, 2003). L'AMDEC permet de recenser les conséquences des défaillances et de les classer selon leur indice de criticité, le diagramme d'Ishikawa visualise et relie les causes et les effets des défaillances; les arbres montrent des scénarios pour mieux expliquer une situation de défaillance, d'événement ou de cause. Ces outils nécessitent la mise en place d'une équipe et la traçabilité des pannes. Des concepts de management par la maintenance dans l'entreprise prennent en compte l'aspect amélioration continue de la conception des équipements afin d'éviter la défaillance :

- la Total Productive Maintenance (TPM) vise le zéro panne dans l'entreprise (Nakajima, 1989) en responsabilisant les opérateurs aux tâches de maintenance. Actuellement ce concept va plus loin en intégrant dans la conception des équipements les aptitudes de l'opérateur à auto maintenir son outil de travail (Manata, 1996; Pimor, 2001) ;
- la Maintenance Basée sur la Fiabilité (MBF) (Monchy, 2000) identifie les équipements critiques par rapport à la production. Les maintenances systématique et conditionnelle sont prioritairement prises en compte dans la conception. Les pièces sont remplacées selon un échéancier par unité d'usage établi par le constructeur. Dans d'autres cas (loi d'usure non maîtrisée, pièces

inaccessibles), des capteurs de suivi de l'état de dégradation indiquent le remplacement en fonction d'un seuil de l'état de dégradation.

L'Asset Management (Vanier, 2001; Hassanain, Froese et al., 2003; Nikolopoulos, Metaxiotis et al., 2003) fonde une stratégie de l'entreprise autour de la maintenance en se basant sur les effets de la défaillance. Ces effets sont évalués en chiffre d'affaires perdu et servent de justificatif pour améliorer la fiabilité des équipements. Ce concept est utilisé par des grandes entreprises aux moyens de production automatisés. Il intègre par le biais du chiffre d'affaire toutes les composantes des services de l'entreprise, des progiciels sont réalisés en fonction de la structure de l'entreprise et adaptés aux équipements pour aider à la gestion. Palmer (2002) indique que grâce à ce concept une industrie agroalimentaire, spécialisée dans la production de chips Mc Cain en Angleterre qui emploie 250 personnes et réalise un chiffre d'affaire annuel de 85 millions de Livres Sterling a fait passer la disponibilité opérationnelle moyenne des équipements de production de 87,5 à 97,4 % en améliorant leur fiabilité. Ces équipements ont été améliorés et adaptés à un progiciel de gestion intégré (ERP : Enterprise Resource Planning) basé sur la maintenance conditionnelle. Les signes prédéterminés aux défaillances sont détectés par des capteurs infrarouges, sonores, etc. Ces concepts ne sont pas transposables dans les petites unités de transformation telle qu'ils se présentent.

Considérer la fiabilité dans la conception revient à chercher à réduire le nombre probable de défaillances du futur équipement. Les besoins exprimés en terme de fiabilité varient selon les domaines et la sécurité exigée, le nucléaire, l'aéronautique et les grandes firmes de production en série de produits réclament la fiabilité maximale de leur installation. Le manque de fiabilité a souvent entraîné le dépôt de bilan dans les moyennes entreprises où ce facteur est très important. Par contre pour les TPE et PE la fiabilité est moins cruciale. La fiabilité est avant tout un critère de qualité, elle a un coût que les utilisateurs et équipementiers de moyennes entreprises ne sont pas toujours prêts à assumer. Les utilisateurs ont une préférence pour les pièces bon marché car le faible pouvoir d'achat est fortement limitant. Le manque de traçabilité des défaillances dans les petites entreprises ne permet pas d'exploiter les indicateurs de fiabilité. L'idée ne consistera pas forcement à réduire les défaillances probables mais à se servir d'un indicateur de fiabilité pour la conception.

1.7.1.2. La maintenabilité

Kapur et Lamberson (1977) définissent la maintenabilité comme étant « *la probabilité d'un dispositif à être maintenu ou rétabli dans des conditions données, pendant un intervalle*

de temps donné ». Selon par la norme Afnor X 60-500 (1988) la maintenabilité est « *l'aptitude d'une entité 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 ».* Un équipement est maintenable s'il peut être réparé rapidement. La réparation est l'ensemble des opérations élémentaires de rétablissement incluant les délais logistiques. Elle est d'autant meilleure que les tâches de maintenance sont faciles et simplifiées dès la conception. La maintenabilité fait allusion à la rapidité des tâches de réparation alors que la fiabilité s'intéresse à la réduction du nombre de défaillances.

Les indicateurs de maintenabilité sont le taux de maintenanbilité $\mu(t)$, introduit de façon similaire au taux de défaillances $\lambda(t)$ et le *MTTR*, traduction de « Mean Time To Repair ». Ils sont évalués selon l'approche probabiliste, $g(t)$ étant la densité de réparation:

$$M(t) = \int_0^t g(t)dt = 1 - e^{-\int_0^t \mu(t)dt} \quad [1.8]$$

$$MTTR = \int_0^\infty tg(t)dt \quad [1.9]$$

Expression générale de la MTTR

$$\mu(t) = \frac{1}{MTTR} \quad [1.10]$$

Egalité est valable si $\mu(t)$ = constant c'est-à-dire la densité de probabilité des défaillances f(t) indique un loi exponentielle.

Il existe également des indicateurs moins rigoureux mais certainement plus accessibles pour évaluer le temps de réparation des équipements :

Le nombre de Pannes : N

Moyenne des temps de réparation $MTTR = \frac{\sum(TTR)}{N}$ [1.11]

TTR étant le temps d'une réparation

Pour la conception on parle plutôt de maintenabilité intrinsèque pour désigner l'aptitude propre d'un bien a être rétabli en l'état dans un temps prévu et la maintenabilité opérationnelle pour évaluer ces aptitudes sur le terrain (Monchy, 2000) en prenant en compte les moyens opérationnels disponibles dans l'entreprise. La maintenabilité intrinsèque selon la norme X 60-301 est caractérisée par quatre principaux critères pour une maintenance corrective et préventive : *l'accessibilité, la démontabilité, l'aptitude à la pose et à la dépose, l'interchangeabilité*.

Intégrer la maintenabilité en conception consiste à chercher à minimiser les temps de réparation. Il s'agit de savoir si le temps de réparation constitue une préoccupation prioritaire des petites et moyennes entreprises.

1.7.1.3. La disponibilité

La fiabilité et la maintenabilité concourent à définir la notion de disponibilité opérationnelle qui selon la norme NF X 60-503 désigne «*l'aptitude d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données et à un instant donné*». Elle peut être décomposée en disponibilité intrinsèque qui fait référence au concepteur et en disponibilité opérationnelle qui fait référence à l'utilisateur (Ligeron, 1988).

La disponibilité intrinsèque est définie par :

$$D_i = \frac{\mu}{\mu+\lambda} = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR} \qquad [1.12]$$

La disponibilité opérationnelle est définie par :

$$D_i = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR+MTL} < 1 \qquad [1.13]$$

MTL = Mean Time to Logistic. Ce temps est relatif aux délais d'approvisionnement des pièces et de transport.

La disponibilité doit tendre vers 1 pour que l'équipement soit rentable pour l'entreprise.

1.7.1.4. La Sûreté de fonctionnement Sdf

Certifiée par l'ISO 9000, la sûreté de fonctionnement représente «l'ensemble des propriétés qui décrivent la disponibilité et les facteurs qui la conditionnent. La fiabilité, la maintenabilité, et la sécurité». Ce concept met en évidence les événements redoutés, indésirables, leurs fréquences et leurs gravités afin d'établir un diagnostic qui servira d'élément de décision sur le risque de dysfonctionnement d'un système (Mortureux, 2001). La Sdf est un état d'esprit d'abord avant d'être une méthode. Elle ajoute la composante « sécurité de l'opérateur ». La composante sécurité désigne «l'aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques et catastrophiques pour le système, son environnement et les hommes qui l'utilisent».

Par exemple les erreurs humaines sont souvent source de défaillances technologiques, quand bien même les calculs affichent une fiabilité maximale. Selon Monchy (2000) elles sont d'origines diverses, psychologique (machinale, réflexes), physique

(apprentissage), cognitif (diagnostic) et se manifestent durant « *la perception, à la réflexion du cerveau puis à l'action résultante via la coordination motrice* ». Ces aspects sont liés en grande partie au management du personnel en charge de la maintenance des équipements et doivent être progressivement intégrés dans la conception (Grusenmeyer, 2002). C'est pour cela que Pimor (2001) soutient que la prise en compte du facteur humain devient « *un point capital pour la performance et la sécurité* ». Dans les secteurs industriels où la sécurité doit être maximale on parlera plutôt de Sécurité de fonctionnement.

La protection de l'environnement contre la pollution est l'une des missions assignée à la maintenance. Le Sdf recommande de prendre en compte dès la conception, des procédures de protection de l'environnement définies par la législation en vigueur.

Plusieurs outils permettent d'avoir une approche Sdf dans la conception d'un équipement, il s'agit principalement de :

- l'APR (Analyses Préliminaires des Risques) qui repère *a priori* les risques potentiellement dangereux pour l'environnement dans son ensemble.
- l'AMDEC pour évaluer la criticité des défaillances ;
- Diagramme d'Ishikawa, des arbres de causes, d'événements, de défaillances pour expliquer une situation donnée à éviter.

Dans le contexte des petites entreprises ne sont pas soumises à une législation pour la protection de l'environnement ou des opérateurs. Par exemple le personnel travaille sans équipements de protection particulière. Le facteur sécurité de l'équipement et de son environnement doit être traité, il faudra nécessairement caractériser les défaillances qui sont potentiellement dangereuses pour l'opérateur et son environnement.

1.7.1.5. Le soutien de logistique intégré (Sli)

Pons (1993) définit le Sli comme étant «*une approche globale et itérative des activités de management et des activités techniques dès la conception et dont l'objectif est d'assurer à un système des performances aux meilleurs coûts et délais tout au long du cycle de vie*».

Les activités consistant à spécifier, définir, développer, produire et livrer en temps utile l'ensemble des produits logistiques qui constituent le sous système de soutien (Dumez,1993). Certifié par l'ISO 9000 le soutien de logistique intégré (Sli) de la maintenance «consiste à assurer le maintien en conditions opérationnelles d'un système, afin que ce dernier puisse assurer les missions pour lesquelles il a été conçu durant toute sa durée de vie». Ceci nous conduit à clarifier également la notion de durabilité d'un équipement «comme étant la durée de vie ou de fonctionnement potentiel d'un bien

pour une fonction qui lui a été désignée, dans des conditions d'utilisation et de maintenance donnée».

Le Sli est caractérisé par neuf (9) critères qui décrivent l'environnement social et technique de l'entreprise. La formation, le personnel, la documentation technique, le soutien informatique, les infrastructures, les approvisionnements, l'emballage ou la manutention ou le stockage ou le transport, et les équipements de soutien ou de tests. Cette approche très générale dans la conception consiste à intégrer les critères du Sli pour faciliter la maintenance de l'équipement durant son utilisation.

Dans les petites et moyennes entreprises les utilisateurs ont beaucoup de difficultés pour s'approvisionner en pièce de rechange, les formations en maintenance ne sont pas connues, les routes ne sont pas toujours accessibles dans les zones périphériques et l'outil informatique est encore au stade embryonnaire dans les pratiques. Le concept de Sli est très pertinent mais néanmoins pour l'appliquer dans la conception, il faut nécessairement choisir les éléments clefs du soutien logistique (la formation, les approvisionnements, le transport, et les équipements de soutien ou de test) car celui-ci doit se réfléchir dans un contexte de réseau de petites ou très petites entreprises et non comme dans les pays industriels dans celui d'entreprise unique capable de manager seule toutes les composantes du Sli.

1.7.1.6. Le Life cycle Cost

Le « Life cycle Cost » (LCC) ou coût sur le cycle de vie est défini par la norme X50 150 comme étant « le coût d'acquisition ou de possession d'un produit pendant une période déterminée de son cycle de vie.

- *Il peut comprendre le coût de développement, d'obtention, de formation des utilisateurs, de fonctionnement, de maintenance et de logistique, de retrait de service et d'élimination du produit;*
- Le cycle de vie est l'intervalle de temps qui va de la création du produit à son retrait de l'utilisation et son élimination ». Analyse du besoin, développement du produit, production, distribution, utilisation, déclassement et recyclage.

Le LCC retrace les ressources consommées par un produit sur l'ensemble de son cycle de vie et permet d'analyser les conséquences économiques d'un projet de conception sur une période allant de la conception du produit à son retrait sur le marché (Gautier,2003).

Pour minimiser les coûts directs et indirects de défaillance il serait nécessaire de définir toutes les autres composantes du coût sur le cycle de vie du produit. Cependant on est encore confronté au manque de traçabilité des coûts et il est donc difficile d'envisager

le calcul sous cette forme, d'autant que les coûts de conception sont souvent mal évalués, soit qu'il s'agisse d'un cadre non marchand de conception (projet de bailleur de fonds, ONG, Université, Centre de Recherche) soit qu'il s'agisse de la copie/adaptation d'un matériel dont les coûts de conception et de développement industriel ont déjà été assurés par ailleurs.

On pourra envisager de calculer le LCC sur la base du coût de fonctionnement, de maintenance et de possession. Il sera comparé au prix d'achat de l'équipement. Cet indicateur montre clairement 2 voies extrêmes de stratégie de conception, soit le coût d'acquisition est élevé, privilégiant une bonne fiabilité des composants, et le coût de maintenance est faible, soit le coût d'acquisition est bas mais les coûts de maintenance sont élevés, assurés par les revenus assurés par l'utilisation de l'équipement. Ce rapport qualité (fiabilité) prix est pertinent dans une démarche d'intégration de la maintenance notamment dans le choix des constituants disponibles dans les PME. Car intégrer la maintenance dans la conception c'est également se fixer un coût prévisionnel de maintenance du futur équipement en fonction du pouvoir d'achat de l'utilisateur, sachant que celui-ci fixe son choix avant tout sur le prix d'acquisition, sans vision prévisionnelle sur les coûts ultérieurs de maintenance.

La durée de vie d'usage de l'équipement doit également être précisée dans notre contexte. A ce sujet il serait intéressant d'interroger les utilisateurs sur leur vision en ce qui concerne les différentes étapes du cycle de vie et sur la durée d'usage d'un équipement. Il semble que dans les PME le cycle de vie n'est pas borné dans le temps, une récupération étant toujours envisageable, même dans le cadre d'un changement d'usage fonctionnel. Le rapport entre opérateur et équipement n'est pas forcement le même partout, l'équipement est-il le compagnon de tous les jours qui dépanne quand on en a besoin, ou est-il juste un instrument économique qui après un temps d'utilisation doit être remplacé parce qu'il n'est plus rentable ? Ces informations serviront de base pour définir le contenu du concept de LCC mais appliqué dans un contexte différent.

1.8 L'intégration de la maintenance dans la conception : Le Design For X (DFX)

La littérature propose une approche de conception pour l'intégration de la maintenance dans la ligné des outils de type DFX « Design For X » (Kuo, Huang et al., 2001). Ce concept du DFX c'est « concevoir pour le métier X » et n'est autre qu'une généralisation des outils du «*Design For Assembly*» (DFA) (Boothroyd et Alting, 1992) / « *Design For Manufacturing* » (DFM) (Stoll, 1988; Corbett, 1991). L'expertise métier est

formalisée en règles de conception pour participer à la prise de décision dans la conception. Ces règles sont portées par les acteurs de la conception. Le DFX est appliqué dans une optique de re-conception du produit, dans le sens d'une analyse *a posteriori* de la solution proposée.

Le DFA et le DFM intègrent la fabrication dans la conception alors que l'intégration de la maintenance est portée par le «*Design For Maintenability*» (DFMt), «*Design For Reliability »* (DFR), ou encore le «*Design For Maintenance»* (DFMAIN) (Kuo, Huang et al.,2001; Chen et Cai, 2003).

Nous nous appuyons sur le développement des concepts DFA, DFM, DFMt, DFR et le DFMAIN (Kuo, Huang et al., 2001; Chen et Cai, 2003) pour expliquer la démarche du DFX. Il est important pour nous de voir si ces concepts sont pertinents dans le contexte des PME.

1.8.1. Design For Assembly (DFA)

Dans les années 60 pour la première fois des industries développent des règles de fabrication qui sont prises en compte dès la conception. Mais c'est à partir des années 70 que le concept de *Design for assembly (DFA)* se développe grâce à une série de travaux sur les contraintes d'assemblage. Son objectif est de réduire le temps et le coût d'assemblage et de permettre une robotisation progressive de ces opérations.

Intégrer l'assemblage dans la conception implique une intégration au niveau du produit (Figure. 1.4). Ce niveau d'intégration (Aoussat et Le Coq, 1998) considère le produit en tant qu'ensemble de composants élémentaires et l'analyse se rapporte aux 3 couples du tripôle (produit-processus, processus-moyens, produit-moyens). Le problème de montage du produit, l'installation et l'organisation de l'atelier de montage sont le résultat d'une interaction construite dans le tripôle.

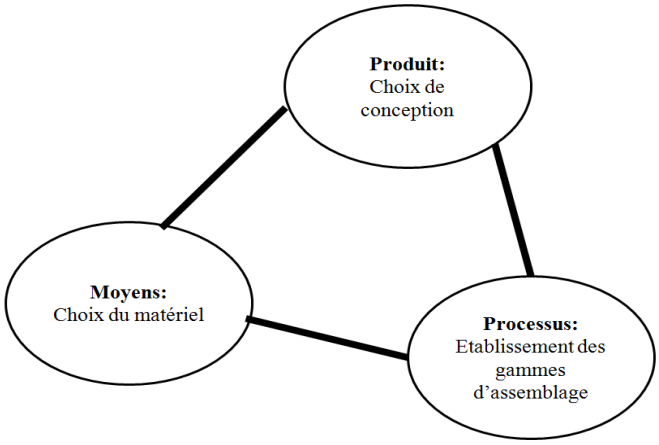


Figure 1.4 Intégration au niveau du produit (Aoussat et Le Coq, 1998)

Nous nous appuierons sur les travaux de Boothroyd et Dewhurst (1986) pour expliquer le *Design for assembly* (DFA). Il s'agit de l'intégration au niveau du produit-process. Le principe du DFA est basé sur la réduction du nombre de pièces et la facilité à manœuvrer les pièces à assembler mais en tenant compte des contraintes de conception (les caractéristiques fonctionnelles) du produit. Son application permet de réaliser des gains sur l'assemblage et de faire face aux exigences d'une production en série dans laquelle le respect des délais de livraison est de rigueur.

Le choix du mode d'assemblage est déterminant dans la conception du produit selon que l'assemblage est manuel, utilise des machines spécifiques ou fait appel à la commande robotisée; la définition du produit sera alors différente. Boothroyd et Dewhurst (1986) indiquent que la facilité d'assemblage des composants est basée sur leur aptitude à être facilement manipulés et insérés. Des outils logiciels de simulation des assemblages de composants dès la conception ont été développés, qui optimisent le produit conçu en minimisant le nombre de pièces à assembler.

Le concepteur, grâce à une série de questions relatives à la rapidité, la symétrie, la taille et l'angle d'insertion des pièces à assembler, apporte des modifications sur une solution existante. Le temps et l'efficacité d'assemblage servent d'indicateurs quantitatifs d'assemblage pour évaluer la facilité d'assemblage de la solution existante et apporter des actions correctives. Ces actions sont réalisées grâce à l'utilisation d'une série de règles de conception qui modélisent les connaissances du métier d'assembleur. Les règles du DFA sont :

- Réduire le nombre des pièces et les points de liaison, les variantes de conception des pièces, les gestes et directions d'assemblage ;
- Prévoir des chanfreins, des alignements automatiques, des accès faciles par des surfaces localisées, des symétries ou asymétries, des éléments facilitant la manœuvrabilité et le transport des pièces, des pokayokés ou « détrompeurs » (Nakajima, 1989; Lavina, 1996) ;
- Eviter l'obstruction visuelle, les opérations simultanées d'ajustage, l'entremêlement des connexions, les ajustements qui peuvent gêner l'ajustement prioritaire et les possibilités d'erreurs d'assemblage.

La démarche du DFA définit par Boothroyd et Dewhurst (1991) consiste à :

- La définition d'une méthode d'assemblage en fonction de la politique et du volume de production ;
- La recherche des possibilités pour supprimer les pièces non indispensables

ou à combiner avec d'autres pièces. Les pièces retenues donnent le nombre minimum théorique de pièces ;

- L'estimation de la durée totale d'assemblage réel des composants en utilisant des bases de données standards (abaques sur les formes des pièces) relatifs à ce type de produit ;
- La détermination de l'index du DFA le « *Manual Design Efficiency »* (MDE) qui est obtenu en faisant le rapport entre le délai d'assemblage minimum théorique sur le délai total d'assemblage réel obtenu par des bases de données. Ces bases peuvent être des abaques de temps d'assemblage du produit ou d'un produit similaire. Le modèle de l'index du DFA :

$$MDE = \frac{3 \times Theorical\ Minimum\ Number\ of\ parts}{Total\ Manual\ AssemblyTime} \qquad [1.13]$$

3 = temps théorique de prise du composant en seconde: (1,5 s) + temps théorique d'insertion du composant (1,5 s).

- Identifier les difficultés d'assemblage qui peuvent mené à définir les contraintes de fabrication et de qualité du produit. Les règles de conception vont servir à ce niveau dans la conception du produit mais en relation avec son processus de fabrication.

Le concept de DFA est pertinent pour les PME, non pour gagner du temps à l'assemblage car le facteur temps n'est pas limitant, mais pour une autre raison, réduire la complexité de montage en intégrant les tâches de maintenance que peut raisonnablement effectuer l'utilisateur lorsqu'il aura à effectuer le démontage puis le remontage de son équipement en cas de défaillance. On sait que les utilisateurs d'équipements des petites entreprises n'ont pas une connaissance technique suffisante pour assurer des opérations de maintenance de niveau 3, 2 ou bien sûr 1. Ces entreprises emploient des journaliers et des apprentis souvent analphabètes ; le guide d'entretien, écrit, parfois fourni par le constructeur, n'est donc pas adéquat et aucune formation à la maintenance n'est prévue. Il est important dans ce cas de minimiser les tâches de maintenance car les opérations de montage et de démontage sont fréquentes à cause du nombre élevé de défaillances.

La règle sur la réduction du nombre de pièces lors de la conception doit être appliquée avec beaucoup de prudence parce que les fabricants des PME ne disposent pas d'une grande diversité de modes de fabrication comme dans les pays du Nord. Plusieurs pièces simples à fabriquer sont préférables à une pièce complexe. Un autre facteur limitant est le coût. Une pièce complexe risque de ne pas être bon marché, la détermination d'un coût

maximum supportable par l'utilisateur pourrait être envisagé pour les différents sous-ensembles.

L'indice du DFA peut aider à réduire la complexité de montage dés la conception mais il est lourd à manipuler. Il n'est pas nécessaire de l'utiliser dans le cas d'équipements simples. Le DFA a également l'avantage d'intégrer plusieurs critères de maintenabilité, l'accessibilité, la démontabilité, la modularité et la détection. Ces critères sont définis dans le paragraphe *design for maintenability*.

1.8.2. Design For Manufacturing (DFM)

Le concept du DFM « *conception pour la fabrication »* vise à minimiser le coût de fabrication d'un produit en recherchant la meilleure solution de conception répondant le mieux aux besoins des clients et facilitant la réalisation. Le concept apparaît aux Etats Unis et au Japon, dans les années 1980 et découle de l'extension des travaux sur les contraintes d'assemblage. C'est une méthodologie globale permettant de couvrir le cycle de production de la pièce. Il se base sur la meilleure possibilité de fabriquer économiquement une pièce tout en respectant ses fonctionnalités. Il aide le concepteur à affiner la définition d'une pièce mécanique sachant que la matière et le procédé sont déjà imposés (Marouzé, 1999), ceci grâce à une analyse de faisabilité et de comparaison de coût.

L'intégration de la fabrication ce fait au niveau du composant élémentaire. L'intégration à ce niveau est historiquement, la première à avoir été prise en compte dans la fabrication du composant. Allen (1987) définit les trois domaines à intégrer au niveau du composant, il s'agit de la géométrie, du matériau et du processus (Figure. 1.5).

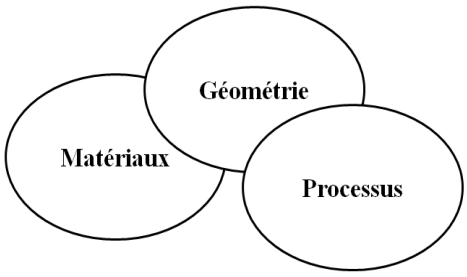


Figure 1.5 Intégration au niveau du composant (Allen, 1987)

C'est la fonction que doit remplir le composant qui pilote l'imbrication entre ces trois domaines (Bréchet, 1990). Ces domaines sont interdépendants car il est impossible de choisir un procédé de fabrication sans connaître les matériaux ou les formes. Ce niveau d'intégration d'assemblage au niveau du composant s'appuie sur le DFM qui est un prolongement du concept du DFA.

Il s'agit d'estimer la fonction coût de fabrication d'une pièce durant sa phase de

définition. Des outils d'aide (logiciels) sont utilisés à cet effet. Kirkland (1988) propose les facteurs qui influencent la conception pour la fabrication d'une pièce :

- la sélection de la matière d'œuvre ;
- le processus de fabrication économique ;
- l'utilisation de composants standard ;
- la conception de pièces à usage multiples ;
- la réduction des attaches multiples.

La prise en compte de ces facteurs nécessite l'utilisation d'outils d'analyses (expression du besoin, des priorités et des contraintes), de communication autour du projet, et de validation (évaluation à chaque niveau d'une solution).

On pourrait s'appuyer sur ces facteurs pour construire des règles qui tiendront compte du mode peu diversifié de la fabrication des pièces de rechange et la sélection de la matière d'œuvre de récupération. Les composants standard dans les PME ne sont pas toujours disponibles sur place ou ne sont pas à la portée des utilisateurs. A ce niveau il faudra préciser le concept de « *composant standard* » dans ce contexte. En effet les pièces commercialisées ou couramment utilisées constituent la seule alternative pour les concepteurs et les fabricants locaux.

1.8.3. Design For Maintenability (DFMt)

L'objectif du « Design for maintenability » est d'assurer au produit l'aptitude d'être maintenu à travers son cycle de vie utile à un coût raisonnable et sans difficulté. Les besoins spécifiques de la maintenabilité sont qualitatifs et quantitatifs. Plusieurs critères sont à intégrer en fonction de la spécificité de l'équipement. Chaque critère peut être considéré dans le concept du DFX comme le « X » élément à intégrer. En plus des quatre critères définis par la norme X 60-301, l'Institut de Sûreté Fonctionnement (ISDF) en propose 11, relatifs aux opérations de maintenance (Blancho, 1999), accessibilité, modularité,connectique, démontabilité, détectabilité, visibilité, manutentionalité, nettoyabilité, réparabilité, identification et repérage, interchangeabilité. Nous présenterons l'intérêt potentiel de quelque uns de ces critères selon leur importance par rapport à notre problématique.

1.8.3.1. L'accessibilité

L'accessibilité est caractérisée par la rapidité avec laquelle un élément peut être atteint. Il définit une trajectoire, un espace de dégagement ou une hauteur tout en s'appuyant sur des règles de sécurité et d'ergonomie. Le concepteur veille par exemple aux respects de données anthropométriques des individus (passage des membres, etc.).

1.8.3.2. La démontabilité

La demontabilité désigne la possibilité de fractionner, un ensemble en sous-ensembles ou en éléments constitutifs. Elle est fonction des aptitudes du personnel (qualification et compétences) en charge de la maintenance, des exigences de la conception liées aux performances, de la complexité technologique, du nombre d'outillage, de la documentation et du soutien logistique intégré. Pour analyser les aptitudes des opérateurs et les moyens ou méthodes à développés à l'occasion de la démontabilité il est nécessaire de connaître :

- les ressources humaines engagées ;
- les outillages nécessaires au démontage ;
- le temps mis effectivement pour le démontage et le remontage ;
- les pièces d'usure fréquente qui nécessitent ce type d'opération ;
- les difficultés physiques et psychologiques des opérateurs faces à ce type d'opération.

1.8.3.3. L'aptitude à la pose et à la dépose

L'aptitude à la pose et à la dépose caractérise 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 en vue d'assurer sa maintenance. Ce sont les types d'attaches telles que le positionnement par des pokayokés, les crochets qui sont utilisés et qui ne nécessitent pas le plus souvent d'utilisation d'outillage spécifique pour le démontage. Le démontage peut s'effectuer par exemple sans avoir besoin de clés ou de tournevis mais cela demande une certaine habilité de la part de l'opérateur.

1.8.3.4. L'interchangeabilité

L'interchangeabilité est caractérisée par la possibilité de remplacement d'un élément, sous-ensemble de l'équipement par un autre élément pouvant provenir d'un stock, du bien lui- même, d'un autre bien du même type ou différent.

Elle s'exécute en se référant à l'identité fonctionnelle, dimensionnelle, et à l'accessibilité présente sur l'ensemble. Cette opération est soutenue par une documentation établie par le constructeur ou par des normes. Elle concerne toutes les pièces de rechange et elle est recommandée surtout dans le cas ou l'on veut faire du dépannage ou de l'adaptation, on peut disposer des pièces de rechange similaires chez des revendeurs surtout si la pièce d'origine n'est pas disponible. Elle contribue à la rapidité des opérations de maintenance. Il n'est pas rare de voir monter la pièce d'un matériel différent sur un autre.

1.8.3.5. La modularité

La conception par module ou « encapsulation » a initialement pour but de *simplifier la fabrication des équipements complexes* (automobile, aéronautique). L'idée de la pièce unitaire de rechange est substituée par un module constitué d'un sous-ensemble de composants. Le découpage par module est fait selon la fonction de l'équipement, la discipline (électronique, pneumatique, hydraulique etc.) ou le regroupement de pièces d'usure en fonction de la complexité technique. Assimilé à l'interchangeabilité (Monchy, 2000) elle permet une rapidité et simplicité dans le remplacement des modules défectueux. Le coût d'un module est nettement supérieur à celui de la pièce unitaire mais il est supposé être amorti dans les Pays du Nord (PdN) par la réduction des temps d'intervention de maintenance (corrective, préventive), le coût d'indisponibilité et une économie sur le nombre de références stockées.

Les coûts en terme d'occupation (durée de diagnostic et de réparation) sont minimisés et le risque d'avoir des défaillances en cascades le sont également (Pimor, 2001).

1.8.3.6. La standardisation

La standardisation permet d'unifier l'utilisation et la fabrication d'un bien ou d'assurer son interchangeabilité. Elle utilise la normalisation comme outil support, mais également la certification ou la qualification attestée par une collectivité ou un groupe. En maintenance elle permet de gagner en temps de réparation, facilite le transfert de technologie et la commercialisation des pièces de rechange. Elle présente spécifiquement les avantages (Monchy, 2000) suivants :

- facilite la maintenance de plusieurs équipements de même origine ;
- réduit le nombre d'outils de maintenance à maîtriser par l'opérateur ;
- facilite la commercialisation ou la fabrication des composants mécaniques élémentaires par des fournisseurs différents ;
- L'utilisation de pièces standard permet réduire les stocks important.

1.8.3.7. La détectabilité

C'est le critère relatif au temps de localisation et de diagnostic d'une défaillance. En effet de nos jours, des logiciels ou outils de diagnostic de causes de défaillance existent, dans le domaine de l'électricité par exemple le repérage de câbles défectueux par des voyants ou des points de mesures fournies par des appareils facilitent le diagnostic. Mais la notion de base consiste à rendre visible pour faciliter la détection de la défaillance.

1.8.4. Design For Reliability (DFR)

Ireson et Coombs (1988) proposent les règles de conception pour intégrer la fiabilité (tableau. 1.1).

Tableau 1.1 Règles de conception pour intégrer la fiabilité

Règles	Pertinence
Simplicité de la fonction d'usage (manipulation)	Pertinent pour simplifier les taches de maintenance de l'équipement. Plus la fonction d'usage est simplifiée moins il y a d'éléments à maintenir.
Simplicité des caractéristiques physiques des matériaux	Pertinent pour simplifier la fabrication des pièces, la prise en compte de la matière d'œuvre.
Utilisation de préférence dans la conception de pièces déjà éprouvées ou redondantes	Pertinent car les informations venant de l'usage des pièces sont les seules sources disponibles pour caractériser la fiabilité d'une pièce. Ex : Il y a des roulements qui seront reconnus plus fiables que d'autres sur la base de l'usage.
Evaluation des tolerances	Pertinent parce que dans les PME les tolérances précises sont difficiles à réaliser par les fabricants. Les concepteurs pourront éviter d'avoir des tolérances de l'ordre du micron par exemple car cela peut représenter une contrainte de fabrication.
Prise en compte de l'environnement local	Pertinent mais les normes en matière de sécurité ne sont pas en générale mises en œuvre dans les PME.
Prévision de systèmes de relais en cas de défaillance d'un système critique	Ils ne sont pas pertinents pour des équipements simples de petites unités de transformation. Les systèmes en parallèlement sont coûteux et complexifie un équipement.
Evaluation des erreurs humaines possibles : les activités humaines et la limitation des erreurs humaines sont importantes dans l'étude de la fiabilité. Il s'agit de maîtriser l'interface homme-machines.	Prendre en compte les erreurs humaines sur la base d'accident déjà rencontré peu être pertinent dans un contexte où il n'existe pas de données capitalisées et exploitables par rapport à la sécurité. Mais il n'est pas un point majeur si l'équipement est simple.

Identification et élimination des modes de défaillances critiques	Pertinent, mais pour cela il faut déterminer le sens de la criticité dans le contexte de PME.
Détection des défaillances Prévisibles	Très pertinent parce que dans les PME *à priori* c'est la maintenance curative qui est appliquée. Ceci permettra de songer à une maintenance prédéterminée à un signe avant coureur en privilégiant les indicateurs d'usure dans la
Entretien préventif	Très pertinent car l'entretien est souvent négligé au niveau des petites unités de transformation. Il sera important de définir une politique préventive de maintenance dés la conception d'un équipement mais basée sur l'expérience des acteurs qui ont habituellement la charge de la maintenance des équipements.

1.8.5. Design For Maintenance (DFMAIN)

C'est une conception qui prend prioritairement en compte la maintenance globale de l'équipement et les actions de réparation suite aux défaillances (Chen et Cai, 2003) avec pour objectif de :

- préserver la durée de vie des systèmes de production ;
- réduire le coût des interventions ;
- réduire les temps d'arrêts en prévenant les défaillances ;
- réduire les temps d'arrêts réguliers en diminuant les taches de maintenance spécifique ;

Ce concept s'appuie sur des règles et indicateurs du DFMt, DFR et du DFA. Le concept en lui-même est pertinent parce qu'on pourra l'adapter dans notre contexte en proposant des règles et indicateurs pour apporter une réponse à la problématique de la maintenance dans les PME. Dans ces pays les équipements sont constamment adaptés et modifiés par les utilisateurs, souvent sans aucun respect des lois physiques de résistance des matériaux, l'approvisionnement en pièces non disponibles sur place est une contrainte forte, les modes de fabrication sont peu diversifiés (usinage par machines conventionnelles, mécano-soudure), plusieurs acteurs sont impliqués dans la maintenance, production et maintenance sont faites sans prévisions budgétaire.… En conséquence les objectifs, les règles et les indicateurs sont à redéfinir dans cet environnement.

Dans le DFX il y a des indicateurs qui permettent d'évaluer la solution à reconcevoir et des règles de conception pour apporter les actions correctives. Il s'agira pour nous de

rechercher les indicateurs pertinents puis d'établir des règles de conception, porteurs de savoir-faire et de pratiques spécifiques à ce contexte. A cet effet une caractérisation de l'environnement de la maintenance et de l'utilisateur lui-même est indispensable. La philosophie du concept de DFX peut être utilisée pour intégrer la maintenance dans les PME.

1.9 L'ingénierie de la conception

L'ingénierie de la conception est le processus par lequel une idée ou un besoin du marché est transformé en information détaillée qui permet à un produit ou à un système technique d'être produit (Haies et Gooch, 2004).

1.9.1 L'évolution de la pensée moderne de la conception.

L'activité de conception est plus facilement étudiée par l'analyse des différents outils et méthodes utilisées par le concepteur. Ces méthodes ont évolué au cours de ces dernières années et sont intimement liées aux problématiques organisationnelles, stratégiques et techniques de l'entreprise.

L'ingénierie de conception moderne a émergé avec la révolution industrielle du 19ème siècle, marquée par l'apparition des entreprises manufacturières et l'approbation des premiers modes organisationnels du travail. Au 20ème siècle, les stratégies organisationnelles globales des entreprises ont rapidement changé afin de répondre à la forte pression de la croissance du marché, pour augmenter les performances des produits, proposer le prix le plus bas et réduire le temps de mise sur le marché des produits.

Ce qui a provoqué un changement au niveau du fonctionnement des différentes structures de l'entreprise. Taylor propose, comme un des grands principes de l'organisation scientifique de travail, la séparation des tâches, de la conception du produit à celle de sa réalisation (Mikchevitch, 2004) (Gakwaya, 2010). Ce qui rend toute action spécifique associée au développement et à la production, décomposée en un ensemble d'activités dont l'exécution ne tient compte que des activités subséquentes (figure 1.6).

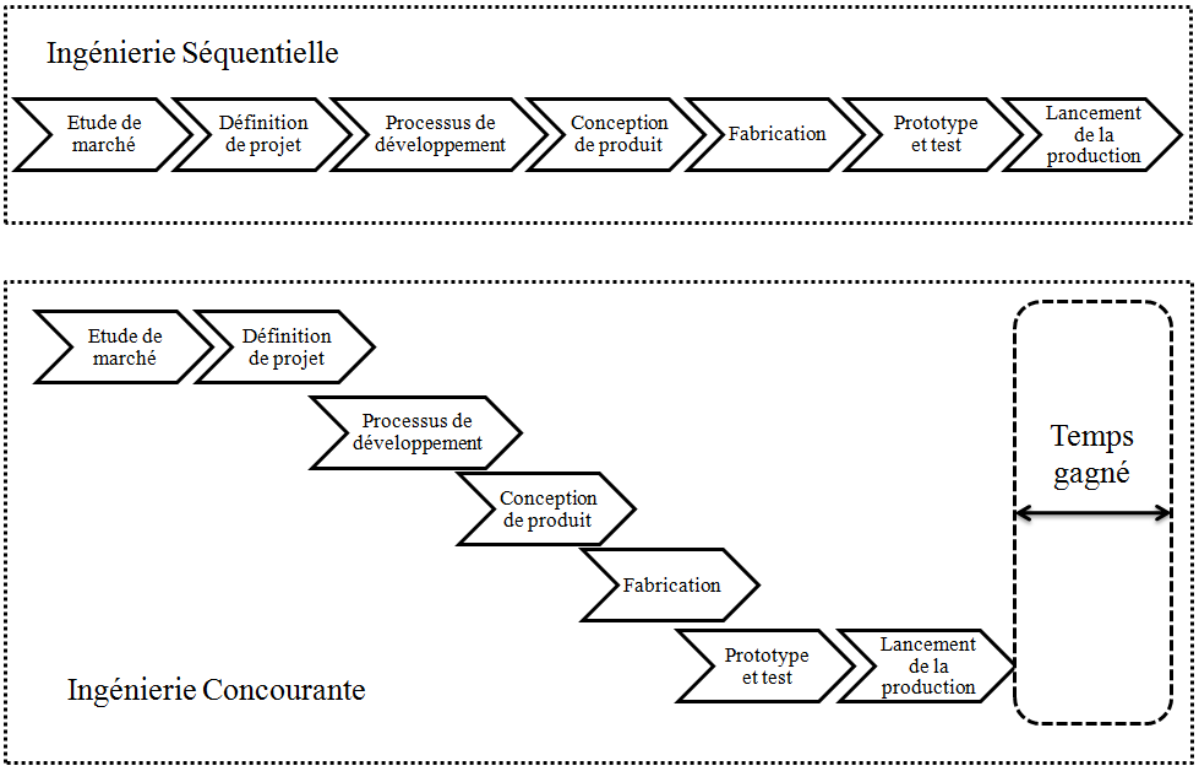


Figure 1.6 Comparaison entre l'ingénierie séquentielle et l'ingénierie concourante inspiré de Salamone (1995).

Les méthodes classiques (l'ingénierie séquentielle), basées sur la répartition des tâches, entraînent un cloisonnement des départements de l'entreprise et font apparaître des dysfonctionnements multiples. Comme par exemple, pour des projets de grande envergure, la communication entre plusieurs équipes spécialisées devient difficile. Cela engendre des remises en question des décisions prises en amont et se traduit par des délais de développement plus longs, sans pour autant garantir une meilleure performance du produit fini et une satisfaction du client.

En se basant sur l'observation et la structuration des méthodes employées par les entreprises, jusqu'aux années soixante-dix, les ingénieurs Beitz et Pahl issus de l'école allemande de la conception développent une nouvelle approche systématique de la conception 'Systematic design approch" (Pahl et al, 2007). Cette approche systématique s'articule autour de quatre grandes phases à l'intérieur desquelles se succèdent plusieurs étapes :

- La planification et la clarification des tâches ;
- La conception conceptuelle ;
- La conception architecturale ;
- La conception détaillée.

L'ingénierie simultanée ou concourante (Concurrent Engineering) a été développée à la fin des années quatre-vingt par Jo et al. (1993), afin de pallier aux problèmes générés par la conception séquentielle et répondre aux exigences du marché en termes de qualité, de délai et de coût. Cette méthode a pour but d'intégrer différents métiers (ingénieurs d'études, ingénieurs de méthodes, ingénieurs de production, agents de maintenance, etc.), et de tenir compte des points de vue de chaque profession intervenant dans le cycle de vie du produit.

Ce parallélisme des tâches permet d'évaluer, d'effectuer différentes vérifications et donc de valider rapidement les décisions basées sur de nombreuses opinions, les remarques et les contraintes des acteurs du développement en éliminant les solutions non satisfaisantes du point de vue de la conception, la production, etc. Mikchevitch (2004).

1.9.2 Processus de conception.

La modélisation du processus de conception a fait l'objet de plusieurs travaux publiés dans la littérature, si bien qu'il existe aujourd'hui de nombreux modèles (Approche axiomatique, New product design,...). Dans cette partie, on ne cherchera pas à faire un bilan exhaustif des pratiques de la conception de produit, nous tenterons uniquement de présenter la structure générale du processus de conception pour ensuite avoir une vue globale (bien se situer) pour la prise en compte de la fiabilité dans les différentes phases.

Il existe plusieurs pratiques et démarches en conception, mais on retrouve une trame commune aux activités de conception (Sun, 1990) ;

- Compréhension et définition des besoins du client ;
- Définition du problème principal à résoudre ;
- Spécification de la solution ;
- Optimisation de la solution proposée en effectuant des analyses ;
- Vérification de la conception obtenue, pour voir si elle répond aux besoins initiaux du client.

Dans ce qui suit, nous décrivons le modèle qui connaît le plus de succès dans l'école européenne de conception, mais aussi le plus accepté sur le plan international (Scaravetti, 2004).

Ce modèle est basé sur l'approche systématique décrite par Pahl Et Beitz.

Si on se réfère aux travaux de Pahl et Beitz, le processus de conception est décomposé en quatre grandes phases, Pahl et al. (2007). Chaque phase est décomposée en plusieurs étapes de travail et des tâches spécifiques (figure 1.7).

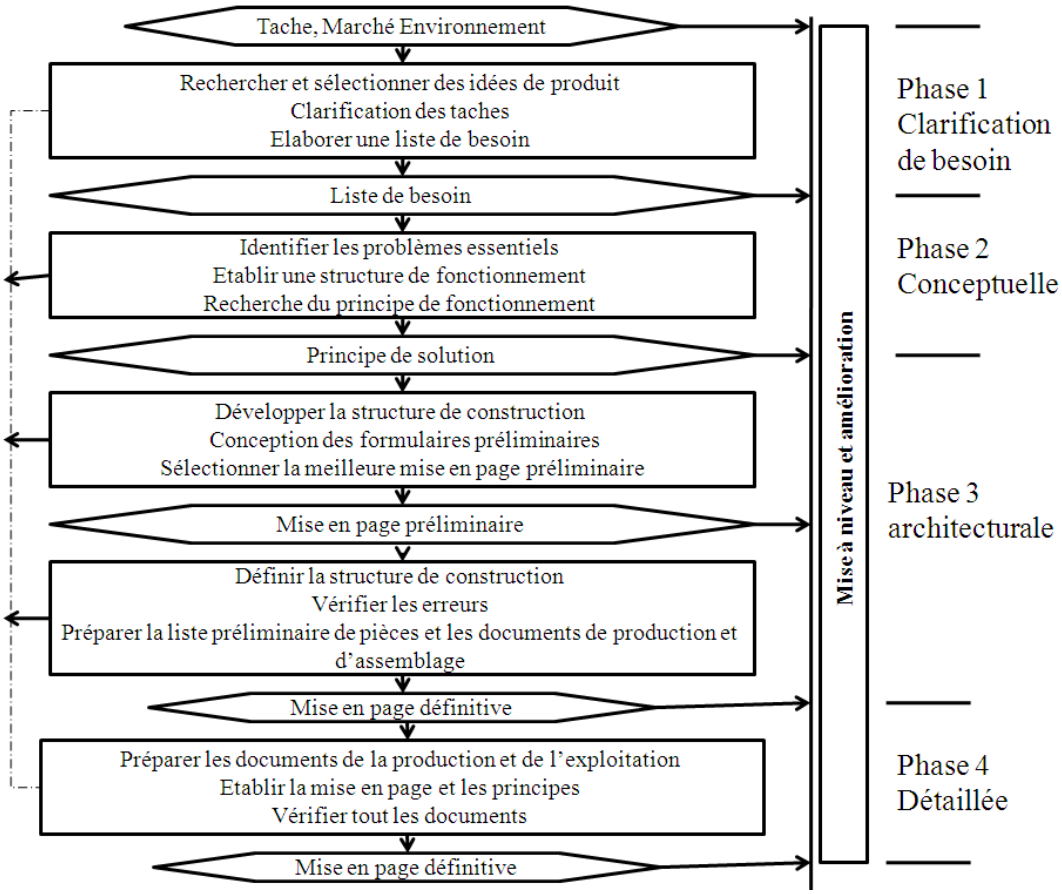


Figure 1.7 Modèle de Pahl et Beitz d'après Pahl et al. (2007)

Il faut noter que le processus de conception n'est pas forcément linéaire, mais des itérations peuvent être nécessaires durant son déroulement.

1.9.2.1 Planification et clarification des tâches.

La tâche de développement d'un produit est confiée au département d'ingénierie par le département de marketing, ou par un département spécial chargé de la planification des produits. Indépendamment du fait que la tâche soit basée sur une proposition de produit issu d'un processus de planification ou sur ordre d'un client spécifique, il est nécessaire de clarifier la tâche donnée plus en détail avant de commencer le développement du produit. Le but de cette clarification de tâche est de recueillir des renseignements sur les exigences qui doivent être remplies par le produit, et aussi sur les contraintes existantes et de leur importance. Elle permet d'obtenir une description des objectifs de l'étude basée sur les connexions entre les fonctions du produit, ses conditions d'obtention et de réalisation.

L'attention est portée sur la fonction désirée, afin d'atteindre ces objectifs en étroite collaboration avec le client ou auteur. Il est utile de poser une série de questions concernant la tâche de conception, l'équipe qui va effectuer le travail, et les étapes à réaliser dans chaque phase du processus de conception, Haies et Pattin (2002) :

- Quels sont les objectifs que la solution envisagée doit satisfaire ?
- Quelles propriétés doit elle (ou pas) avoir ?
- Quels souhaits ou attentes non exprimées doivent être pris en comptes ?
- Quelles sont les contraintes liées au problème?

Cette activité se traduit par la spécification de l'information sous la forme d'une liste, qui correspond au cahier de charges contre lequel la réussite du projet de conception peut être jugée. Une méthode utile servant à soutenir la préparation de la liste des exigences est la Quality Function Deployment (QFD). Elle traduit les exigences du client en caractéristiques techniques

1.9.2.2 Conception conceptuelle.

Après avoir terminé la phase de clarification et de définition des tâches, il est possible de commencer à générer des idées conduisant à des concepts qui vont résoudre le problème, c'est la phase conceptuelle. Durant cette phase, les problèmes sont identifiés et résolus en faisant abstraction des problèmes essentiels, afin d'établir les structures des fonctions, et rechercher les principes de fonctionnements appropriés. Puis en combinant ces principes, on obtient une structure opérationnelle.

Toutefois, une structure opérationnelle ne peut être évaluée qu'une fois ce qu'elle se transforme en une représentation plus concrète. Cette concrétisation consiste à sélectionner des documents préliminaires, produire une esquisse de dimensions, tenir compte des possibilités technologiques. C'est alors seulement, qu'il est en général possible d'évaluer les aspects essentiels d'une solution de principe, et d'examiner les objectifs et les contraintes imposées.

La phase de conception comporte plusieurs étapes (figure 1.8), dont aucune ne doit être ignorée. Dans la réalisation ultérieure des phases de conception, il est extrêmement difficile, voire impossible, de corriger les lacunes fondamentales de la solution de principe. Une solution durable et efficace est plus susceptible d'être un support aux choix des principes les plus appropriés que d'une concentration exagérée sur les détails techniques.

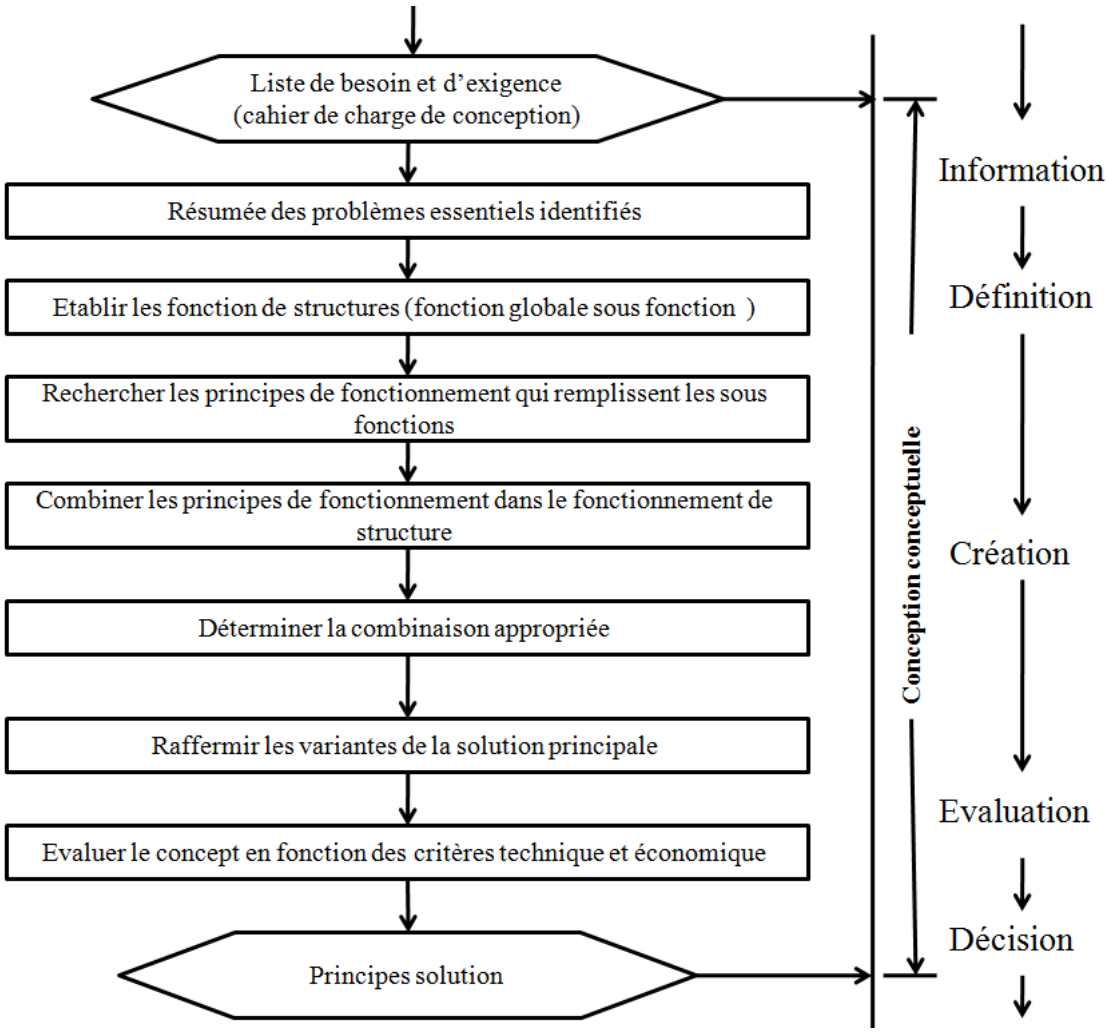


Figure 1.8 Principales étapes de la conception conceptuelle

La phase de conception est précédée d'une décision. Le but de cette décision est de répondre aux questions suivantes sur la base des listes des exigences convenues lors de la clarification des tâches :

- Est-ce que la tâche était clarifiée suffisamment pour permettre le développement d'une solution sous la forme d'un dessin ou d'un modèle ?
- Est-ce qu'on a vraiment besoin d'une élaboration conceptuelle, ou existe une solution connue permet un passage direct aux phases qui suivent ?
- Si la phase de la conception conceptuelle est indispensable, comment et dans quelle mesure doit-elle être développée d'une manière systématique ?

Une bonne formulation générique dégage clairement la fonction principale et les contraintes essentielles sans pour autant nuire au choix d'une solution particulière.

L'utilisation de l'abstraction, accompagnée de l'établissement de la liste des requis, permet l'identification des caractéristiques principales du futur produit à concevoir. Pahl et al. (2007) proposent l'algorithme suivant pour la conduite de cette analyse :

- Eliminer les préférences personnelles ;
- Omettre les exigences n'ayant pas de lien direct avec la fonction et les contraintes essentielles ;
- Transformer les éléments quantitatifs en données qualitatives ;
- Généraliser les résultats des étapes précédentes ;
- Formuler le problème avec des termes non liés à une solution.

La recherche d'un principe de solution est basée, dans un premier temps, sur la satisfaction d'une fonction technique. La conception conceptuelle permet d'aboutir à une formalisation générique du problème et fournit des solutions (concepts) pouvant se révéler totalement nouvelles pour le concepteur.

1.9.3 Conception architecturale ou conception de réalisation.

La conception architecturale est la partie du processus de conception dans laquelle, à partir des principes de solution ou la notion technique d'un produit, le design est élaboré conformément aux critères techniques et économiques à la lumière d'informations complémentaires, au point où ultérieurement, la conception détaillée peut conduire directement à la production.

Contrairement à la conception conceptuelle, la conception architecturale implique un grand nombre de mesures correctives dans lequel l'analyse et la synthèse alternent constamment et se complètent mutuellement. Ceci explique pourquoi les méthodes familières sous-tendent la recherche de solutions, et l'évaluation doit être complétée par des méthodes facilitant l'identification des erreurs (les défauts de conception). La collecte d'informations sur les matériaux, les procédés de production, les pièces de rechange et des normes, impliquent des efforts considérables sans pour autant résoudre le problème.

Le processus de conception est complexe pour les raisons suivantes :

- De nombreuses actions doivent être effectuées simultanément ;
- Plusieurs étapes doivent être répétées à un niveau supérieur de l'information ;
- Les ajouts et les modifications dans un domaine ont des répercussions sur la conception existante dans les autres domaines.

1.9.3.1 Etape de la conception architecturale.

Pour ces raisons, il n'est pas toujours possible de dresser un plan strict de la phase de la conception architecturale. Toutefois, il est possible de suggérer une approche globale avec les principales étapes de fonctionnement (figure 1.9).

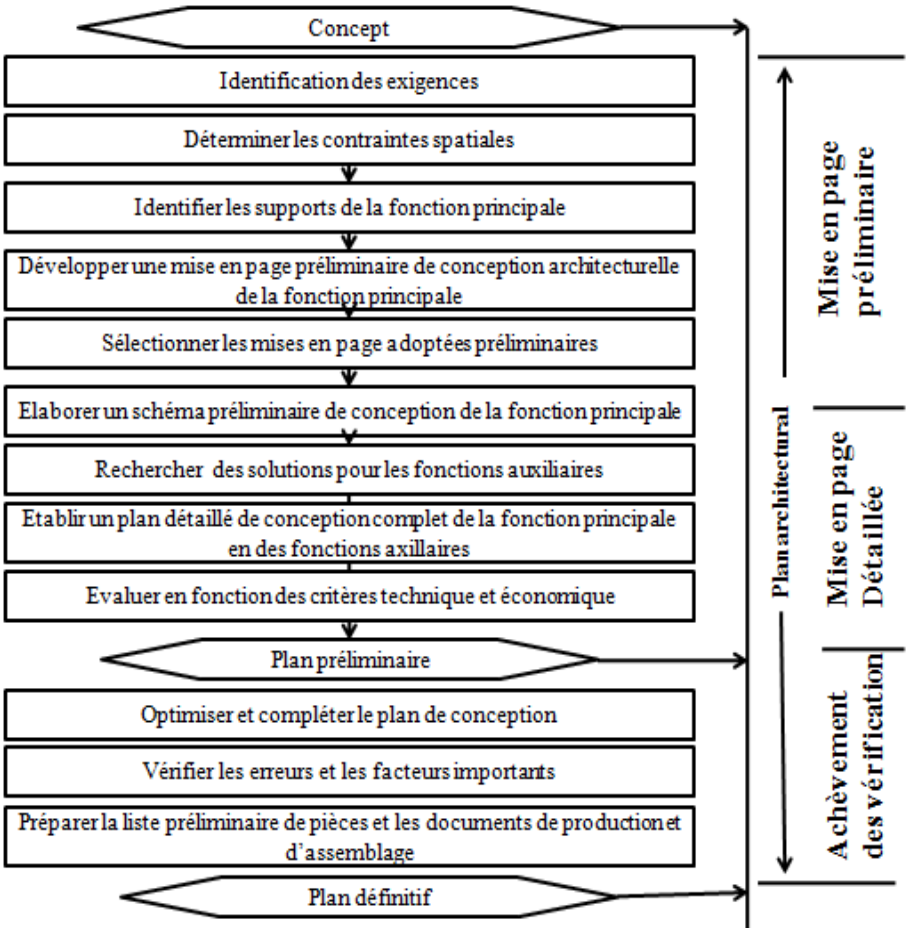


Figure 1.9 Principales étapes de la conception architecturale

Le processus se déroulera du qualitatif au quantitatif, en venant de l'abstrait au concret et du brut à des plans détaillés. Cette phase se déroulera en trois étapes, et chaque étape est décomposée en plusieurs sous étapes :

- Diviser les tâches en modules réalisables (mise en page préliminaire) ;
- Développer des architectures des modules clés (mise en page détaillée) ;
- Compléter l'architecture supérieure (achèvement des vérifications) ;

Les exigences telles que celles basées sur l'ergonomie, la production, l'assemblage et le recyclage impliquent des modes de considération et de réalisation particuliers, ce qui peut affecter la taille, l'agencement et le choix des matériaux. Durant cette phase, le concepteur peut également revenir en arrière lorsqu'il estime que les solutions finalement sélectionnées lors de la phase conceptuelle ne répondent pas aux contraintes de conception.

1.9. 3.2 Conception détaillée.

La phase de conception détaillée est la partie du processus de conception qui complète la phase architecturale avec les dernières instructions au sujet de (s) :

- Formes de tous les composants ;

- Dessins d'assemblage et liste des pièces appropriées ;
- La sélection définitive des matériaux ;
- Tolérances des dimensions définitives et de la qualité de surface ;
- Procédures de mise en forme ;

1.10 Conclusion

Après avoir présentés les différentes notions de la maintenance (rôle, politique, type, optimisation) et son intégration dans la conception. Et les phases de la conception. Nous allons répondre dans les chapitres suivants aux trois questions principales de notre thèse:

- Comment prendre en compte la fiabilité en conception ?
- Comment prendre en considération la sécurité des utilisateurs dans la conception des produits ?
- Comment mesurer, en conception, la maintenabilité et la disponibilité?

Chapitre 2 : Fiabilité en conception

2.1 Introduction

Le développement d'un produit procède à partir d'une idée, d'un besoin identifié ou tout simplement d'une opportunité d'affaires. Les caractéristiques fonctionnelles sont généralement consignées dans un cahier des charges. Le concepteur fait ensuite appelle à son savoir-faire pour générer des solutions qui répondent aux spécifications de cahier des charges. La validation de certaines caractéristiques passe par le développement d'un prototype physique et par une batterie de tests. Pour certaines caractéristiques, telle que la fiabilité, qui s'exprime par la probabilité que le produit réalise la fonction pour laquelle il a été conçu dans des conditions données et dans un intervalle de temps donné, le processus de validation peut nécessiter un nombre important de prototypes physiques pour affirmer que la caractéristique est satisfaite avec un niveau de confiance donné. Le processus de validation peut se révéler coûteux et matériellement non réalisable pour un programme de mise en marché du produit.

Dans cette optique nous sacrifions ce chapitre pour rappeler et éclairer les concepts et les indices de la fiabilité, et de traiter les différentes phases du cycle de vie d'un produit du point de vue fiabilité, et à la fin de proposer notre modèle qui intègre la notion de la fiabilité au processus de conception validé par une application sur une pompe immergée.

2.2 Concepts et caractéristiques de la fiabilité.

2.2.1 Concepts de base de la fiabilité.

La fiabilité R(t) est la caractéristique d'un système exprimée par la probabilité qu'il accomplisse la fonction pour laquelle il a été conçu, dans des conditions données et pendant une durée donnée (NF X 060-010 – AFNOR (1991)) (Ait-Kadi, 2007).

$$0 < R(t) < 1$$

Pour les systèmes dont les caractéristiques opératoires se dégradent avec l'âge et avec l'usage R(t) est généralement une fonction décroissante.

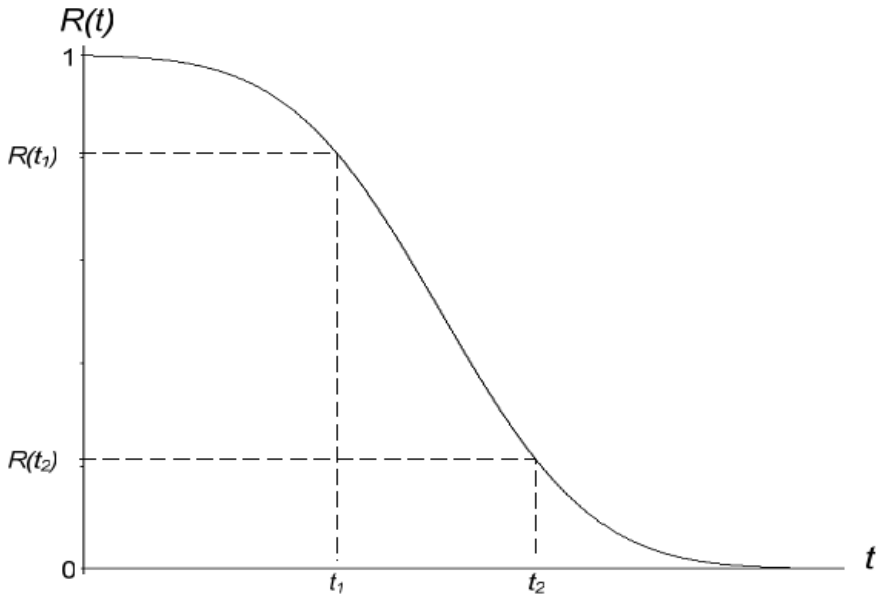


Figure 2.1 La fiabilité décroissante avec le temps.

Un système est défaillant ou en panne, s'il ne peut pas remplir sa fonction pour laquelle il a été conçu au moment où la demande de cette fonction est faite.

Ait-Kadi (2002) définit la défaillance comme étant la «cessation d'une entité à accomplir la fonction pour laquelle elle a été conçue». Une entité est déclarée défaillante lorsque ses caractéristiques sortent des tolérances définies lors de la conception ou lorsqu'elle ne satisfait pas à une ou plusieurs attentes du client. Chaque défaillance est caractérisée par l'effet par lequel elle est observée (mode de défaillance) et la cause qui la provoque (cause de défaillance).

2.2.1.1 Fiabilité à l'instant t, R(t)

La fiabilité dans l'intervalle [0,t[, est la probabilité que le système en état de fonctionnement est mis en service à un instant t=0, il va rester dans cet état jusqu'à un instant aléatoire t=T où une défaillance va survenir et le mettre à l'arrêt. L'intervalle de temps [0, T], de durée T, constitue alors la durée de vie du système.

$$\boldsymbol{R(t) = P\,[durée\ de\ vie\ T > t] = \int_t^{\infty} f(x)dx} \qquad \textbf{[2.1]}$$

2.3.1.2 Distribution cumulative des durées de vie, F(t)

La probabilité que le système soit en panne dans [0, t[. Ou encore, la probabilité de défaillance du système à T < t (probabilité que la durée de vie, T, soit inférieure ou égale à t).

$$\boldsymbol{F(t) = P\,[\,T \leq t] = \int_0^t f(x)dx} \qquad \textbf{[2.2]}$$

En additionnant les expressions [2.1] et [2.2] on obtient la relation [2.3].

$$\boldsymbol{R(x) + F(x) = 1} \qquad \textbf{[2.3]}$$

2.2.1.3 Taux de panne

r(t) est la probabilité conditionnelle de défaillance par unité de temps d'un système ayant survécu jusqu'à t. C'est, la quatrième fonction qui permet de caractériser la loi de dégradation d'un système.

$$\boldsymbol{r(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{P[(T \leq t+\Delta t \,|T>t)]}{\Delta t}} \qquad \textbf{[2.4]}$$

r(t)Δt = probabilité que le système tombe en panne à T < t + Δt (donc, soit en panne à t+Δt) sachant qu'il a survécu à t

Le taux de panne d'un dispositif à l'instant t peut s'exprimer comme suit :

$$\boldsymbol{r(t) = \frac{dF(t)}{dt} . \frac{1}{R(t)}} \qquad \textbf{[2.5]}$$

La loi de dégradation d'un système est complètement définie par la connaissance d'une des quatre caractéristiques f(t), R(t), F(t) ou r(t) .Le tableau 2.1 présente les relations entre ces caractéristiques (Lewis, 1994), (Ebeling, 1997), (Salvendy, 2001), (Nachlas,2005)., Ait-Kadi (2002).

Tableau 2.1 Relations entre quatre caractéristiques de fiabilité f(t), F(t), R(t) et r(t)

	$f(t)$	$F(t)$	$R(t)$	$r(t)$
$f(t) =$	___	$\frac{dF(t)}{dt}$	$-\frac{dR(t)}{dt}$	$r(t).e^{-\int_0^t r(t)dt}$
$F(t) =$	$\int_0^t f(x)dx$	—	$1-R(t)$	$1-e^{-\int_0^t r(t)dt}$
$R(t) =$	$\int_0^t f(x)dx$	$1-F(t)$	—	$e^{-\int_0^t r(t)dt}$
$r(t)=$	$\frac{f(t)}{\int_0^t f(x)dx}$	$\frac{\frac{dF(t)}{dt}}{1-F(t)}$	$-\frac{1}{R(t)}.\frac{dR(t)}{dt}$	—

2.2.1.4 La Moyenne des Temps de Bon Fonctionnement.

Le Mean Time Between Failure, MTBF (qui est approximé par La Moyenne de Temps de Bon Fonctionnement si les temps de réparation sont négligeables) est parti d'une famille d'indicateurs de mesure de la fiabilité. Son expression est donnée par la relation suivante.

$$\boldsymbol{MTBF = \int_0^\infty tf(t).dt = \int_0^\infty R(t).dt} \qquad \textbf{[2.6]}$$

2.2.2 Estimation des indices de fiabilité.

Pour mesurer la fiabilité d'un produit, il faut disposer des informations sur les durées de vie. Celles-ci peuvent être issues d'historiques d'exploitation ou d'expériences sur des prototypes.

Si on soumet à l'essai N éléments identiques dans les mêmes conditions, à l'instant t où les essais se terminent (Ait-Kadi, 2002), on ait :

$N_s(t)$: Nombre de survivant au test.

Nf(t) : Nombre d'éléments ayant échoué.

$N_s(t) + Nf(t) = N$ (pas de remplacement à la panne).

A l'issue de ces essais, on est en mesure de déterminer le taux de panne et la fonction de densité de probabilité, la fiabilité et la probabilité de défaillance et les autres caractéristiques de la fiabilité (Aït-Kadi(2002)).

La fiabilité (La probabilité de survie) :

$$\boldsymbol{R(t) = \lim_{N\to\infty} \frac{Ns(t)}{N}} \qquad \textbf{[2.7]}$$

La probabilité de défaillance :

$$\boldsymbol{F(t) = \lim_{N\to\infty} \frac{N_f(t)}{N}} \qquad \textbf{[2.8]}$$

La fonction de densité :

$$\boldsymbol{f(t) = \frac{N_f(t+\Delta) - N_f(t)}{N.\Delta}} \qquad \textbf{[2.9]}$$

Le taux de panne :

$$\boldsymbol{r(t) = \frac{N_f(t+\Delta) - N_f(t)}{Ns(t).\Delta}} \qquad \textbf{[2.10]}$$

La valeur de Δ peut être obtenue par la formule de Sturges, où *r* est l'étendue de la gamme des durées de vie

$$\Delta \approx \boldsymbol{r \frac{1}{1+3.3\log(N)}} \qquad \textbf{[2.11]}$$

2.2.3 Elaboration de la fiabilité.

Pour l'élaboration la fiabilité, on distingue trois phases importantes

La fiabilité estimée ou intrinsèque : c'est la fiabilité mesurée au cours d'essais spécifiques effectués dans le cadre d'un programme d'essai entièrement défini.

La fiabilité prévisionnelle : permet d'estimer la fiabilité a priori d'un composant, d'un équipement, d'un système. Pour cela, on assimile le comportement de chaque constituant élémentaire à des modèles de probabilité mathématiques et de

vieillissement physique. Le retour d'expérience et la réalisation d'essais fondent la construction de ces modèles du comportement du point de vue de la fiabilité.

La fiabilité opérationnelle : c'est la fiabilité mesurée sur des dispositifs en exploitation normale. Elle dépend des conditions réelles d'utilisation et du support logistique.

Généralement, la fiabilité d'un produit sur le terrain diffère de la fiabilité de conception, en raison des conditions environnementales, et de différentes opérations spécifiques à chaque client. Ces conditions diffèrent de celle spécifiée lors du processus de conception. Elle dépend aussi des actions de maintenance réalisées par les clients lors de l'utilisation du produit.

2.2.4 Les phases du cycle de vie d'un produit:

Le cycle de vie d'un produit passe par trois phases sans réparation (période de jeunesse, période de vie utile et la période de vieillissement).

L'évolution du taux de défaillance d'un produit pendant toute sa durée de vie est caractérisée par ce qu'on appelle en analyse de fiabilité la courbe en baignoire (figure 2.2).

La première phase (période de jeunesse) où le taux de défaillance est élevé. Ensuite, il diminue assez rapidement avec le temps. Les défaillances sont généralement associées aux défauts de fabrication, de contrôle de qualité, de conception…

La deuxième phase (période de vie utile) où le taux de défaillance se stabilise à une valeur qu'on souhaite aussi basse que possible (taux de défaillance constant). Les défaillances observées dans cette phase sont généralement aléatoires. Les modifications concernant la conception des produits (redondance, amélioration de la résistance) peuvent réduire le taux de défaillance.

A la fin, le taux de défaillance remonte lorsque l'usure et le vieillissement font sentir leurs effets, c'est la période de vieillissement (taux de défaillance croissant).

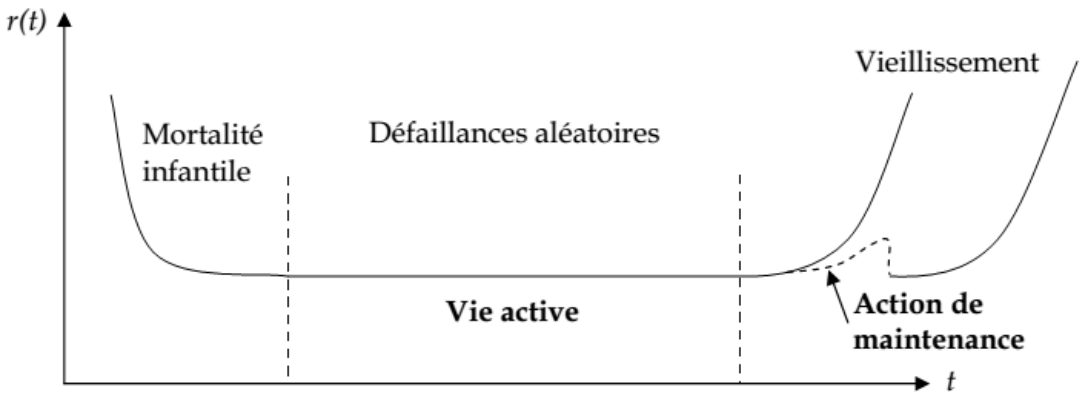


Figure 2.2 Allure du taux de panne r(t) en fonction de l'unité d'usage

De nombreux éléments, tels que les composants électroniques, ont un taux de défaillance qui évolue de cette manière là.

Les composants mécaniques sont soumis, dès le début de leur vie, au phénomène d'usure ou de vieillissement. Si on trace la courbe du taux de défaillance, en fonction du temps, on obtient une courbe qui ne présente pas le plateau de la figure 2.2; la période de vie utile (taux de défaillance constant) n'existe pas ou elle est réduite. Le taux de défaillance du dispositif est une fonction non linéaire du temps et ceci dans chaque phase de sa vie (figure 2.3) (Doyle, 1992) (McLean, 2000):

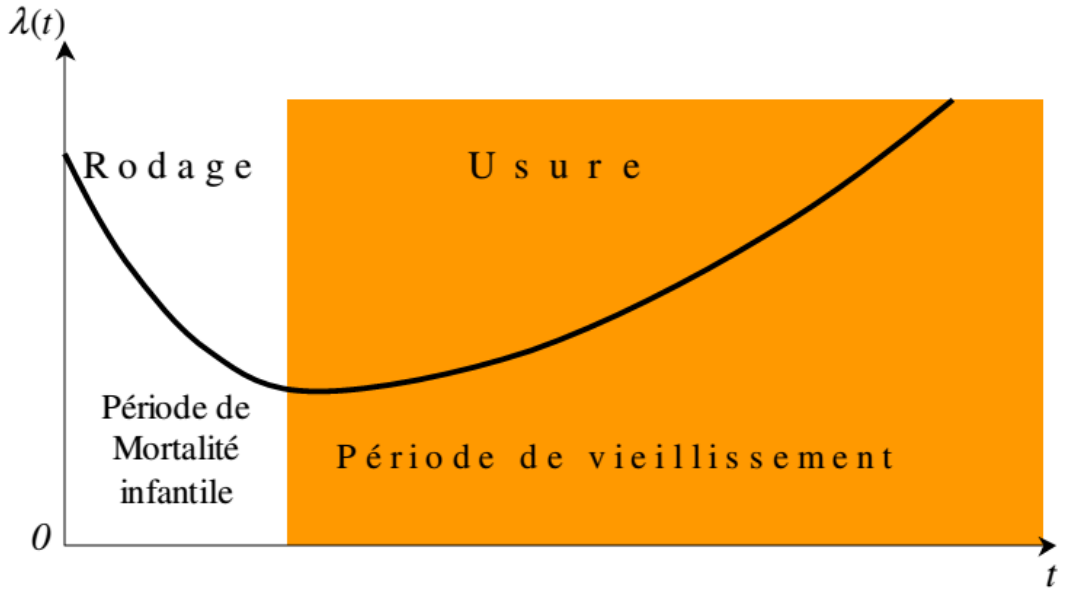


Figure 2.3 La courbe du taux de défaillance pour des composants mécaniques

Pour la plupart des systèmes mécaniques, on recense deux phases :

La première phase définit la période de mortalité infantile. C'est une durée de vie en principe très courte. Elle décrite par une décroissance progressive du taux de défaillance avec le temps dû à une amélioration des caractéristiques internes

(caractéristiques de défauts) et des interfaces, par un rodage préalable des pièces. Par conséquent il n'est pas souhaitable de tester les composants mécaniques dans cette période de leur vie.

La dernière phase définit la période de vieillissement qui comporte la majorité de la vie du dispositif. Elle est caractérisée par une augmentation progressive du taux de défaillance. Les pièces mécaniques sont soumises à des phénomènes de vieillissement multiples qui peuvent agir en combinaison: corrosion, usure, déformation, fatigue, et finalement perte de résilience ou fragilisation.

2.2.5 Recueil de données de fiabilité.

Parmi les problèmes rencontrés lors du calcul prévisionnel de la fiabilité des systèmes mécaniques, les plus fréquents sont la quasi absence de normalisation et de standardisation internationales et l'absence des données de vie sur les composants des systèmes mécaniques. Ceci est principalement dû à la complexité des composants.

En électronique, un domaine où le calcul de la fiabilité est pratiqué depuis de nombreuses années, les bases de données de fiabilité sont disponibles et nombreuses. Alors que, dans le domaine de la mécanique les recueils de données existants sont moins nombreux mais ils sont tout de même très utilisés surtout ces dernières années

Les principales bases de données de fiabilité en mécanique sont présentées dans le tableau suivant (tableau 2.2) (Doyle, 1992), (Leemis, 1994).

Tableau 2.2 Recueils de données de fiabilité en mécanique.

Source	Titre	Editeur	Dernière version
AVCO	Failure Rate	D.R Earles&M.F. Eddins AVCO Corporation, USA	Avril 1962
FARADA	Failure Rate Data	GIDEP-Government Industry Data Echange Program (USA)	Mil-STD-1556 B, 24 février 1986.
NPRD	Nonelectronic Parts Reliability Data	Reliability Analysis Center, RAC, New York, USA	NPRD 97, 1997.
NSWC	Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment	Carderock Division, Naval Surface Warface Center, United States Navy.	NSWC-98/LEI, 1998
EIREDA	European Reliability Industry Data Handbook	European Commission and Electricité de France. CRETE UNIVERSITY PRESS	1998

Bien que ces sources de données soient très utiles pour une nouvelle conception, aucune d'elles ne fournit des données parfaites pour une évaluation plus précise de la fiabilité.

2.3 Méthodes et outils pour l'évaluation de la fiabilité.

Selon Zwingmann deux techniques permettent d'évaluer la fiabilité, la première à partir de l'analyse de données, et la deuxième à partir d'un nombre réduit de données issues des tests sur des prototypes physiques (Zwingmann, 2005).

Nous Présentons, dans les sections suivantes un état de l'art sur l'intégration des outils d'évaluation de fiabilité dans l'ingénierie de la conception, en particulier au stade de la conception. Nous exposons, dans un premier temps les approches qualitatives et quantitatives qui sont utilisées pour prédire la fiabilité lors de la validation, Puis l'approche analytique de la fiabilité (Contrainte/Résistance), et les méthodes d'évaluation probabiliste seront présentées.

2.3.1 Modélisation et évaluation de la fiabilité d'un système multi-composant.

Le développement d'un modèle qui traduit le bon fonctionnement de système est l'un des aspects les plus importants de l'analyse de fiabilité. Cette analyse repose sur l'évaluation de la fiabilité d'un système à partir de ses éléments de base.

Un système est une collection d'objets (sous-systèmes, composants,...) dont la bonne coordination et opération conduisent a son bon fonctionnement.

Dans la suite de chapitre, on suppose que le système ne peut occuper que l'un des deux états "En opération" ou "Hors usage".

2.3.1.1 Schémas blocs.

Un schéma bloc est conçu à partir de blocs dont chacun représente une entité du système (composant, sous-système, voire fonction). Ces blocs sont reliés par des arcs qui matérialisent la relation fonctionnelle qui existe entre deux ou plusieurs entités. Le schéma bloc doit traduire le bon fonctionnement du système.

Un système d'ingénierie peut former différentes configurations en matière d'analyse de fiabilité. Plus la complexité du système augmente, plus la fiabilité de celui-ci diminue, à moins que des mesures compensatoires soient prises.

On présente dans les sections suivantes, les configurations les plus fréquentes (figure 2.4) : Système en série et système en parallèle.

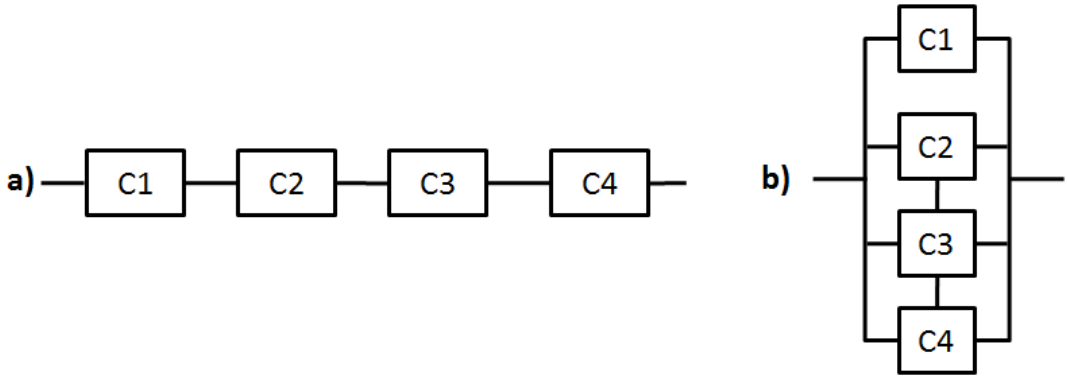


Figure 2.4 Configuration d'un système : a) en série, b) en parallèle.

2.3.1.2 Système en série.

Un système est dit en série si la défaillance d'un de ses éléments entraine la défaillance du système. La fiabilité R(t) d'un tel système est le produit des fiabilités élémentaires Ri(t) de chaque élément (on suppose que tous les composants sont stochastiquement indépendants).

$$R(t) = \prod_{i=1}^{n} R_i(t) \qquad \textbf{[2.9]}$$

Le taux de défaillance du système en série est égal à la somme des taux de défaillance individuels.

$$r(t) = \sum_{i=1}^{n} r_i(t) \qquad \textbf{[2.10]}$$

2.3.1.3 Système en parallèle.

Un système est dit en parallèle lorsqu'il faut que tous les éléments soient défaillants pour que le système soit défaillant. La fiabilité d'un système en parallèle sous l'hypothèse de l'indépendance des composants, est donnée par (on suppose que tous les composants sont stochastiquement indépendants) :

$$R(t) = 1 - \prod_{i=1}^{n}(1 - R_i(t)) \qquad \textbf{[2.11]}$$

L'hypothèse des composants indépendants est courante pour simplifier les calculs à partir de ce type de diagramme. On peut tenir compte de la dépendance des composants, uniquement si l'information est disponible.

La représentation par schéma blocs (ou RBD pour Reliability Block Diagram) est couramment utilisée pour traduire le fonctionnement du système connaissant l'état des composants. Plusieurs méthodes permettent d'exprimer la fonction de fiabilité à partir de la structure du schéma blocs : les méthodes des chemins, des coupes, le théorème de décomposition de Shannon,..., Ait-Kadi (2002). Plusieurs logiciels effectuant ce

type de calcul par des techniques analytiques, ou par simulation, tels que Rehasoft Office, Weibull ++, BLOCKSIM, RELEX,...

2.3.1.4 Diagramme d'états.

L'approche markovienne est largement utilisée en analyse de la fiabilité des systèmes.

Elle permet de modéliser les transitions entre différents états possible du système dont les modes de défaillance sont dépendants, mais aussi pour les systèmes réparables avec des taux de panne et de réparation constants.

Le diagramme d'état représente le support graphique des différents états du système et les transitions entre ces états, qui sont représentés par des cercles et relier entre eux par des arcs orientés qui représentent la transition d'un état de départ vers un état d'arrivé, (figure 2.5).

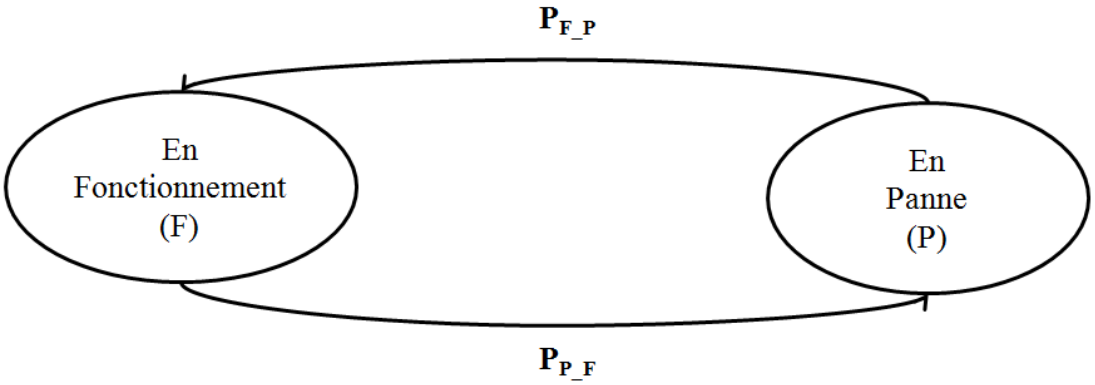


Figure 2.5 Diagramme de transition associée à un système ne peuvent occuper que deux états.

Avant d'effectuer une analyse de fiabilité, il est indispensable de recenser et de classer tous les états possibles du système (en fonctionnement (F) ou en panne (P)) et identifier comment transiter d'un état à un autre. Chaque transition, de l'état F vers l'état P est associée à un taux de transition λ, qui correspond à la probabilité conditionnelle $P_{F_P} = \lambda\Delta t$ de passer de l'état F à l'état P dans un intervalle de temps Δt négligeable.

Enfin, pour chaque état, la probabilité d'occurrence est donnée par une relation qui, associé à toutes les autres, constitue un système d'équations pouvant être résolue en utilisant les transformés de Laplace, (Ait-Kadi, 2002). Certains logiciels, tels que RELIASOFT, disposent d'un module de traitement des graphes de transitions.

2.3.2 Les principales méthodes de sûreté de fonctionnement

2.3.2.1 Les arbres de défaillance (AdD).

L'analyse par un Arbre de Défaillances (AdD) est une méthode qui permet, à partir d'un événement redouté, de déterminer les enchaînements d'évènements ou combinaisons d'évènements pouvant conduire à cet événement redouté (Limnios, 1991), (Pagès et Gondran, 1980), (Villemeur, 1988), (Cocozza-Thivent, 1997),(Birolini, 1997). Il représente le mode de défaillance du système en fonction des modes de défaillance de ses sous-systèmes et composants. Cette analyse permet de remonter de cause en cause jusqu'aux événements de base susceptibles d'être à l'origine de l'événement indésirable. Il peut ainsi améliorer la conception de tout système spécifié, produit, ou processus.

L'analyse par un arbre des défaillances est fondée sur les principes suivants :

– un événement est une combinaison d'événements de base non décomposables ;

– les évènements de base sont indépendants ;

– la probabilité d'occurrence des événements de base peut être évaluée.

Les liens entre les différents évènements sont réalisés grâce à des opérateurs logiques

(ET, OU, ...). Cette méthode utilise une représentation graphique qui permet de présenter les résultats dans une structure arborescente.

L'arbre de défaillance se déroule au cours des premières phases de conception, et au fur et à mesure que la conception se développe, il est progressivement raffiné et mis à jour. Pour chaque défaillance potentielle, l'AdD est construit en quatre étapes :

1. Rechercher les causes immédiates provoquant directement l'événement indésirable. La définition de l'événement indésirable, qui fera l'objet de l'analyse est une étape cruciale pour la construction de l'arbre. Plus l'événement est défini de manière précise, plus simple sera l'élaboration de l'arbre de défaillances.

2. Classer les événements intermédiaires en deux classes :

- Défaillance du système dû à la défaillance d'un seul composant.
- Défaillance de système dû à la défaillance de plusieurs composants.

3. Analyser les défauts des composants : chercher la défaillance primaire puis la défaillance seconde ;

- Défaillance primaire : elle représente la défaillance d'un composant dû à ses défauts internes. Cela se produit dans un environnement pour lequel le composant est qualifié, c'est-à-dire que les paramètres de l'environnement (température,

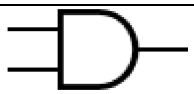
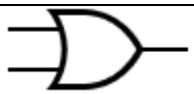
humidité, pression, ...) sont à l'intérieur des limites des spécifications opérationnelles du composant. Les défaillances primaires représentent des événements de base élémentaires de l'arbre.

- Défaillance secondaire : c'est la défaillance d'un composant provoquée par un environnement excessif. En d'autres termes, une faute secondaire représente une situation dans laquelle le composant est défaillant dans des conditions qui excèdent celles pour lesquelles il a été conçu. Ces défaillances secondaires sont généralement des événements de base non élémentaires, non développées.

4. Réitérer l'étape précédente jusqu'à l'obtention des événements d'origines.

Chaque niveau d'événement de L'arbre de défaillance est relié en cascade à l'aide de symboles correspondant à des opérateurs logiques (Table 2.3).

Tableau 2.3 Evénements et opérateurs fondamentaux

Evénement		Opérateurs	
	Evénement indésirable ou événement intermédiaire.		ET
	Evénement élémentaire ou origine (défaillance de base)		OU
	Evénement élémentaire non développé		Porte «combinaison»

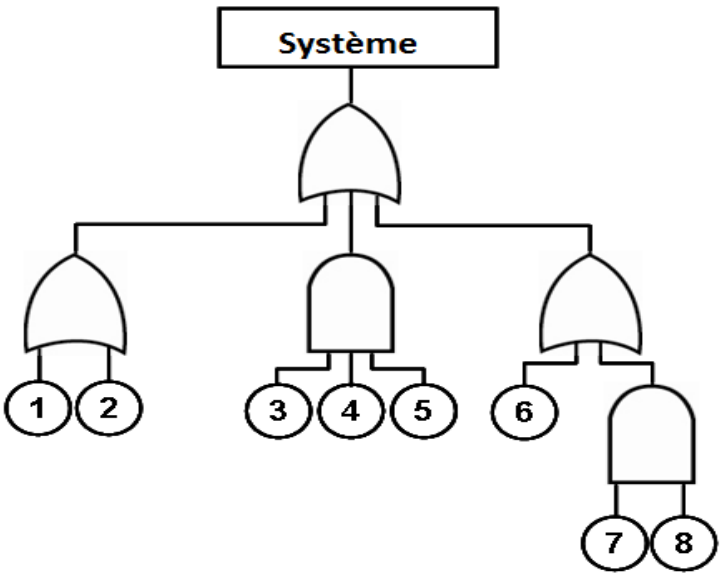


Figure 2.6 Structure d'un arbre de défaillance

Les arbres de défaillance ne renferment que des informations qualitatives. L'objectif qualitatif consiste à construire une synthèse de tout ce qui peut conduire à

un événement redouté et à évaluer l'effet d'une modification du système. L'AdD est un modèle qui illustre graphiquement et logiquement toutes les combinaisons des événements indésirables, ainsi les objectifs de l'AdD sont :

- L'identification systématique de toutes les défaillances éventuelles, ainsi que toutes les combinaisons et leurs causes qui pourraient conduire à un événement indésirable.
- Illustration des événements critiques ;
- Acquisition des critères d'évaluation sur le système ;
- Optimisation de la solution proposée en effectuant des analyses ;
- Vérification de la conception obtenue, pour voir si elle répond aux besoins initiaux du client ;
- Obtention d'une documentation claire sur la défaillance du mécanisme et de leurs relations fonctionnelles.

Avec l'aide de l'arbre de défaillance, tm système peut être décrit qualitativement et prévoit également la possibilité de faire une déclaration quantitative concernant la défaillance comportementale du système.

Les paramètres de fiabilité du système peuvent être calculés à l'aide des règles classiques de simplification des expressions booléennes si la probabilité de défaillance des composants est connue. Ainsi, les facteurs influant sur la fiabilité du système peuvent être analysés. Donc, il peut être utilisé pour quantifier les probabilités des événements sommets en propageant les probabilités d'occurrence des événements de base vers le sommet des arbres. Lewis (1994) entre autres auteurs, donne de plus amples informations sur la construction et l'évaluation qualitative et quantitative des AdD. Cependant, le Calcul de la probabilité qu'un événement indésirable se produise est basé sur les liens de causalité, qui peuvent être :

- Inclusifs (A Et B) :

$$\Pr(A \cap B) = \Pr(A) \,.\, \Pr\,(B) \qquad \textbf{[2.12]}$$

Avec A et B indépendants

- Exclusifs (A OU B) :

$$\Pr(A \cup B) = \Pr(A) + \Pr(B) - \Pr\,(A \cap B) \qquad \textbf{[2.13]}$$

- Dans le cas particulier où les événements déclencheurs sont mutuellement exclusifs;

$$\Pr(A \cap B) = 0 \qquad \textbf{[2.14]}$$

Cependant, lors de la conception du système, avant de définir les spécifications technologiques pour les composants, nous ne disposons pas de données probabilistes.

Pour compenser ce manque de données, certaines approches font appel à des jugements d'experts, qui vont concentrer l'étude sur les modes de défaillance les plus importants. Bouzaiene (2005) propose dans leurs travaux, des méthodes aidant à la stimulation des experts pour favoriser l'exhaustivité des résultats.

2.3.2.2 Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leurs Criticités (AMDEC).

L'AMDEC peut être comprise comme la méthode de fiabilité quantitative la plus couramment utilisée pour l'évaluation de fiabilité (Bertsche, 2008). Il s'agit d'une méthode de prévention (aide à "prévoir" pour ne pas être obligé de "revoir"), utilisée dans la conception du produit, afin de réduire les défaillances, en apportant des modifications à un stade précoce dans le processus de conception. C'est une méthode structurée et systématique pour :

- Détecter les défaillances (et leurs effets) d'un produit ou d'un processus ;
- Définir les actions à entreprendre pour éliminer ces défaillances, réduire leurs effets et pour en empêcher ou en détecter les causes ;
- Documenter le processus du développement.

Son idée fondamentale est la détermination de tous les modes de défaillance possibles pour des systèmes arbitraires, sous-systèmes, ou composants. De même, elle présente les effets des défaillances possibles et leurs causes. La procédure se termine par une évaluation des risques et la spécification des actions d'optimisation (éliminer ou réduire les effets indésirables).

L'objectif de la méthode consiste à reconnaître les défaillances et les points faibles d'un produit aussitôt que possible afin de permettre une amélioration de l'exécution en temps opportun. Le Critère d'analyse quantitative de la défaillance permet d'évaluer la défaillance à travers plusieurs critères par l'attribution d'une note à chacun des critères. En règle générale, on utilise trois critères ou indices : la fréquence - la gravité - la détection (tableau 2.4).

L'indice de fréquence " F " ou d'occurrence " O " marque la probabilité que la défaillance se produise et qu'elle entraîne le mode de défaillance concerné. C'est aussi une estimation de la probabilité d'occurrence de la cause de défaillance considérée.

Tableau 2.4 Classes de probabilité d'occurrence d'un événement (Salamone, 1995)

Classes	Intitulé	Probabilité
P1	Très improbable	1%
P2	Improbable	Entre 1% et 10%
P3	Peu vraisemblable	Entre 10% et 30%
P4	Possible	Entre 30% et 70%
P5	Probable à certain	Plus de 70%

L'indice de gravité " G " s'intéresse à la gravité provoquée par l'effet. C'est aussi l'impact des effets des défaillances sur le produit ou une estimation de la sévérité de l'effet maximum de la défaillance Tableau 2.5.

Tableau 2.6 Exemple de classes de gravité d'un événement (Salamone, 1995)

Classes	Intitulé	Nature des conséquences	Solution possible
G1	Négligeable	Sans impact	Pas d'action nécessaire
G2	Mineur	Faible dégradation des performances projet	Utilisation des marges pour aléas
G3	Majeur	Dérive de l'ordre de grandeur des aléas sur les performances	Changement de stratégies et/ou amputation totale des marges pour aléas
G4	Critique	Dérive supérieure aux aléas	Actions spécifiques possible, mais préjudiciables en performances ou bien processus de renégociation
G5	catastrophique	Dérive très importante des performances mettant en cause le projet	Plus aucune action possible

L'indice de détection ' D ", plus souvent appelé risque de non-détection par souci de synthèse, marque la probabilité que la cause et le mode étant apparus, la défaillance atteigne l'utilisateur.

L'indice de criticité " C " est la résultante de ces facteurs de risques. Il est déterminé par le produit des trois indices, équation 2.15.

$$\boldsymbol{C = D.O.G} \qquad \textbf{[2.15]}$$

Si chaque indice est noté de 1 à 4, la criticité peut varier de 1 à 64. Plus l'indice est grand, plus le risque lié aux défaillances potentielles est élevé. Une stratégie d'amélioration des produits consiste à traiter les criticités supérieures à un seuil donné (Zwingmann, 2005).

2.3.2.2.1 Principales étapes pour effectuer une AMDEC

L'AMDEC peut être réalisée en huit étapes sur la base des concepts clés de la hiérarchie des systèmes, opérations, fonctions, mode de défaillance, effets, risque de défaillance et de prévention. Ces étapes sont données dans l'ordre logique suivant, figure 2.6.

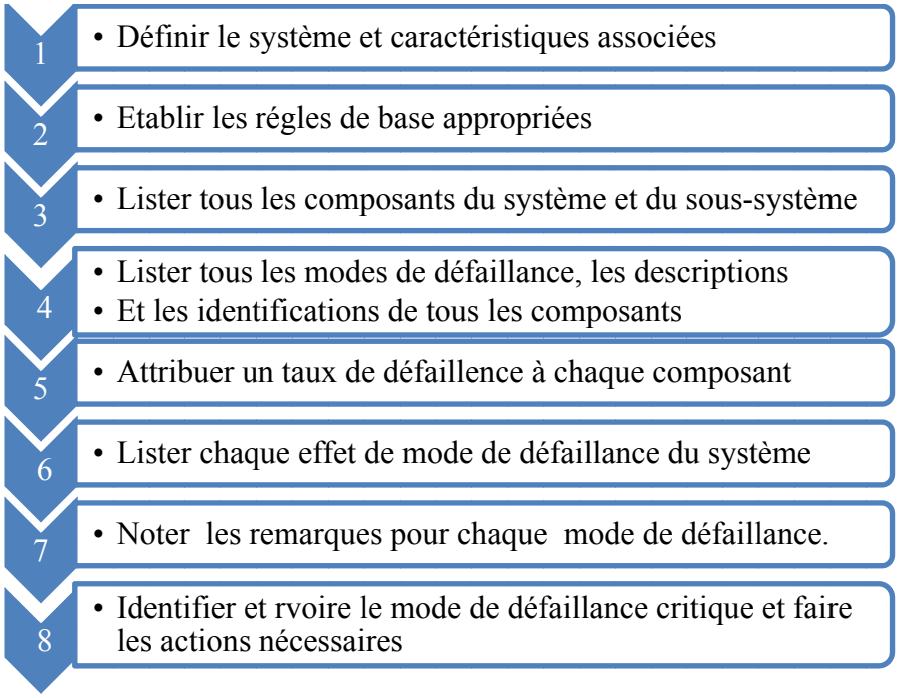


Figure 2.7 Principales étapes pour effectuer une AMDEC

Avant de se lancer dans la réalisation proprement dite des AMDEC, il faut connaître précisément le système et son environnement. Généralement, ces informations sont les résultats de l'analyse fonctionnelle, de l'analyse des risques et éventuellement du retour d'expériences.

2.3.2.2.2 Types d'AMDEC

Fondamentalement, Les AMDEC peuvent être classées en trois types selon le niveau d'analyse : AMDEC système, AMDEC conception (produit) et AMDEC processus. Il existe d'autres types d'AMDEC, qui peuvent être considérés comme des extensions de ces trois types. Par exemple, AMDEC machine ou AMDEC assemblage peuvent être considérés comme des cas particuliers d'AMDEC processus.

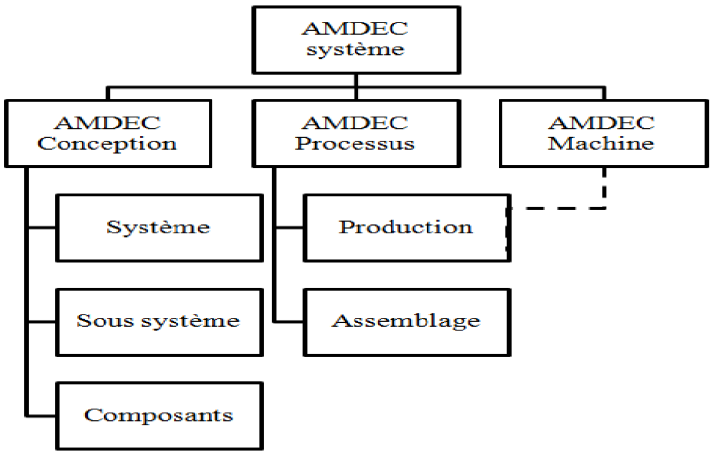


Figure 2.8 Type d'AMDEC

- AMDEC système

L'AMDEC système est le plus haut niveau qui peut être effectué dans une hiérarchie de systèmes. Son but est d'identifier et de prévenir les défaillances liées spécifiquement aux systèmes (ou sous-systèmes) au cours de la phase de conception préliminaire début du processus de conception d'ingénierie. En outre, ce type d'AMDEC est réalisé afin de valider que les spécifications de conception du système aient à réduire le risque de défaillance de fonctionnement au niveau de la hiérarchie des systèmes les plus bas, au cours de la phase de conception détaillée. Un premier avantage de l'AMDEC au niveau du système est l'identification du potentiel des modes de défaillance dû à l'interaction du système avec d'autres systèmes complexes des dessins intégrés.

- AMDEC conception

L'AMDEC conception est utilisée pour identifier, corriger les modes de défaillance et valider les paramètres de conception choisis pour une exigence de performance fonctionnelle spécifiée. Les avantages d'exécution de l'AMDEC au niveau de la conception est d'inclure l'identification des modes de conception potentiels liés à l'échec du système, sous-système, et composant ; l'identification des caractéristiques importantes d'une conception donnée; la documentation de la justification des changements de conception pour guider le développement des conceptions futures; aider à l'évaluation des objectifs de la conception, des alternatives de conception au cours des phases préliminaires et les détails du processus de conception technique.

L'AMDEC conception est une approche systématique visant à réduire la criticité et les risques, c'est un outil utile pour établir les priorités pour améliorer la fiabilité au cours de la phase de conception préliminaire.

- AMDEC PROCESSUS

L'AMDEC processus identifie et prévient les pannes liées au processus d'assemblage / fabrication, de certains équipements au cours de la construction par étapes d'installation d'un projet de conception technique.

Les avantages de l'AMDEC processus dans la phase de conception détaillée est d'inclure l'identification des modes de défaillance potentiels au niveau de l'équipement et l'élaboration des priorités de la documentation et de la justification des modifications de conception essentielle, afin d'orienter le processus de fabrication et d'assemblage.

2.3.2.3 Déploiement de la fonction qualité.

Le QFD (Quality Function Deployment) est un outil qui permet d'identifier les attentes du client et de les traduire en caractéristiques techniques pertinentes, (Akao et Mazur, 2003). Cet outil permet de cibler les paramètres nécessaires pour satisfaire les exigences du client, y compris la fiabilité, en intégrant ses besoins dans le processus de la mise au point d'un produit ou d'un service.

D'après les travaux de Bocquet et Duffau (1997) , le QFD permet de répondre à trois questions :

- Quelles sont les attentes du client à considérer en priorité pour assurer la réussite commerciale du produit ?
- Quelles sont les réponses techniques à privilégier ?
- Quelles sont les difficultés potentielles du cycle de développement du produit ?

La réponse à ces questions peut se faire en déployant le QFD plus en détail par une équipe de projet formée de personnes complémentaires réunies autour de la problématique à solutionner. La figure 2.9, montre la structure d'un QFD, ce qui est souvent appelée "maison de qualité" de par sa forme.

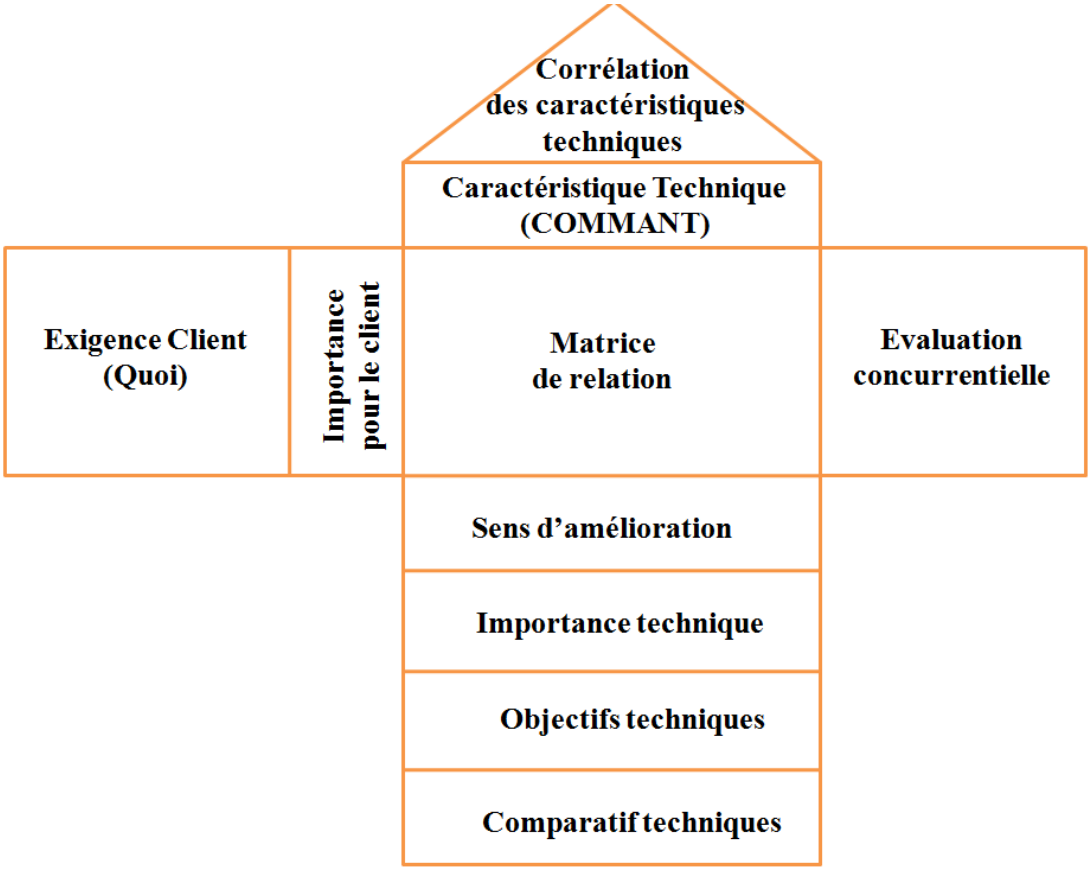


Figure 2.9 Maison de la qualité

La maison de la qualité contient l'axe client (horizontal) et l'axe technique (vertical).

L'axe client décrit les besoins du client, leurs importances et l'évaluation concurrentielle.

Les besoins des clients sont souvent désignés par "QUOI".

L'axe technique explique les caractéristiques techniques qui affectent la satisfaction du client directement pour une ou plusieurs attentes de la clientèle, Yang (2007).

Sur l'axe technique, on trouve les caractéristiques techniques, leurs corrélations, l'importance et les objectifs des caractéristiques techniques et les techniques d'étalonnage concurrentiel ainsi que le sens d'amélioration. La composante des caractéristiques techniques est souvent dénommée " COMMENT ". Les relations entre les besoins du client et les caractéristiques techniques sont évaluées dans la matrice de relation.

Le QFD sera mené surtout en phase amont d'un nouveau projet, à un stade où le large éventail de choix des caractéristiques techniques est encore possible. La démarche consiste à traduire la voix du client dans le langage des ingénieurs de développement.

Les principaux éléments à prendre en compte dans ce cadre sont alors : les critères de valeur du produit, les enquêtes marketing, les matrices relationnelles et la sélection des paramètres critiques. De ce fait le QFD consiste en plusieurs activités supportées par des tables et des matrices.

La méthode QFD est décomposée en six étapes, Hsiao (2002) :

- Identification du client ;
- Faire un état des différentes exigences du client ;
- Détermination de l'importance relative des besoins ;
- Benchmarking de la concurrence ;
- Traduction des besoins du client en requis d'ingénierie mesurable ;
- Mise en place des objectifs de l'ingénierie pour la conception.

La mise en œuvre du QFD, consiste à élaborer puis à déployer les matrices QUOI COMMENT Qui permettent à la fois : de définir les spécifications d'un produit

"Les COMMENT " à partir des attentes du client

"Les QUOI ", De comparer le produit avec les produits concurrents et, enfin, de faire apparaître les caractéristiques techniques nécessaires à la réalisation du produit.

2.3.3 Approche probabiliste de la conception.

Au stade de la conception, le défi du concepteur est de concevoir des produits qui répondent aux exigences du client, l'étude de fiabilité en conception repose sur une approche déterministe, ou le concepteur a recourt à des coefficients de sécurité dont les valeurs est parfois suggérée par des tables ou tout simplement choisie arbitrairement par le concepteur. En effet, tous les paramètres de fiabilité ayant une nature incertaine sont décrits par des valeurs caractéristiques défavorables, associées à des coefficients de sécurité. Ces derniers sont établis essentiellement sur la base de l'expérience ou l'intuition des experts, d'observation physique et des règles de dimensionnement, Tebbi (2005). Ceci mène souvent à des modélisations et des dimensionnements injustifiés.

Dans ce sens, la prévision du comportement doit être préférablement faite en termes de probabilités. Les incertitudes sont liées, à la variabilité des paramètres physiques et géométriques, aux fluctuations des conditions de charge, des conditions aux limites de contrainte, et aussi aux lois physiques et hypothèses simplificatrices utilisées dans le processus de modélisation, (Rojas, 2008).

Ainsi, la compatibilité de mécanisme d'interaction entre les phénomènes responsable de la dégradation et de la défaillance des système fait en sorte que la performance d'un système opérant dans des conditions données et dans un intervalle de temps donnée ne peut être prédite avec incertitude des prévisions sur la performance comportementale peuvent être données uniquement dans un sens probabiliste. Il s'agit donc de l'analyse de la fiabilité par des approches probabilistes, tenant en compte de la dispersion des variables de conception décrites par des distributions probabilistes.

Mayer, dès 1926, propose de considérer chaque paramètre incertain dans la conception comme une variable aléatoire caractérisée par une distribution de probabilité. Mais, c'est essentiellement après la Seconde Guerre mondiale que la théorie probabiliste va évoluer (Procaccia et Morilhat, 1996).

La démarche probabiliste est de plus en plus utilisée dans l'ingénierie. Elle permet la modélisation réaliste et la quantification des effets des incertitudes sur la performance d'un système à travers le concept de la probabilité de défaillance D_f.

Dans le processus de conception de produit, et à l'aide d'un ensemble d'outils mécaniques et statistiques, elle permet principalement :

- Le calcul et l'optimisation de la fiabilité d'un système afin d'améliorer la qualité de ses composants.

- L'étude de l'effet des variations des caractéristiques de matériaux, des variations des dimensions et des variations de l'environnement, sur la durée de vie d'un système.

- Le dimensionnement d'un système par rapport à un objectif de fiabilité donné en calculant sa probabilité de défaillance.

Dans les sections suivantes, nous allons introduire les fondements mathématiques de la méthode probabiliste d'évaluation de la fiabilité. Celle qui repose sur l'approche probabiliste de la théorie " Contrainte-Résistance ". Ensuite, nous détaillons plusieurs techniques de calcul qui peuvent servir à la détermination de la probabilité de défaillance, via cette approche.

2.3.3.1 L'approche probabiliste "Contrainte- Résistance".

Cette méthode est basée sur la comparaison probabiliste de la Résistance (R) et la Contrainte (C), considérées comme des variables aléatoires, en utilisant leurs distributions de probabilité, respectivement f_L et f_S, ou leurs paramètres illustratifs. Nous pouvons synthétiser cela par le schéma ci-dessous (figure 2.10), appelé diagramme de Warmer. Stapelberg (2009) définit les différences entre la résistance et la contrainte comme suit :

La contrainte est définie comme la charge qui va produire une défaillance d'un composant ou d'un dispositif. La charge peut être à long terme identifiée comme une charge mécanique, électrique, thermique ou effets d'environnement.

La résistance est définie comme la capacité d'un composant ou d'un dispositif à accomplir sa fonction requise de façon satisfaisante sans défaillance lorsqu'il est soumis à des charges externes.

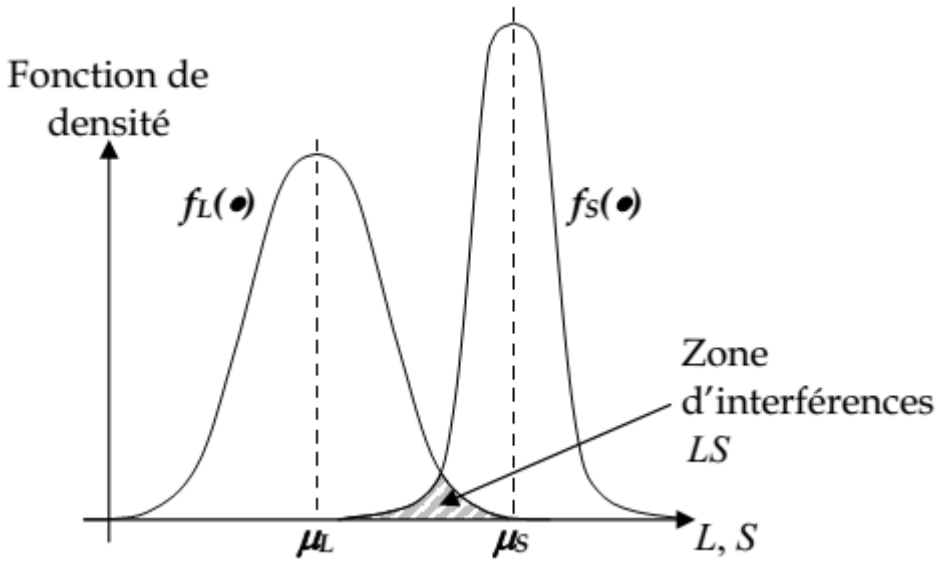


Figure 2.10 Diagramme de Warmer

Dans la zone d'interférences LS (l'approche contrainte/résistance se retrouve également sous le nom d'Interference Theory), la probabilité que la contrainte L soit supérieure à la résistance S est non nulle. Connaissant les deux fonctions de densité $f_S(.)$ et $f_L(.)$, il est alors possible de calculer la fiabilité :

$$P_f = P(L < S) = \int_0^{\infty} f_S(y) \,.\, \left[\int_0^{y} f_L(x)dx\right].dy \qquad \textbf{[2.16]}$$

2.3.3.2 Evaluation de la fiabilité d'un produit avec l'approche probabiliste " Contrainte - Résistance ".

Pour évaluer la fiabilité d'un produit, il faut déterminer s'il est en mesure ou non de continuer à assurer sa fonction (Zwingmann, 2005). La mise en œuvre de l'approche probabiliste " Contrainte-Résistance " pour l'évaluation de la fiabilité nécessite de mettre en place un certain formalisme mathématique, qui est la mise en place de la fonction d'état limite, des variables aléatoires de conception et les méthodes permettant de résoudre un problème de fiabilité.

2.3.3.2.1 Les variables de conception

Pour définir la fiabilité d'un produit sous le point de vue mathématique, il faut premièrement identifier les variables de conception Xi, i = 1,2, ...,n, qui peuvent être les différents facteurs et critères de performance, les paramètres de conception, les paramètres de fabrication, L'aléa sur ces variables est défini par une fonction de densité. Soit X = {Xi, X_2, .., X_n} le vecteur de variable de base qui regroupe les n variables de conception d'un produit, et f(xi,...,x_n)(xi,….,x_n) la densité de densité conjointe des variables de base.

2.3.3.2.2 Formulation de la fonction d'état limite.

La fonction de performance ou d'état limite G(X) est la surface qui sépare le domaine physique en deux domaines. Elle est définie telle que, G(X) > 0 soit la région ou le domaine de sécurité, et G(X) < 0 est le domaine de défaillance, ceci pour un scénario de défaillance donnée.

Pour un critère de performance S(X), réponse d'un du système à une sollicitation, la fonction de performance du produit est définie par :

$$\boldsymbol{G(X) = R_{critique} - S(X)} \qquad \textbf{[2.17]}$$

Avec, R critique est la limite du seuil critique de la réponse étudiée appelée résistance.

Pour le mode de défaillance défini précédemment où P_f représente la probabilité que la réponse à un critère de performance excède la limite critique, la probabilité de défaillance est exprimée comme :

$$\boldsymbol{P_f = \int_{G \leq 0} f_{(x_1 \dots x_n)}(x_1 \dots x_n) d_{x1} \dots d_{xn}} \qquad \textbf{[2.18]}$$

Plusieurs méthodes de calculs de la probabilité de défaillance sont proposées suivant la nature des distributions des variables de conception.

Deux types de méthodes se distinguent (Deheeger, 2008) :

- Méthodes d'approximation : basées sur une approximation de la loi de distribution des variables de conception par la loi Normale. Le calcul de la probabilité de défaillance est alors effectué à partir de l'étude de l'état limite. Les méthodes les plus utilisées sont les méthodes basées sur le développement de Taylor au voisinage du point de conception : First/Seconde Order Reliability Méthodes connue sous le nom FORM/SORM.

- Méthodes par simulation : basées sur un calcul approximatif de la probabilité de défaillance selon la méthode de Monte-Carlo, en générant des échantillons de la population des variables de base pour obtenir une population représentative sur laquelle une analyse statistique peut être effectuée. Cette Méthode se base sur l'étude de la fonction de performance G(X). Donc pour le calcul de la probabilité de défaillance, il est nécessaire de connaître la forme ou la surface de l'état limite.

2.3.3.3 Méthodes d'approximation Premier/seconde ordre

2.3.3.3.1 Concept des méthodes d'approximation

Les méthodes d'approximation FORM/SORM sont considérées comme les plus efficaces en termes de rapport temps de calcul et précision de la réponse. Elle consiste

en un premier temps, à rechercher le point de conception dans l'espace des variables standards. Puis, la fonction d'état-limite est approximée par un développement de Taylor au premier ordre (FORM) ou au second ordre (SORM), autour du point de conception (point de défaillance le plus probable).

2.3.3.3.2 Méthodes d'approximation du premier ordre FORM.

La méthode FORM est introduite dans le but de faire une approximation de la probabilité de défaillance à moindre coût comparé à la simulation de Monte Carlo, où le coût est mesuré en termes de nombre d'évaluations de la fonction d'état limite.

La probabilité de défaillance, donnée en fonction de l'indice de fiabilité β peut être définie comme :

$$\boldsymbol{P_f = 1 - \phi(\beta)} \qquad \textbf{[2.19]}$$

Où, ϕ(β) est une fonction de répartition d'une variable normale centrée réduite (Moyenne nulle et écart-type unitaire).

Le terme β est appelé l'indice de fiabilité, cette valeur représente le nombre d'écarts types entre la moyenne et le domaine de défaillance qui se situe à la valeur 0.Plus la valeur de β est élevée, plus grande est la sécurité et plus petite est la probabilité de défaillance.

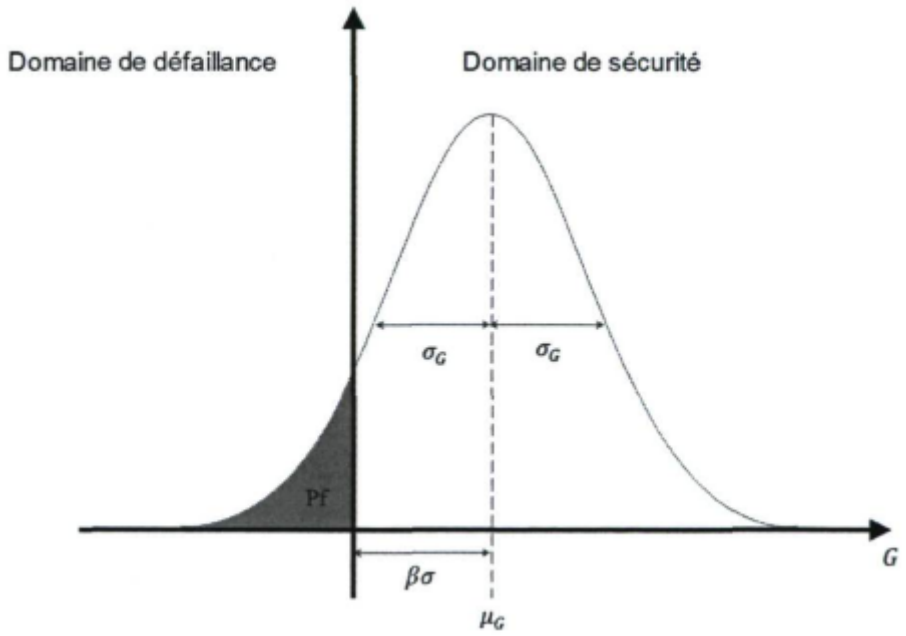


Figure 2.11 Fonction de densité de probabilité de G(β)

Plusieurs expressions de l'indice ont été proposées, mais la plus utilisée est celle démontrée par Hasfer-Lind, qui consiste à chercher le point le plus proche de l'origine qui appartient à l'état limite.

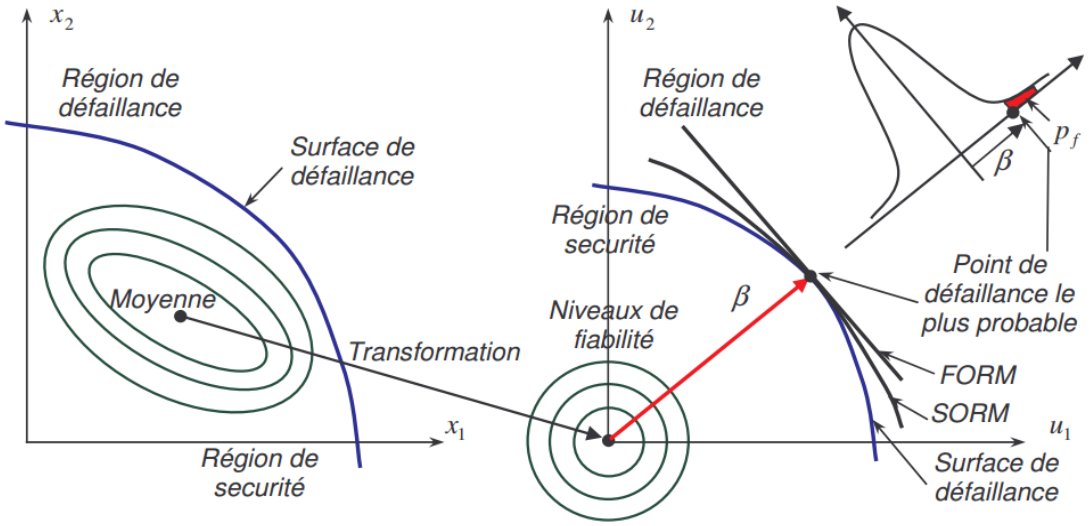


Figure 2.12 Transformation de deux variables du système de coordonnées original

Au système de coordonnées réduit. L'approximation par FORM de la fonction de performance (Rojas, 2008).

La méthode FORM améliorée (méthode de Hasfer-Lind), peut être appliquée pour des variables aléatoires normales (Haldar et Mahadevan, 2000). Cette méthode requiert la transformation des variables aléatoires de base en variables aléatoires normales centrées réduites (figure 2.12).

$$x_i' i = \frac{x_i - \mu_{xi}}{\sigma_{xi}} \qquad i = 1, 2, \ldots\ldots, n \qquad \textbf{[2.20]}$$

Où x'$_i$ est une variable aléatoire normale centrée réduite à moyenne nulle et écart type unitaire. Ces changements de variables transforment la fonction d'état limite G(X) = 0 dans la fonction d'état limite réduite G(X') = 0.

L'indice de fiabilité est défini par la distance minimale entre l'origine du système réduit et la surface de défaillance, exprimé par :

$$\beta = \sqrt{(x'^*)^T (x'^*)} \qquad \textbf{[2.21]}$$

Le point de distance minimale sur la surface de défaillance est appelé le point de conception dans l'espace de variable normale centrée réduite est exprimé par :

$$x'^* = -\alpha_i \beta \qquad \textbf{[2.22]}$$

Où, αi le cosinus directeur au long des axes des coordonnées, exprimé par

$$\alpha_i = \frac{\left(\frac{dG}{dx_i'}\right)^*}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{dG}{dx_i'}\right)^{*2}}} \quad [2.23]$$

Ainsi, l'équation de transformation des variables originales en variables normale centrées réduites permet de définir le point de conception dans l'espace de variables physiques par :

$$x'^* = \mu_{x_i} - \alpha_i \sigma_{x_i} \beta \quad [2.24]$$

Sur la figure (2.12), la courbe d'état limite est remplacée selon la méthode d'approximation FORM par un hyperplan tangent au point de conception.

Le premier algorithme FORM1 utilisé dans les simulations numériques pour l'estimation de l'indice de fiabilité requiert la connaissance explicite de G(X) en fonction de point de conception. Pour la prise en compte de la méthode FORM dans le processus de conception, on utilisera l'algorithme FORM2 (Haldar et Mahadevan, 2000) qui permet de calculer la valeur de β à partir de l'expression implicite de la fonction de performance (figure 2.13), c'est-à-dire, elle ne peut pas être exprimée comme une forme explicite des variables aléatoires. Dans ce but, on fait appel aux méthodes des éléments finis pour combler ce manque d'information.

La précision d'approximation de la méthode FORM dépend de la courbure de l'état limite autour du point de conception. Plus la courbure est grande, plus l'erreur d'approximation augmente, il est donc nécessaire de recourir à une approximation au second ordre.

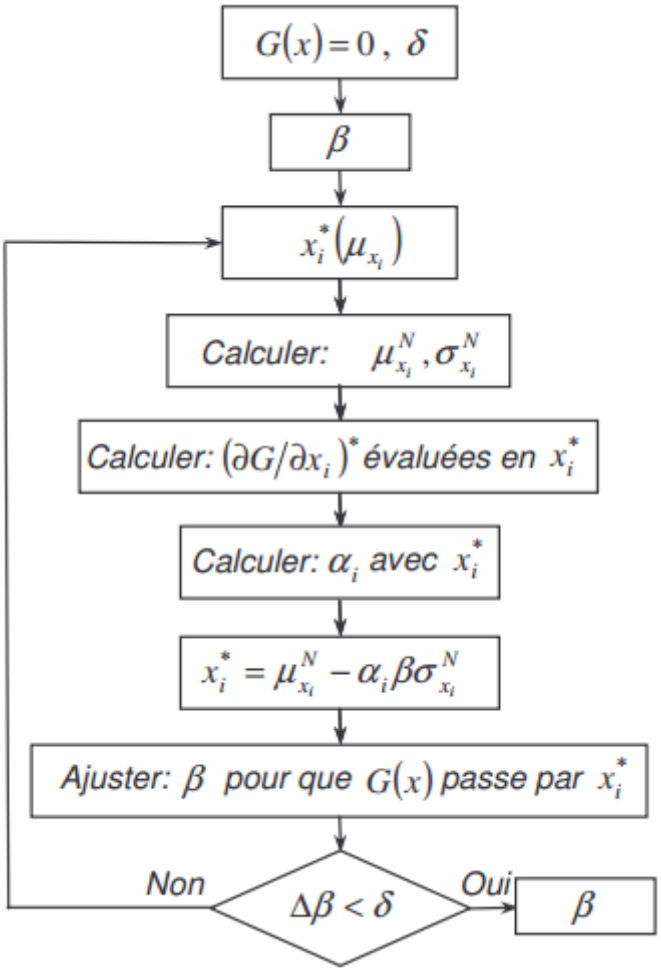


Figure 2.13 Algorithme FORM pour l'estimation de l'indice de habilité (Rojas, 2008)

Dans cet algorithme, σ est la tolérance exigée à β.

Les moyennes et les écarts types dans l'espace réduit sont désignés respectivement et $u_{xi}^N \; et \; \sigma_{xi}^N$ ils sont donnés en fonction de $fx_{(xi)} et \; \varphi(xi)$ des variables aléatoires par les expressions :

$$\boldsymbol{\mu_{xi}^N = X_i - \phi_{(xi)}^{-1} \sigma_{xi}^N} \qquad \textbf{[2.25]}$$

$$\boldsymbol{\sigma_{xi}^N = \frac{\phi_{(xi)}}{f_{x_{(xi)}}}} \qquad \textbf{[2.26]}$$

2.3.3.3.3 Méthodes d'approximation du second ordre SORM

La méthode d'approximation SORM, estime la probabilité de défaillance à travers une approximation quadratique ayant le même rayon de courbure que la fonction de performance au point de conception (figure 2.12). La courbure de la fonction de performance est approchée par un développement en série de Taylor du second ordre

autour du point de conception. De cette façon, la méthode SORM constitue une amélioration de la méthode FORM.

2.3.4 Méthodes de simulation de Monte-Carlo (SMC)

Les méthodes de simulation de Monte-Carlo sont basées sur le calcul de la fonction de performance pour un échantillon représentatif de la population. Une série de tirages aléatoires sont effectués, ensuite l'évaluation de la réponse du système est effectuée pour chaque scénario donné.

Ces méthodes sont très coûteuses en temps de calcul, mais certainement les plus fiables pour l'évaluation de la probabilité de défaillance (Rojas, 2008). Plusieurs variantes de ces méthodes, visent à optimiser les stratégies de tirages dans le but de réduire ce temps de calcul.

La méthode SMC reproduit le fonctionnement d'un système réel par le biais analytique et analyse les effets des variations des entrées sur les sorties des systèmes (Zwingmann, 2005).

Sa mise en œuvre comprend six étapes clés, Haldar Et Mahadevan (2000), Rojas(2008).

1. Définition du problème en terme de toutes les variables aléatoires ;
2. Modélisation des caractéristiques probabilistes de toutes les variables aléatoires en termes de fonction de densité de probabilité et des paramètres associés ;
3. Génération de n échantillons de variables aléatoires ;
4. Evaluation du taux de défaillance en utilisant la fonction de performance pour chaque ensemble de données produites de toutes les variables aléatoires ;
5. Extraction des informations probabilistes à partir du nombre d'évaluations effectuées et conclure la probabilité de défaillance du produit ;
6. Déterminer la précision de la simulation et de l'efficacité.

En générale, dans la 4éme étape on fait appelle à des modèles des éléments finis, afin d'évaluer la fonction de performance implicite. Le but est d'estimer l'intégrale suivante :

$$\boldsymbol{P_f = \int_{G\leq 0} f_X(x).dx} \qquad \textbf{[2.27]}$$

Cette intégrale limitée au le domaine de défaillance peut être transformée à une intégrale sur l'espace physique entier en introduisant la fonction indicatrice notée γf qui prend la valeur égale à 1 dans le domaine de défaillance et 0 dans le domaine sûr.

L'expression de la probabilité de défaillance prend alors la forme suivante :

$$\boldsymbol{P_f = \int \gamma F(x) f_X(x).\, dx = E[\gamma F(x)]} \qquad \textbf{[2.28]}$$

$E[\gamma_F(x)]$ représente l'espérance mathématique de $\gamma_F(x)$, il est donc possible de faire appel à l'estimateur empirique :

$$\boldsymbol{P_f = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \gamma F(x_i) = \frac{N_f}{N}} \qquad \textbf{[2.29]}$$

Nf, le nombre de fois (tirage) où la défaillance se produise.

N, le nombre total de tirages, générés selon la fonction de densité dans chaque échantillon.

La figure 2.14, illustre la simulation d'importance dans l'espace physique. Les tirages sont générés autour du point de défaillance le plus probable.

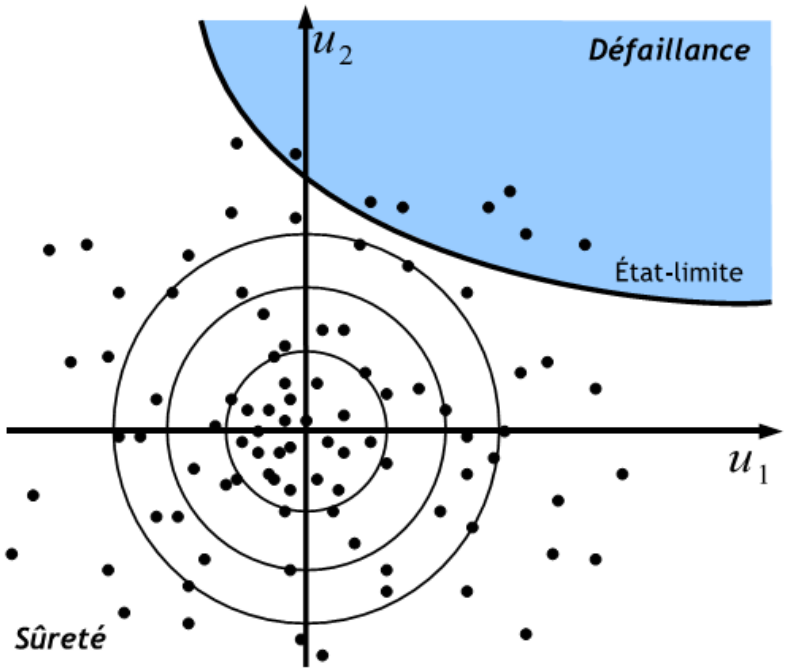


Figure 2.14 Illustration de la simulation d'importance dans l'espace physique (Deheeger,2008).

La méthode SMC est considérée comme une réponse de référence au problème d'évaluation de la fiabilité par l'approche probabiliste (Deheeger, 2008). L'un des inconvénients majeurs de la SMC est le temps de calcul dû au grand nombre de simulation requis dans certains scénarios.

2.4 Modèle de prise en compte de la fiabilité au processus de conception.

2.4.1 Phase de planification et identification des besoins.

Au stade de la planification, les tâches de la fiabilité doivent permettre les multiples attentes du client, établir les exigences de la fiabilité concurrentielle, constituer une équipe et assurer les ressources nécessaires pour qu'un programme de fiabilité puisse être réalisé dans les meilleures conditions (figure 2.15). Les tâches de la fiabilité dans cette phase du processus de conception sont expliquées brièvement ci-dessous.

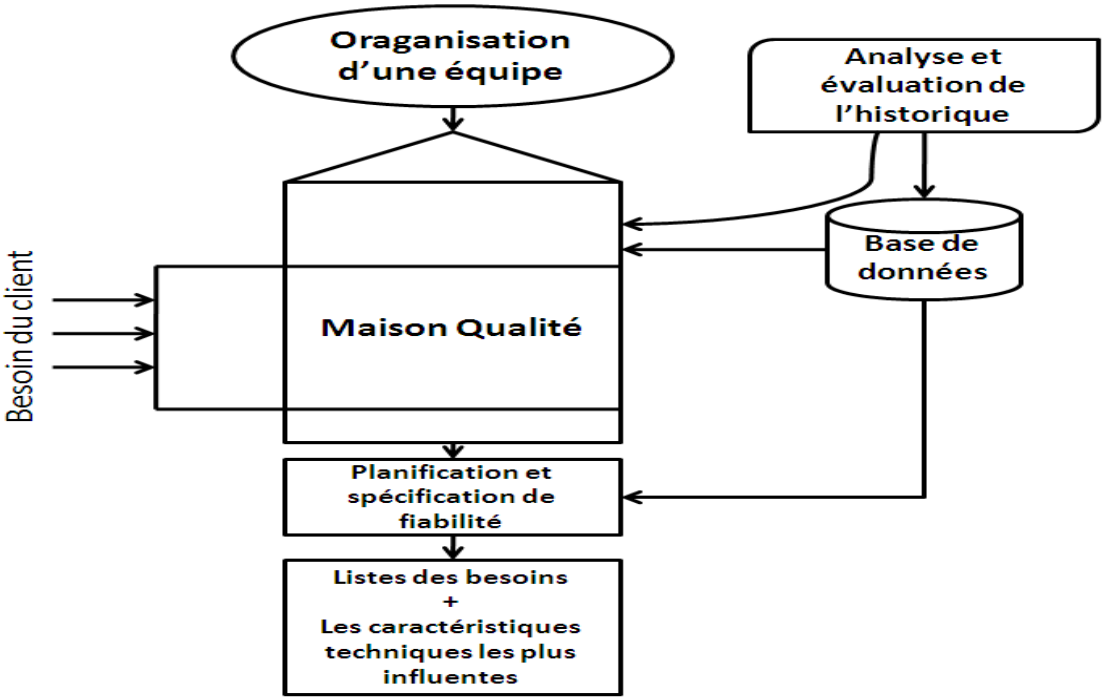


Figure 2.15 Phase de planification des tâches (Ayoub et al 2014a).

Mise en place d'une équipe de la fiabilité. Une équipe multidisciplinaire qui possède une expertise reconnue dans les divers domaines techniques, économiques,... doit être assemblée au début d'une étape de la planification du produit de sorte que les exigences de la fiabilité soient prises en compte dans le processus de prise de décision. La solution proposée par l'équipe peut être maximisée si les membres de l'équipe possèdent une expertise diversifiée, telles que : la fiabilité, les études de marché, la conception, les essais, la fabrication et l'exploitation sur le terrain.

Analyse et évaluation de l'historique de la fiabilité (Si disponible). Cette tâche consiste à collecter, rassembler et analyser les commentaires des clients, les données des tests et l'insuffisance des données du produit avant génération. L'analyse devrait indiquer les points dont le client n'était pas satisfait et de révéler les différents points à améliorer. Un modèle recommandé pour la caractérisation des données a été développé par Robert Klein, Cohen, et peut être exploité lors la réalisation de cette tâche.

Déploiement de la fonction qualité (QFD). Lors de l'exécution de cette étape, il faudra réduire toutes les caractéristiques techniques qui affectent la fiabilité, en mettant l'accent sur les attentes du client en termes de fiabilité, et en leur attribuant une note importante. Ensuite ces caractéristiques techniques seront fortement corrélées, afin d'identifier les différentes contradictions et obtenir celles qui affectent la fiabilité du produit. Les caractéristiques techniques sélectionnées doivent être développées à un niveau inférieur avec plus d'importance.

Stevenson & Benedetti (2001) et Heizer & Render (1999) détaillent le déploiement de la fonction qualité. Ces derniers donnent la séquence des maisons de la qualité à construire pour mieux répondre aux attentes du client. La première maison porte sur les caractéristiques techniques, la suivante sur les composants, puis sur les processus de production et enfin sur le projet de qualité.

La planification et la spécification de la fiabilité. L'objectif de cette tâche est d'établir un objectif de la fiabilité concurrentiel qui est économiquement réalisable, et développer un programme de fiabilité efficace pour atteindre ou dépasser le seuil fixé. Cette tâche peut être facilitée en utilisant les résultats de l'analyse du QFD et les bases de données disponibles collectées auparavant.

Cette phase se traduit par une spécification des besoins et l'identification des caractéristiques techniques les plus importantes et leurs valeurs cibles. Ces caractéristiques doivent être déployées dans les phases suivantes et servir comme des facteurs de contrôle lors du processus de conception.

2.4.1.1 Application de la méthode à une pompe immergée.

Afin d'appliquer notre démarche pour la pompe immergée d'une PME marocaine, nous suivons les étapes ci-dessous:

1) Nous réalisons un état des exigences du client, pour définir les entrées de la maison qualité. Ces attentes sont souvent non techniques et floues.

   Pour le système étudié, les attentes de client sont :

   - Une grande fiabilité ;
   - Un minimum de bruit de fonctionnement ;
   - Débit maximum : 65 m^3/h ;
   - Hauteur manométrique maximum : 350 m;
   - Diamètre maximum de l'électropompe : 160 mm ;
   - Le rendement est de l'ordre de 60 à 70 %.

NB Les hauteurs manométriques totales fournies par une pompe immergée ne peuvent dépasser quelques dizaines de mètres. Pour dépasser ces valeurs on utilise des pompes centrifuges multicellulaires où plusieurs roues sont montées en série sur le même arbre. Le refoulement d'une des pompes communique avec l'aspiration de la pompe suivante.

Ces besoins sont répertoriés dans les entrées " QUOI " de la maison qualité.

2) Nous déterminons l'opportunité du client, dont le taux d'intérêt pour chaque exigence par rapport à une autre. Diverses approches d'échelle sont utilisées dans la pratique, mais aucune d'entre elle n'est théoriquement saine. Dans l'ensemble pompe-turbine, nous utilisons l'approche processus analytique, Armacost et al. (1994), dont le taux du niveau d'importance est donné sur une échelle de 1 à 9 : 9 étant donnée comme un niveau extrêmement important, 7 comme fortement important, 5 comme très important, 3 comme important, et 1 comme pas important. Les valeurs 2, 4, 6, et 8 sont affectées à un niveau d'importance entre les deux.

   Pour une prise en compte de la fiabilité dès cette phase, il est important que l'exigence de la fiabilité reçoit une note d'importance élevée.

3) Nous établions une liste de caractéristiques techniques qui touchent au moins une ou plusieurs exigences de l'axe client. Ces caractéristiques doivent être mesurables et contrôlables, et elles doivent définir techniquement la performance du produit en cours de sa conception. Elles seront déployées d'une manière sélective dans la prochaine phase du processus. Dans cette

étape, l'analyse et l'évaluation de l'historique des bases de données existantes sont d'une grande utilité afin d'identifier les principales caractéristiques techniques qui influencent la fiabilité, et qui peuvent ne pas être évidentes. Dans le système pompe-turbine les caractéristiques techniques qui ont été identifiées, sont répertoriées dans la figure 2.16.

4) On identifie les interrelations entre les exigences du client et les caractéristiques techniques. Le poids de chaque relation peut être classé en trois niveaux où la note de neuf est attribuée à une relation forte, 3 à une relation moyenne, et 1 à faible rapport. Chaque caractéristique technique doit être étroitement liée à au moins une exigence, et chaque exigence doit également être liée à une caractéristique technique. Cela garantit que toutes les exigences du client soient prises en compte dans la planification du produit. Le poids de chaque relation par rapport au système d'essuie-glace sont entrés dans la matrice de la maison qualité. On peut ainsi observer que la charge du moteur est une des caractéristiques techniques qui affecte fortement la fiabilité du système.
5) On développe les corrélations entre les caractéristiques techniques et on les indique dans le toit de la maison de qualité. Les caractéristiques techniques peuvent avoir une corrélation positive, ce qui signifie que le changement d'une caractéristique technique dans une direction affecte une autre caractéristique dans la même direction. Une corrélation négative signifie le contraire. Quatre niveaux de corrélation sont utilisés : une corrélation fortement positive, représentée graphiquement par (++) ! positive (+) ; négative (—) et fortement négative par (--). Habituellement, les corrélations ajoutent de la complexité dans la conception des produits, et donnent lieu à des décisions de compromis dans le choix des objectifs techniques si les corrélations sont négatives. Les corrélations entre les caractéristiques techniques du système d'essuie-glace apparaissent dans le toit de la maison de qualité, comme le montre la figure 2.16.
6) On calcule l'évaluation de l'importance technique. Pour chaque caractéristique technique donnée, les valeurs de l'indice opportuniste client sont multipliées par le poids correspondant de la matrice. Le degré d'importance de la caractéristique technique est la somme de ces produits. Les cotes d'importance

permettent d'identifier les caractéristiques techniques à privilégier et donc, d'indiquer les caractéristiques importantes qui devraient être sélectionnées pour la poursuite du développement.

Caractéristiques techniques / Exigences client	Importance des exigences	Nombre des roues	couple de rotation de Moteur	Type des roues	Vitesse Max du moteur	Vitesse min du moteur
Haute fiabilité	9	9	3	3	9	3
Min bruit	5	1	9	1	3	9
Débit Max 65 m³ / h	7	9	3	3	3	3
Hauteur Manométrique max 350 m	3	9	3	3	3	3
Rendement 60-70%.	7	9	3	3	3	5
Importance Technique		239	123	83	147	137

Figure 2.16 Maison de qualité d'une pompe immergée. (Ayoub et al 2014a).

Dans notre étude du système pompe immergée, le degré d'importance du nombre des roues est de 9 x 9 + 5 x 1 + 7x9 + 9x3 + 7x9= 239. L'évaluation des caractéristiques techniques sont énumérées dans la rangée "importance technique", illustrée dans la figure 2.16. Les évaluations indiquent que le nombre des roues est une caractéristique importante et devrait être déployée avec plus d'importance dans le processus de conception.

$$\mathbf{IT} = \sum\left((\mathbf{coefficient\ Importance\ \ exigence}) * (\mathbf{coefficient\ exigences\ techniques})\right) \quad \mathbf{[2.30]}$$

2.4.2 Phase conceptuelle.

Les engagements pris en cours de la phase conceptuelle sont différents de ceux réalisés plus tard. Ils sont souvent d'ordre fonctionnel, indiquant ce que le comportement de la conception détaillée devrait présenter sans préciser comment ce comportement sera atteint, Smith et Clarkson (2005). À ce stade, on ne s'intéresse pas à la détermination de la probabilité de défaillance, car en général, l'information disponible qui permet de calculer cette probabilité à ce niveau de conception est pauvre. Mais plutôt, on s'intéresse à réduire cette probabilité en réduisant les modes qui mènent à la défaillance du système.

Smith et Clarkson (2005) distingue deux types de défaillance qui peuvent affecter la fiabilité dans la phase conceptuelle, et ils leur donnent l'appellation de défaillance conceptuelle. Ces deux types de défaillance sont :

- Défaillance fonctionnelle, où les fonctions choisies ne répondent pas aux fins du produit. Elle se produit lorsque la spécification fonctionnelle ou les exigences élaborées ne portent pas sur l'ensemble du problème.

- Défaillance comportementale où le comportement réalisé ne remplit pas la fonction de production associée.

En ce qui concerne la défaillance de comportement, une décision prise lors de la phase conceptuelle peut inutilement mettre en place des charges excessives dans le produit qui pourraient manquer dans les phases qui suivent, et ainsi de provoquer des défaillances prématurées du système. De ce fait, à ce stade, on s'intéresse à diminuer, voir éliminer les défaillances préliminaires d'ordre fonctionnel afin de réduire la probabilité de défaillance.

L'analyse qualitative des événements préliminaires des défaillances, l'AMDEC, et l'arbre de défaillance peuvent être utilisés, en s'appuyant sur la décomposition de la fonction principale du concept choisi en sous fonctions secondaires à l'aide de bloc-diagramme fonctionnel, afin d'examiner tous les modes de défaillance susceptible à ce stade de développement, pour en déduire les répercussions sur le système (figure 2.17)

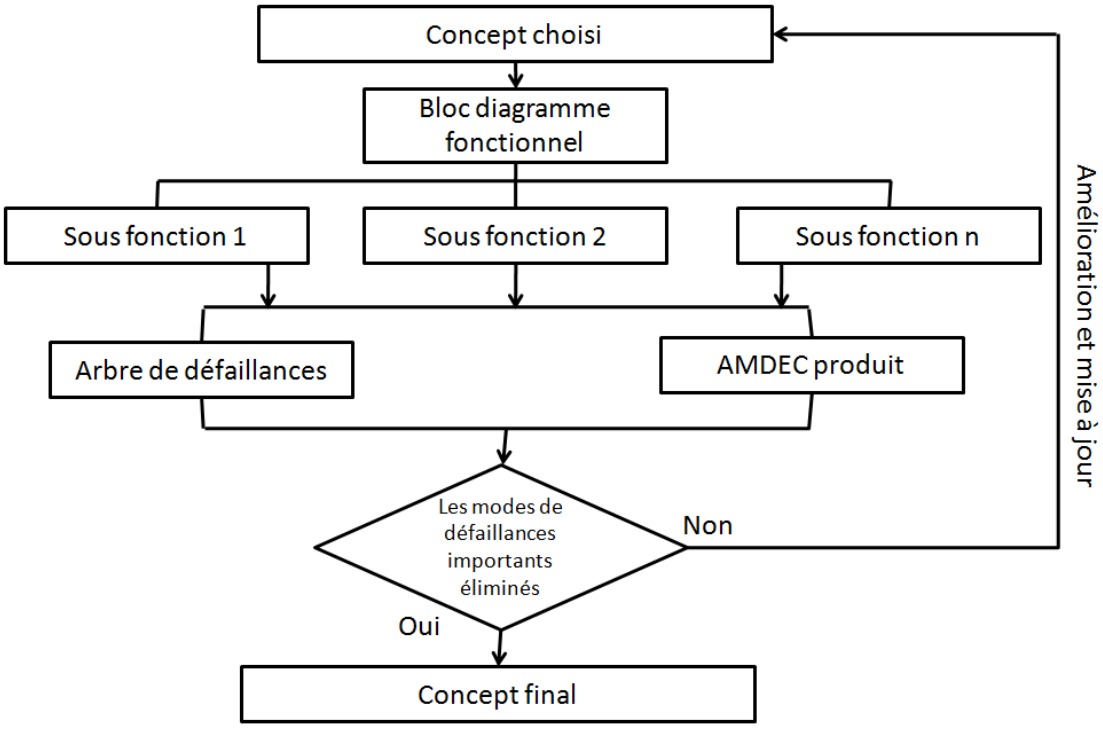


Figure 2.17 Pré-validation du concept dans la phase conceptuelle (Ayoub et al 2014a).

Ce qui nous permet d'effectuer une pré-validation du concept choisi avant de passer à la phase qui suit. L'effort de la conception relatif au temps et aux connaissances requises par le concepteur sera moins important pour assurer la fiabilité au cours des étapes de la conception architecturale et la conception détaillée, si le concept final élaboré à la phase conceptuelle est fiable. Cela se traduira par un produit plus fiable et moins coûteux, (Lindahl 1999).

2.4.2.1 Application.

Dans notre étude de cas et après la phase de planification et identification des besoins, nous pouvons dire que le nombre des roues aient une note élevée. Dans la suite on s'intéresse à l'analyse des roues (ensemble turbine-diffuseur).

A Conception du diffuseur

À ce stade de développement du processus de conception, le concept choisit pour le diffuseur est celui de la figure 2.18.

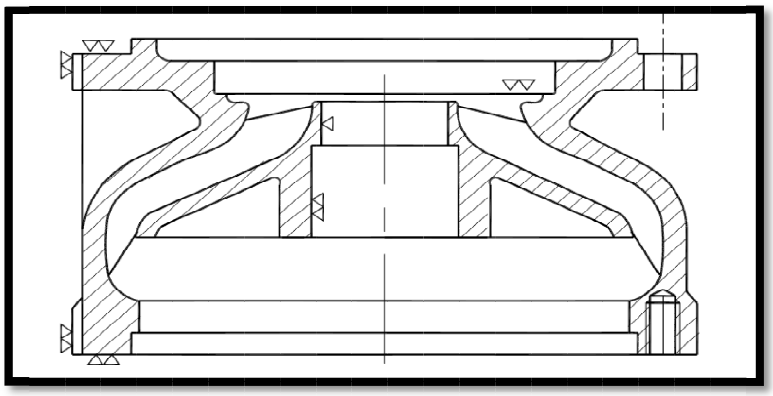


Figure 2.18 Concept choisit pour le diffuseur (Ayoub et al 2014a).

Le Diffuseur est destiné à recueillir le liquide qui sort de la roue, et à le diriger, soit vers l'orifice de refoulement, soit vers l'entrée de la roue suivante, selon que la pompe est mono ou multicellulaire.

La défaillance de la fonction globale, est que le diffuseur ne supporte pas la pression.

À partir de la figure 2.18, nous pouvons identifier les causes qui mènent à la défaillance globale du système. Chacune de ces causes a une relation (OU) avec la fonction globale (figure 2.19).

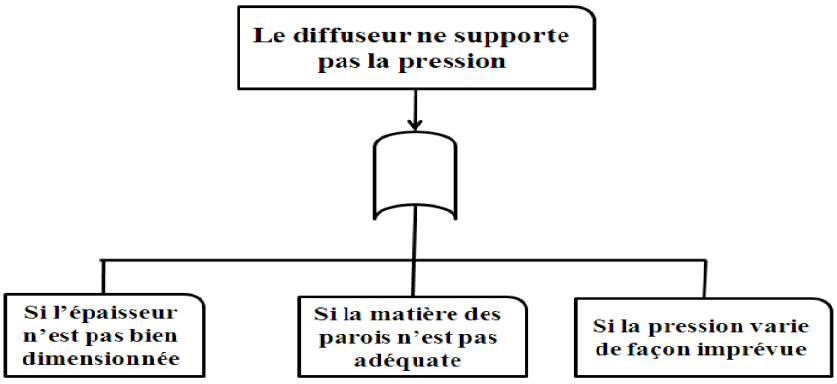


Figure 2.19 l'arbre de défaillance du diffuseur(Ayoub et al 2014a).

A partir de la figure 2.19 et afin d'éliminer les causes des défaillances nous avons adopté les solutions suivantes

- Redimensionner les parois des diffuseurs, tout en conservant la même forme des parties hydrauliques, qui conditionnent les valeurs de pression et de la hauteur manométrique.
- Faire une étude RDM qui prend en considération la matière des parois et la pression d'entrée.

En conséquence, le concept sera grandement amélioré et les défaillances fonctionnelles potentielles seront évitées (figure 2.20).

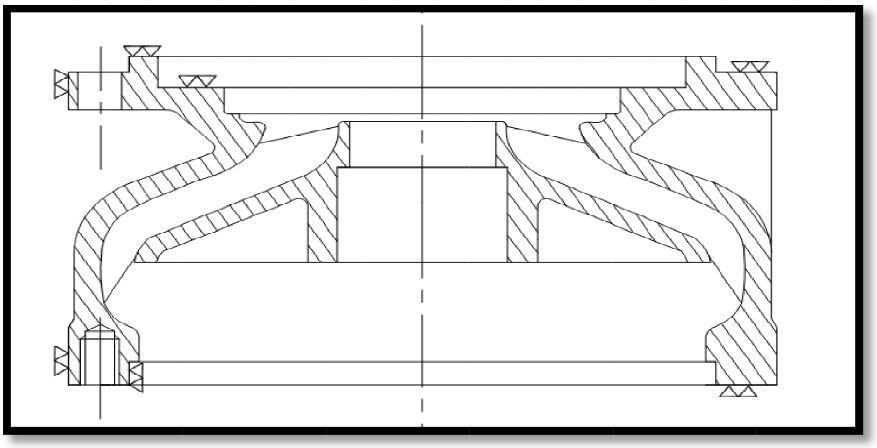


Figure 2.20 Concept optimisé du diffuseur(Ayoub et al 2014a).

B. Conception de la turbine

Le concept choisit pour la turbine est celui de la figure 2.21

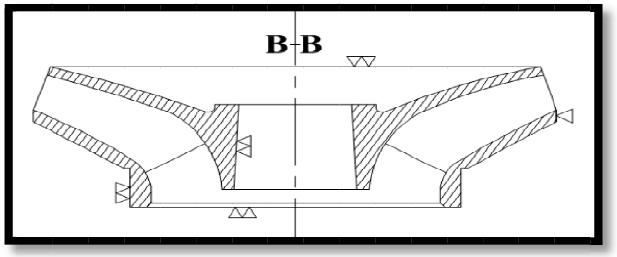


Figure 2.21 concept choisit pour la turbine(Ayoub et al 2014a).

La Turbine communique au liquide une partie de l'énergie cinétique transmise par l'arbre par l'intermédiaire de ses aubes (ailettes). Elle se monte sur l'arbre de la pompe à l'aide d'un cône et un écrou (la méthode de fixation par adhérence).

La défaillance de la fonction globale, à savoir « la turbine glisse sur l'arbre de la pompe ». Pour éliminer le risque de glissement de la turbine nous avons remplacé le système de fixation des turbines, par un système de fixation par obstacle en utilisant des clavettes et des entretoises, au lieu de la fixation par adhérence à l'aide de l'ensemble cône-Ecrou. Donc le concept sera amélioré figure (2.22)

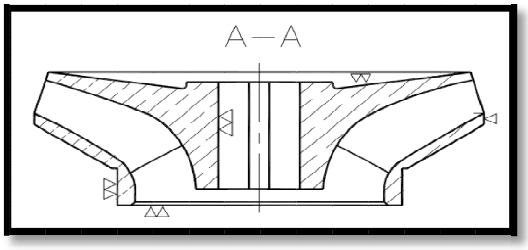


Figure 2.22 Concept optimisé de la turbine(Ayoub et al 2014a).

2.4.3 Phase architecturale

La conception architecturale consiste à définir la mise en page préliminaire du concept choisi dans la phase conceptuelle. A ce stade, la configuration du système prend forme, tandis que les études de performances initiales sont effectuées en utilisant des modèles simplifiés et des règles standards de conception mis à la disposition du concepteur.

A ce niveau, l'interprétation et l'évaluation de la fiabilité sont basées sur la probabilité de défaillance des composants du sous-système, en utilisant les méthodes d'évaluation suivantes :

- Méthode d'évaluation statique où la fiabilité des systèmes est évaluée sans tenir compte du facteur temps. Plus précisément, la fiabilité des composants du système est supposée constante.

- Méthode d'évaluation dynamique où les éléments de la fiabilité varient en fonction du temps.

Ce type d'analyse est généralement une forme d'analyse préliminaire ou primaire.

Néanmoins, dans ce type d'évaluation de la fiabilité. On commence par un développement de la fiabilité qui consiste à représenter le système par un diagramme, à son tour le diagramme est composé de blocs sous de nombreux représentants de sous système ou composant (Dhillon, 2005). La probabilité de défaillance, de chacun de ces sous-systèmes, ou composants est estimée pour calculer la probabilité de défaillance du système.

La mise en œuvre de ces méthodes requiert une connaissance à priori des composants des sous-systèmes utilisés. Dans le cas contraire, on fait appel aux méthodes d'analyse qualitative/quantitative tels que l'AMDEC ou l'arbre de défaillance afin d'identifier toutes les causes de défaillances ainsi que leur combinaison, et préciser la dépendance entre les différentes causes de défaillances, pour ensuite estimer la probabilité de défaillance du système, (figure 2.23).

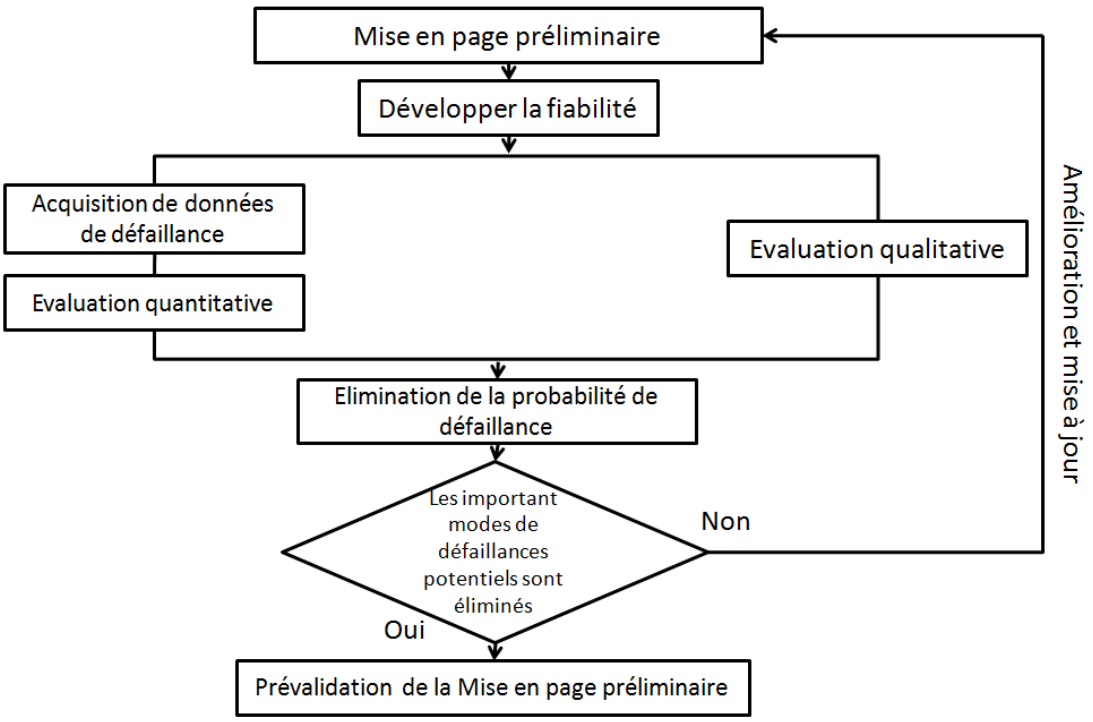


Figure 2.23 Pré-validation dans la phase architecturale (Ayoub et al 2014a).

2.4.3.1 Application

Le but principal d'une étude de fiabilité à ce stade de conception (phase architectural) est d'estimer la probabilité de défaillance, d'identifier ou de prévoir les défaillances fonctionnelles et comportementales aussi tôt possible. Ainsi, les points faibles de la conception peuvent être déterminés et éliminés dès cette phase.

Le système étudié (pompe immergée) repose sur la mise en rotation du fluide à pomper en le faisant circuler dans une **roue** tournant à une vitesse plus ou moins élevée. Le système se compose d'un moteur**,** qui fournit la puissance nécessaire au pompage. Des roues qui transmettent cette puissance à l'eau pour la déplacer (l'aspirer et ou la refouler).

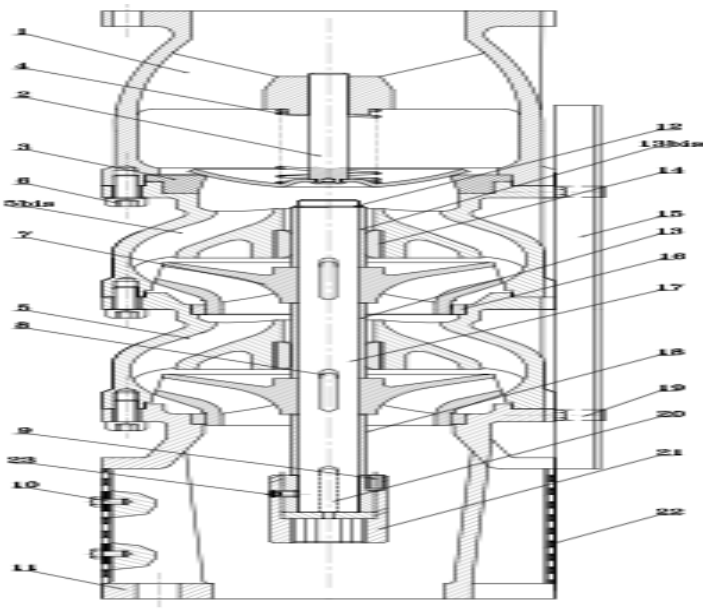


Figure 2.24 Plan d'ensemble de la pompe immergée (Ayoub et al 2014a).

Pour déterminer la fiabilité du système, il est utile de se référer à l'organigramme représenté à la figure 2.16 L'objectif principal de l'analyse, est de déterminer les composants qui sont critiques au point de vue fiabilité et de mettre en place une structure de la fiabilité du système.

Les éléments de fiabilité sont considérés séparément et leur fiabilité est déterminée, ensuite on procède au calcul de la fiabilité du système complet. L'analyse est conclue avec une pré-validation ou une modification de la mise en page préliminaire du système.

On identifie tous les composants du système afin d'étudier un aperçu du système (les composants et/ou des interfaces du composant peuvent être considérés comme des composants). Certains de ces composants peuvent devenir défaillants pour plusieurs raisons.

Pour le calcul plus tard, il est recommandé que l'examen de défaillances potentielles soit propre à un élément spécifique. Chaque élément du système remplit une fonction différente, et ainsi contribue différemment à la fiabilité du système.

On modélise le système sous forme d'un schéma bloc. Ceci sous-entend qu'une analyse topologique préalable du système doit être réalisée. D'après le schéma bloc fonctionnel, on peut constater que la défaillance d'un composant entraîne la défaillance du système, donc la structure du système est une structure en série (figure 2.25).

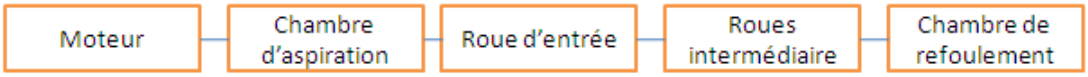


Figure 2.25 Modélisation de la pompe immergée en schéma bloc. (Ayoub et al 2014a).

La fiabilité du système R peut être calculée pour une structure en série, en fonction de la fiabilité des composants, c'est le produit de la fiabilité pour tous les éléments du système.

$$R_{système} = R_{moteur} \cdot R_{ch\ aspiration} \cdot R_{roue\ entrée} \cdot R_{roues\ intermédiaire} \cdot R_{ch\ refoulement} \quad [2.31]$$

L'équation du système [2.31] décrit les éléments pertinents à la fiabilité du système et de leurs dépendances fonctionnelles. Par conséquent, elle représente le résultat réel de l'analyse du système.

Après l'analyse du système, il est nécessaire de déterminer le comportement des composants ou leurs fiabilités. Bert she et Lechner (1999) propose de leur associer comme loi de défaillance la distribution de Weilbull dont les paramètres figurent dans le tableau 2.6.

Tableau 2.7 Paramètres de la loi de défaillance des éléments de la pompe immergée (distributionde Weibull) (Ayoub et al 2014a).

Composant		Mode de défaillance	η	β
1	Moteur	Défaillance du moteur	6.000.000	1
2	Chambre d'aspiration	Rupture de la chambre d'aspiration	38.000	1,4
3	Roue d'entrée	Rupture de la roue dentée	70.500	1,8
4	Roues intermédiaire	Rupture des roues intermédiaire	80.500	1,1
5	Chambre de refoulement	Rupture de la chambre de refoulement	38.000	1,4

β: valeur approchée à l'aide des produits similaires

η : s'exprime en tours d'arbre d'entrée

γ=0: en supposant que les paramètres de décalage sont nuls

Le calcul de la fiabilité du système est la dernière étape. Les fiabilités assignées à chaque élément, sont insérées dans le système d'équation $R(t) = e^{-(\frac{t}{\eta})^{\beta}}$: On trace le nuage de points en se basant sur loi de WEIBULL, et en utilisant le papier d'Allan Plait. Les résultats obtenus sont représentés sur un seul graphique.

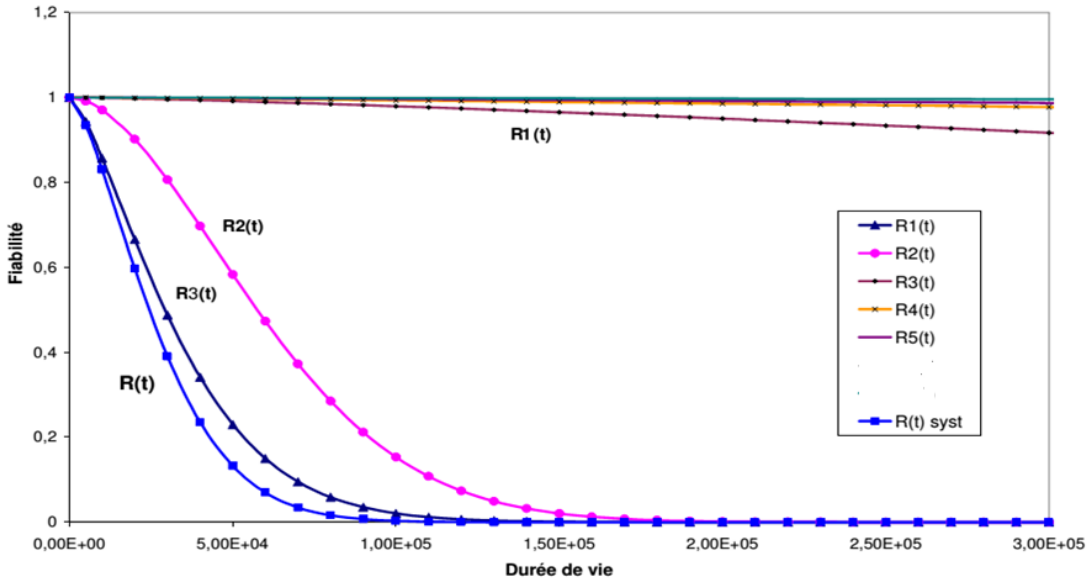


Figure 2.26 Présentation graphique de la fiabilité du système et de ses composants, (Ayoub et al 2014a).

On remarque que les courbes de la fonction de fiabilité des composants 2 et 3 sont prépondérantes. Il en résulte que la fiabilité du système dépend de la fiabilité de la chambre d'aspiration et de la roue d'entrée.

La dernière étape est l'analyse des résultats. Si la fiabilité du système est jugée correcte, par rapport aux listes des exigences définies dans la phase de planification et de clarification, la mise en page du système est acceptée. Sinon, des modifications sont nécessaires, plus précisément sur les deux premiers composants afin d'améliorer la fiabilité du système à ce stade de développement.

Dans notre cas la fiabilité du système est jugée correcte.

2.4.4 Phase détaillée.

La conception détaillée participe à la validation et au raffinage de la conception préliminaire dont la définition des formes des composants, des matériaux, des tolérances, des dimensions définitives, Dans ce but une compagne d'essais est effectuée grâce au plan d'expérience.

À ce stade de conception, on commence d'assembler plusieurs caractéristiques de chaque composant du système, ces caractéristiques sont les variables (intrinsèques et extrinsèques) de conception qui caractérisent le produit.

Cependant, les approches probabilistes de la fiabilité, basées sur la simulation numérique, peuvent être exploitées pour concevoir des composants mécaniques dans un contexte incertain, et donc déterminer la probabilité de défaillance du système.

Ces méthodes utilisent les variables de conception, sous forme de distributions de probabilité, pour reproduire la variabilité des systèmes réels, contrairement à celles parfaites et déterministes qui sont utilisées en conception traditionnelle.

Pour utiliser de telles approches, on a besoin de connaître la fonction de performance du système qui traduit le comportement mécanique de ce dernier. Pour cela, on effectue un couplage entre les approches probabilistes et les méthodes des éléments finis, mis en œuvre à l'aide des logiciels CAO (ABAQUS, CATIA...) tout en exploitant le modèle existant. Ce couplage permet au modèle probabiliste de définir les réalisations de données aléatoires à prendre en considération dans les modèles mécaniques, afin d'évaluer la fiabilité du système.

Les principales étapes qui nous permettent de calculer la probabilité de défaillance à ce stade de développement, et donc qui nous permettent d'évaluer la fiabilité du système, sont :

- L'analyse préliminaire du système à étudier : cette partie consiste à collecter les différentes informations sur le produit nécessaires pour aborder une évaluation de la fiabilité (variables intrinsèques et extrinsèques). Ensuite, effectuer une étude qualitative des modes de défaillance à l'aide des méthodes d'analyse prévisionnelle (l'AMDEC, l'AdD).

- L'analyse mécanique (analyse comportementale) : cette analyse consiste à définir un choix du modèle mécanique, en associant à chaque mode de défaillance (fatigue, mécanique de la rupture,...) un modèle mécanique qui traduit le comportement du candidat pour l'évaluation de la fiabilité (sélectionné auparavant) à divers scénarios de défaillances, en fonction des variables de conception. A cette étape, on fait appel aux calculs par éléments finis, afin de construire le modèle mécanique (dans le cas où nous ne disposons pas de formules analytiques exactes et simples pour construire ce modèle). Ensuite, on effectue une formulation de la fonction d'état limite qui caractérise le comportement de la résistance par rapport à la sollicitation.

- L'évaluation de la variabilité des paramètres de dimensionnement : les variables de conception sont généralement de nature aléatoire. Dans cette étape l'approche probabiliste, pilote les variables de conception du code des méthodes des éléments finis (MEF), selon la loi statistique (densité de probabilité, fonction de répartition), qui tiennent compte de leurs dispersions et de la variabilité mécanique, afin de modéliser le contexte incertain du modèle mécanique et assurer une conception fiable.

- Le calcul de la probabilité de défaillance à l'aide des méthodes par approximation

FORM/SORM , ou les méthodes par simulation de Monte-Carlo.

- L'étude de sensibilité des variables géométriques : cette étape consiste à identifier le poids de chaque variable sur le calcul de probabilité de défaillance et examiner celles les plus influentes sur la défaillance et la durée de vie du produit.

- L'analyse des résultats : les résultats obtenus permettent, soit la pré-validation du système s'il répond aux exigences établies par le client, soit d'effectuer des modifications au niveau des éléments critiques afin d'améliorer la probabilité de défaillance du système, et tendre vers une solution acceptable à ce stade de développement.

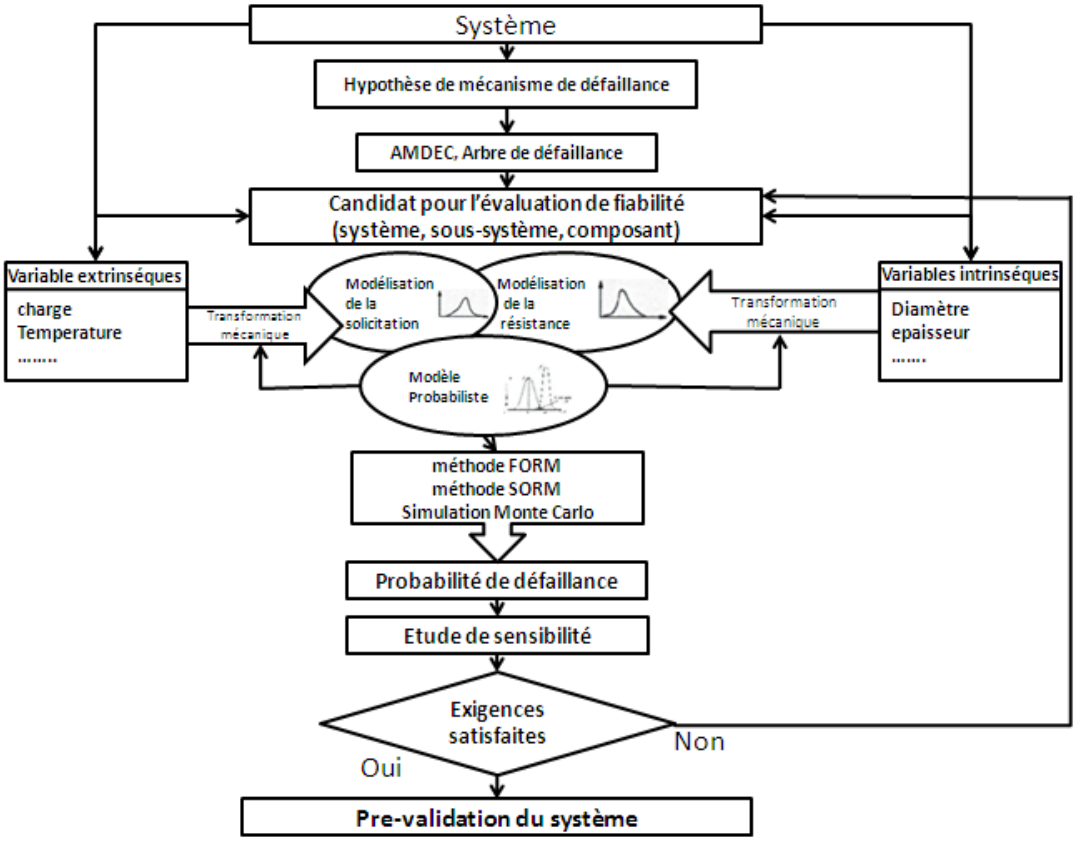


Figure 2.27 Pré-validation dans la phase détaillée(Ayoub et al 2014a).

Plusieurs interfaces des logiciels d'évaluation de la fiabilité, et des programmes commerciaux d'analyse par élément fini, permettent d'effectuer ce couplage mécano-fiabiliste. Néanmoins l'utilisation de ces interfaces, qui sont toujours en phase d'amélioration reste limitée au laboratoire de recherche.

Afin de bien comprendre les principales étapes développées à cette phase de conception, à savoir, l'analyse probabiliste et son couplage avec les méthodes des éléments finis, dans le besoin de déterminer la fonction d'état limite du système dans

le cas ou nous disposons pas de formule analytique; Une étude est réalisée avec des exemples tirés de la littérature sur un code de calcul FERUM (Finite Element Reliabiliy Using Matlab) dont la première évolution a commencé en 1999 à l'Université de California à Berkley (UCB) . Ce code est composé d'une boîte à outil open-source MATLAB, avec différentes méthodes d'évaluation de la fiabilité.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une démarche et des outils qui permettent au concepteur de comprendre les mécanismes de défaillance des composants d'un système industriel, afin de réduire leur impact sur la tenue de ce dernier et enfin d'évaluer la probabilité de défaillance ou du bon fonctionnement

Pour valider cette méthodologie nous avons présenté une application de notre démarche pour la pompe immergée d'une PME marocaine.

Dans le chapitre suivant nous allons aborder la notion de maintenabilité et la disponibilité, et leurs intégrations dans la conception, ainsi nous allons présenter les étapes et phases nécessaire pour mesurer la maintenabilité et la disponibilité au stade de conception.

Chapitre 3 : Indicateurs de maintenabilité et de disponibilité en conception

3.1 Introduction

Pour valider une caractéristique ou une performance, il faut disposer d'un indicateur. Ce chapitre a pour but de rechercher les indicateurs de maintenabilité et de disponibilité pouvant être évalués en phase de conception. La recherche est effectuée parmi les indicateurs disponibles dans la littérature. Ces indicateurs sont essentiellement utilisés en exploitation. La méthodologie adoptée est la suivante :

- recenser les principaux indicateurs disponibles;
- identifier les paramètres permettant de les calculer;
- identifier les sources d'obtentions des données permettant d'évaluer ces paramètres;
- Identifier les sources d'obtention des données qui peuvent être exploitées en conception ;
- Déduire les indicateurs pouvant être évalués en conception.

La suite du chapitre comporte quatre sections. Les sections 3.3 et 3.4 sont consacrées à l'application de la méthodologie présentée pour trouver, respectivement, le(s) indicateur(s) de maintenabilité et le(s) indicateur(s) de disponibilité pouvant être évalué(s) en conception.

Pour la présentation des indicateurs et leurs paramètres, nous adoptons les annotations suivantes:

N : Nombre de composants du système;

M : Nombre d'activités préventives à exécuter sur le système ;

λ_i : Taux de panne du composant i;

f_i: Fréquence de l'activité préventive j;

λ: Taux de panne du système;

f : Taux d'activités de maintenance préventive du système;

Nc_i : Nombre d'opérateurs affectés à l'activité corrective du composant i;

Np_j : Nombre d'opérateurs affectés à l'activité préventive j;

Tc_k: Durée de l'étape k de l'exécution de l'activité;

Mct_i: Temps de maintenance corrective du composant i;

Mpt_j: Temps d'exécution de l'activité préventive j;

$\overline{\overline{Mct}}$: Moyenne des temps de maintenance corrective;

Mpt : Moyenne des temps de maintenance préventive;

$\overline{M}$: Moyenne des temps actifs de maintenance ;

Mct: Médiane des temps de maintenance corrective ;

Mpt: Médiane des temps de maintenance préventive ;

Mct_{max} : Maximum de temps de maintenance corrective;

Mpt_{max} : Maximum de temps de maintenance préventive;

$LDTc_i$: Temps logistique de l'activité corrective du composant i;

$LDTp_j$: Temps logistique de l'activité préventive j;

$\overline{LDTc}$: Temps logistique moyen des activités correctives ;

$\overline{LDTp}$:Temps logistique moyen des activités préventives;

$\overline{LDT}$: Moyenne des temps logistiques;

$ADTc_i$: Temps administratif de l'activité corrective du composant i;

$ADTp_j$: Temps administratif de l'activité préventive j;

$\overline{ADTc}$: Temps administratif moyen des activités correctives ;

$\overline{ADTp}$: Temps administratif moyen des activités préventives;

$\overline{ADT}$: Moyenne des Temps administratifs;

$MDTc$: Temps d'arrêt moyen pour maintenance corrective;

$MDTp$: Temps d'arrêt moyen pour maintenance préventive ;

MDT : Moyenne des temps d'arrêt du système;

$MTBM$: Temps moyen entre les actions de maintenance;

$MLHc/OH$: Temps de main d'œuvre des activités correctives par heure de fonctionnement ;

$MLHp/OH$: Temps de main d'œuvre des activités préventives par heure de fonctionnement ;

MLH/OH: Temps de main d'œuvre de maintenance par heure de fonctionnement ;

$MLHc/M$: Temps moyen de main d'œuvre par activité corrective ;

$MLHp/MA$: Temps moyen de main d'œuvre par activité préventive;

MLH/MA: Temps moyen de main d'œuvre par activité de maintenance;

MCc_i : Coût de l'activité corrective sur le composant i;

MCp_j : Coût de l'activité préventive j;

MCc/OH: Coût moyen des activités correctives par heure de fonctionnement;

MCp/OH: Coût moyen des activités préventive par heure de fonctionnement ;

MC/OH: Coût moyen des activités par heure de fonctionnement;

MCc/MA: Coût moyen par activité corrective;

MCp/MA: Coût moyen par activité de préventive ;

MC/MA : Coût moyen par activité de maintenance.

3.2 Rappels des concepts et notions utilisés

3.2.1 Maintenabilité

3.2.1.1 Définition

Pour une entité donnée, utilisée dans des conditions données d'utilisation, la **maintenabilité** est la probabilité pour qu'une opération donnée de maintenance active puisse être effectuée pendant un intervalle de temps donné, lorsque la maintenance est assurée dans des conditions données et avec l'utilisation de procédures et de moyens prescrits». (IEC 60050- 191, 1990), (ARMP-7, 2001).

Une autre définition, complémentaire, fournie par le Military HandBook – 470A (1997) est la suivante : la **maintenabilité** est la relative facilité et économie de temps et de ressources avec laquelle un système peut être maintenue ou remis dans un état de fonctionnement spécifique, lorsque la maintenance est exécutée par un personnel ayant les compétences requises et utilisant les procédures et les ressources matérielles prescrites, à chaque niveau de maintenance spécifié.

Cette dernière définition indique que la maintenabilité est une caractéristique ou aptitude d'un système et que sa mesure se base essentiellement sur l'appréciation du déroulement des activités de maintenance. La **maintenance** désigne l'ensemble des activités destinées à maintenir ou à rétablir un système dans un état spécifié ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise (Ait-Kadi *et al.*, 2004).

Comme la durée de vie pour la fiabilité, la durée de réparation lors de la maintenance d'un système est une variable aléatoire dont la distribution cumulative est donnée par l'expression [3.1].

$$\boldsymbol{H(t) = \int_0^t h(t)dt} \qquad \textbf{[3.1]}$$

Où $h(t)$ la fonction densité de probabilité de réparation

La moyenne des temps de réparation, MTTR, qui est une des principales mesures de la maintenabilité, est calculée à partir de l'expression [3.2].

$$\boldsymbol{MTTR = \int_0^t t\,.\,h(t)dt} \qquad \textbf{[3.2]}$$

Si les durées de réparation suivent une loi exponentielle avec un taux de réparation constant, μ, on a :

$$\boldsymbol{h(t) = \mu \exp(-\mu t)} \quad \textbf{[3.3]}$$

$$\boldsymbol{MTTR = \frac{1}{\mu}} \quad \textbf{[3.4]}$$

3.2.1.2 Critères de maintenabilité

Plusieurs critères doivent être pris en compte lors de la conception d'un système pour que sa maintenance soit facile, rapide et économe en ressources. Ces critères sont généralement classés en deux groupes : les critères intrinsèques qui sont inhérent au système et les critères contextuels qui sont relatifs au contexte d'utilisation.

3.2.1.2.1 Critères intrinsèques

Parmi les principaux critères intrinsèques que confèrent à un système un bon niveau de maintenabilité, on peut citer : la démontabilité; l'accessibilité; l'interchangeablilité; la standardisation; la modularisation; la simplicité; la testabilité; etc. (Military Handbook – 470A, 1997), (Ireson *et al.,* 1995). Ces critères doivent être pris en compte dès la conception du système.

3.2.1.2.2 Critères contextuels

Certains éléments caractéristiques du contexte d'utilisation d'un système peuvent avoir une influence majeure sur sa maintenabilité. Ces éléments peuvent être classés en quatre groupes : les ressources humaines, les ressources matérielles, l'organisation mise en place et les conditions environnementales. Le tableau 2.2 fait une synthèse des principaux critères contextuels et les facteurs qui les caractérisent.

3.2.1.3 Indicateurs de maintenabilité.

Plusieurs indicateurs de maintenabilité sont disponibles dans la littérature. Ils sont de différentes natures. Certains mesurent par exemple les durées des activités de maintenance. Parmi eux, il y a la Moyenne des Temps Techniques de Réparation, MTTR, qui est un des indicateurs de maintenabilité les plus utilisé.

Pour un système série de N composants dont les taux de pannes sont constants, le $MTTR_s$ du système est obtenu par l'équation [3.5].

$$\boldsymbol{MTTR_S = \frac{\sum_{i=1}^{N} \lambda_i MTTR_i}{\sum_{i=1}^{N} \lambda_i}} \quad \textbf{[3.5]}$$

Où λ_i est le taux de panne du composant i et $MTTR_i$ la moyenne des temps technique de réparation du composant i. Elle est égale à la somme des durées des étapes (diagnostic, démontage, inter change, remontage, vérification du bon fonctionnement) de la phase active de maintenance corrective du composant i

3.2.2 Disponibilité

3.2.2.1 Définitions

La norme IEC 50-191 (1990) définit la **disponibilité** comme étant la «probabilité pour que l'équipement ou le système utilisé dans les conditions prévues soit en état d'accomplir une fonction requise à un instant donné».

Une autre définition similaire est proposée par Ait-Kadi (2007) qui définit la *disponibilité instantanée* comme «la probabilité que le système soit en état d'opération à un instant t et ce, indépendamment des états précédents».

Si les durées de vie et les durées de réparation suivent une distribution exponentielle avec, respectivement, un taux de panne λ et un taux de réparation μ, tous constants, la disponibilité instantanée est donnée par l'expression [3.6].

$$\boldsymbol{A(t) = \frac{\mu}{\lambda+\mu} + \frac{\lambda}{\lambda+\mu}\exp\left(-(\lambda+\mu)t\right)} \qquad \textbf{[3.6]}$$

3.2.2.2 Indicateurs de disponibilité

Les principaux indicateurs de disponibilité rencontrés dans la littérature sont analysés à la section 3.2.2 du chapitre 3, pour déterminer ceux qui peuvent être évalués en conception. Il s'agit essentiellement des expressions de disponibilité en régime permanent. Ils correspondent à la proportion de temps où le système est en état de fonctionnement par rapport au temps total (IEC 60300-3-4, 2007).

$$\boldsymbol{Disponibilité = \frac{Temps\ de\ fonctionnement}{Temps\ de\ fonctionnement + Temps\ d'arrêt}} \qquad \textbf{[3.7]}$$

La différence entre ces indicateurs réside sur les éléments qu'on inclut dans le temps d'arrêt. Par exemple, lorsque le temps de maintenance corrective est la seule composante du temps d'arrêt, on obtient la disponibilité stationnaire ou *Up Time Ratio, UTR*, donné par l'expression [3.8]. Si les délais administratifs, les délais logistiques, le temps de maintenance préventive et le temps de maintenance corrective sont tous pris en compte, on obtient la disponibilité opérationnelle donnée par l'expression [3.9].

- *Disponibilité stationnaire*

$$\boldsymbol{UTR = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR}} \qquad \textbf{[3.8]}$$

- *Disponibilité opérationnelle*

$$A_0 = \frac{MTBM}{MTBM+MDT} \quad [3.9]$$

Où *MTBM* (Mean Time Between Maintenance) est le temps moyen entre les actions de maintenance et *MDT* (Mean Down Time) est la moyenne de des temps d'arrêts (administratifs, logistiques et maintenance).

3.3 Indicateurs de maintenabilité en conception

Dans cette section, nous analysons les indicateurs de maintenabilité utilisés en exploitation pour identifier ceux pouvant être évalués en conception. Pour ce faire, nous recensons d'abord les indicateurs utilisés en exploitation et identifions les paramètres contenus dans leurs expressions. Nous examinons ensuite les sources d'obtention des données permettant d'évaluer ces paramètres. Certaines de ces sources de données peuvent être exploitées en conception. Leur identification nous permet de déduire les indicateurs pouvant être évalués en conception.

3.3.1 Indicateurs de maintenabilité en exploitation

La maintenabilité représente l'aptitude d'un système à être maintenu ou remis dans un état de fonctionnement spécifique, lorsque la maintenance est exécutée par un personnel ayant les compétences requises et utilisant les procédures et les ressources matérielles prescrites (Military HandBook – 470A, 1997). En d'autres termes, la maintenabilité représente la facilité et la rapidité avec lesquelles un système peut être remis en état de fonctionnement après une défaillance. Plusieurs références dans la littérature présentent les critères qui confèrent à un système un bon niveau de maintenabilité (Dhillon, 1999), (Dhillon, 2002), (Ireson *et al.*, 1995), (Ebeling, 1997), (Military HandBook – 791, 1988) ou (norme NF X60-301, 1982). Ces critères sont de deux types : les critères inhérents au système lui- même (critères intrinsèques) et les critères inhérents au milieu d'exploitation du système (critères contextuels). Comme critères intrinsèques, on peut citer : l'accessibilité, la démontabilité, la standardisation ou encore l'interchangeabilité. Comme critères contextuels, on a : les ressources humaines (effectifs et qualifications), le matériel support disponible, la disponibilité des pièces de rechange, les conditions environnementales ou les stratégies de gestion des opérations de production et de maintenance.

Les services de maintenance font face à un défi quotidien : augmenter la disponibilité du système en diminuant la durée et la fréquence des activités de maintenance tout

en respectant un budget alloué. Pour évaluer le niveau de maintenabilité du système et leur performance face à ce défi, plusieurs indicateurs sont disponibles dans la littérature (Ireson *et al.*, 1995), (Military HandBook – 470A, 1997) ou (Blanchard *et al.*, 2005). Ces indicateurs sont utilisés principalement en exploitation. Ils peuvent être regroupés en quatre familles (Menye *et al.*, 2007) que nous présentons ci-dessous. Chaque indicateur peut être évalué pour les activités de maintenance corrective, pour les activités de maintenance préventive ou simultanément pour les deux types d'activités de maintenance. Dans les sous- sections suivantes, nous présentons les expressions de ces indicateurs uniquement pour pouvoir identifier les paramètres qui interviennent dans leur calcul. Aucune référence à ces expressions n'est faite par la suite. C'est pour cette raison que nous avons choisi de présenter ces expressions dans des tableaux synthèses au lieu de les présenter individuellement à la ligne et avec des numéros.

3.3.1.1 Indicateurs de durée des activités de maintenance

Les indicateurs de durée des activités de maintenance évaluent la durée des étapes actives du cycle de maintenance corrective ou préventive (tableau 3.1) : diagnostic (exclusivement pour la maintenance corrective), démontage, remplacement/réparation, remontage, ajustement, vérification du bon fonctionnement et rodage (Military HandBook – 470A,1997). Ces étapes sont dites « actives » car elles sont exécutées sur l'équipement. Par contre, la première étape, préparation, est dite « inactive », car durant son exécution, rien ne se passe sur le système qui est alors en attente de réparation. L'étape de préparation englobe toutes les opérations administratives et logistiques préalables à la phase active. Dans le cas d'une opération de maintenance préventive nécessitant l'arrêt de fonctionnement du système, l'étape de préparation peut être exécutée en temps masquée (pendant que le système est encore en fonctionnement) pour réduire le temps d'arrêt du système.

Les indicateurs de durée des activités de maintenance sont basés sur la durée des étapes de la phase active de maintenance. On va ainsi mesurer par exemple la moyenne, la médiane ou le maximum des temps actifs de maintenance préventive ou de maintenance corrective ou alors de maintenance préventive et corrective simultanément.

Tableau 3.1 Étapes du cycle de maintenance (ayoub et al 2015)

	Étapes	Maintenance corrective	Maintenance préventive
	Préparation	X	X
Phase active	Diagnostic (localisation et isolation de la panne)*	X	
	Démontage du composant	X	X
	Remplacement ou réparation du composant	X	X
	Remontage du composant	X	X
	Vérification du bon fonctionnement	X	X

(*) L'étape de localisation de la panne est exclusive à la maintenance corrective

Rappelons que la médiane représente la valeur qui permet de séparer une population ou une série en deux parties égales. En d'autres termes, la moitié des activités de maintenance a une durée individuelle inférieure à la médiane et l'autre moitié a une durée individuelle supérieure à la médiane (Dhillon, 2002) et (Blanchard *et al.*, 2005). Le maximum des temps de maintenance, quant à lui, correspond à la durée (individuelle) maximale d'un pourcentage donné (généralement 90% ou 95%) d'activités de maintenance (Ireson *et al.* 1995). Lorsqu'il s'agit de la médiane ou du maximum des temps actifs de maintenance, l'expression varie en fonction de la distribution des durées observées comme l'indique le tableau 3.2.

Tableau 3.2 Indicateurs de durées de maintenance active(ayoub et al 2015)

Indicateur		Maintenance corrective	Maintenance préventive
Moyenne de temps actifs		$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^{N} \lambda_i \times MTTR_i}{\sum_{i=1}^{N} \lambda_i}$	$\bar{M}pt = \frac{\sum_{i=1}^{N} f_i \times Mpt_i}{\sum_{i=1}^{N} f_i}$
		Maintenance corrective et préventive $\bar{\boldsymbol{M}} = \frac{(\boldsymbol{\lambda} \times \boldsymbol{MTTR}) + (\boldsymbol{f} \times \bar{\boldsymbol{M}}\boldsymbol{pt})}{\boldsymbol{\lambda} + \boldsymbol{f}}$	
Médiane des temps actifs	**Distribution normale**	$\tilde{M}ct = MTTR$	$\tilde{M}pt = \bar{M}pt$
	Distribution Log normale	$\tilde{\boldsymbol{M}}\boldsymbol{ct} = \boldsymbol{antilog} \frac{\sum_{i=1}^{N} \boldsymbol{\lambda_i} \times \boldsymbol{LogMTTR_i}}{\sum_{i=1}^{N} \boldsymbol{\lambda_i}}$	$\tilde{\boldsymbol{M}}\boldsymbol{pt} = \boldsymbol{antilog} \frac{\sum_{i=1}^{N} \boldsymbol{f_i} \times \boldsymbol{logMpt_i}}{\sum_{i=1}^{N} \boldsymbol{f_i}}$

	Distribution Exponentielle	$\widetilde{Mct} = 0.69 \times MTTR$	$\widetilde{Mpt} = 0.69 \times \bar{M}pt$
Max des temps actifs	**Distribution normale**	$Mct_{max} = MTTR + (z \times \sigma_{MTTR})$ Z=1.28 ou1.65 pour 90% et 95%	$Mpt_{max} = \bar{M}pt + (z \times \sigma_{\bar{M}pt})$ Z=1.28 ou1.65 pour 90% et 95%
	Distribution Log normale	$Mct_{max} = antilog\left(\overline{logMTTR} + (z \times \sigma_{logMTTR})\right)$	$Mpt_{max} = antilog\left(\overline{log\bar{M}pt} + (z \times \sigma_{log\bar{M}pt})\right)$
	Distribution Exponentielle	$Mct_{max} = Z_c \times MTTR$ Z=2.312 ou3.00 pour 90% et 95%	$Mpt_{max} = Z_c \times \bar{M}pt$ Z=2.312 ou3.00 pour 90% et 95%

La moyenne des temps techniques de réparation et la moyenne des temps de maintenance préventive d'un composant *i*, respectivement $MTTR_i$ et Mct_i sont obtenues en additionnant les durées des étapes actives du processus de maintenance correspondant.

3.3.1.2 Indicateurs de fréquence des activités de maintenance,

Les indicateurs de fréquence indiquent le temps moyen qui s'écoule entre deux activités de maintenance corrective, deux activités de maintenance préventive ou bien deux activités de maintenance corrective et préventive. Les expressions correspondantes sont présentées au tableau 3.3

Tableau 3.3 Indicateurs de fréquence des activités de maintenance (ayoub et al 2015)

Indicateur	**Maintenance corrective**	**Maintenance préventive**
Temps moyen entre activités	$MTBF = \frac{1}{\lambda}$	$MTPM = \frac{1}{f}$
	$MTBM = \frac{1}{\lambda + f}$	

Dans le cas particulier d'un système série avec des taux de pannes constants, on a:

$$\boldsymbol{\lambda = \sum_i \lambda_i \; et - f = \sum_i f_i} \qquad \textbf{[3.10]}$$

Un autre indicateur de fréquence couramment utilisé est le *Temps moyen entre remplacement, MTBR.* Cet indicateur est très important pour le dimensionnement des pièces de rechange. En effet, il permet de déterminer la fréquence de remplacement des

composants, étant donné que certaines activités de maintenance corrective et préventive ne nécessitent pas de remplacement de composants.

3.3.1.3 Indicateurs de temps de main d'œuvre de maintenance

Dans cette catégorie, les indicateurs couramment rencontrés sont : le temps moyen de main d'œuvre par heure de fonctionnement, par activité de maintenance, par mission, par mois ou par an. Le premier peut être considéré comme l'indicateur principal (Blanchard *et al.,* 2005). Il permet en effet de calculer les autres indicateurs de la catégorie. Le tableau 3.4 présente les expressions pour le calcul du temps moyen de main d'œuvre par heure de fonctionnement et par activité de maintenance.

Tableau 3.4 Indicateurs de temps de main d'œuvre (ayoub et al 2015)

Indicateur	Maintenance corrective	Maintenance préventive
Temps moyen entre main d'œuvre par heure de fonctionnement	$MLHc/OH = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i \times Mct_i \times Nc_i$	$MLHp/OH = \sum_{j=1}^{M} f_j \times Mpt_j \times Np_j$
	$MLH/OH = \frac{\lambda \times (MLHc/OH) + f \times (MLHp/OH)}{\lambda + f}$	
Temps moyen entre main d'œuvre par activité	$MLHc/MA = \frac{\sum_{i=1}^{N} \lambda_i \times Mct_i \times Nc_i}{\sum_{i=1}^{N} \lambda_i}$	$MLHp/MA = \frac{\sum_{j=1}^{M} f_j \times Mpt_j \times Np_j}{\sum_{j=1}^{M} f_j}$
	$MLH/MA = \frac{\lambda \times (MLHc/MA) + f \times (MLHp/MA)}{\lambda + f}$	

3.3.1.4 Indicateurs de coût des activités de maintenance.

Les coûts de maintenance prennent en compte les éléments tels que la main d'œuvre (formation, salaire, etc.), les pièces de rechange (achat, transport, stockage, etc.), les équipements supports (amortissement, exploitation, etc.), les infrastructures (loyers, amortissement des locaux, assurances, etc.), etc. Les indicateurs permettant d'évaluer ces coûts sont similaires à ceux relatifs aux de temps de main d'œuvre. Ainsi, on a le coût moyen de maintenance par heure de fonctionnement, par activité de maintenance, par mission, par mois ou par an. Le tableau 3.5 présente les formules permettant de calculer le coût moyen de maintenance par heure de fonctionnement et par activité de maintenance. Les autres se déduisent facilement à partir de ces deux-là.

Tableau 3.5 Indicateurs de coûts de maintenance (ayoub et al., 2015)

Indicateur	Maintenance corrective	Maintenance préventive
Coût par heure de fonctionnement	$MCc/OH = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i \times MCc_i$	$MCp/OH = \sum_{j=1}^{M} f_j \times MCp_j$
	$MC/OH = \frac{\lambda \times (MCc/OH) + f \times (MCp/OH)}{\lambda + f}$	
Coût par heure d'activité	$MCc/MA = \frac{\sum_{i=1}^{N} \lambda_i \times MCc_i}{\sum_{i=1}^{N} \lambda_i}$	$MCp/MA = \frac{\sum_{j=1}^{M} f_j \times MCp_j}{\sum_{j=1}^{M} f_j}$
	$MC/MA = \frac{\lambda \times (MCc/MA) + f \times (MCp/MA)}{\lambda + f}$	

En résumé, nous avons présenté ci-dessus les indicateurs de maintenabilité utilisés en exploitation. Nous les avons regroupés en quatre familles : les indicateurs de durées des activités de maintenance, les indicateurs de fréquences des activités de maintenance, les indicateurs de temps de main d'œuvre et les indicateurs de coûts des activités de maintenance. Les tableaux 3.2 à 3.5 présentent les expressions des indicateurs de chaque famille. Ces expressions nous permettent d'identifier les paramètres à évaluer pour estimer chaque indicateur. Nous présentons dans les deux sous-sections suivantes les sources d'obtention des données qui permettent d'évaluer ces paramètres en phase d'exploitation et en phase de conception du système.

3.3.2 Obtention des données

La sous-section précédente nous a permis d'identifier les paramètres nécessaires au calcul des indicateurs de maintenabilité utilisés en exploitation. Ces paramètres sont:

- Les taux de pannes des composants, λ_i ;
- Les fréquences des activités de maintenance préventive, f_j ;
- Les moyennes des temps techniques de réparation des composants, $MTTR_i$;
- Les moyennes des temps d'exécution des activités de maintenance préventive, Mpt_j ;
- Le nombre d'opérateurs affectés à maintenance corrective de chaque composant, Nc_i
- Le nombre d'opérateurs affectés à chaque activité de maintenance préventive, Np_j.
- Les coûts de maintenance corrective des composants, MCc_i
- Les coûts des activités de maintenance préventive, MCp_j .

3.3.2.1 Sources de données en exploitation

- Principale source d'obtention des données en exploitation : l'historique de vie du système

En phase d'exploitation d'un système, les taux de pannes λ_i et les temps techniques de réparation $MTTR_i$ et de maintenance préventive Mpt_j sont estimés essentiellement à partir de l'historique de vie du système. Cet historique, s'il est bien renseigné, contient des informations sur tous les événements survenus dans la vie du système depuis son installation. Si les enregistrements sont bien effectués, l'historique de vie du système va disposer des informations telles que : les dates d'arrêts du système, les causes des arrêts, les réparations effectuées, les opérateurs ayant effectué ces réparations et les dates de remise en état de fonctionnement. L'analyse de ces informations permet de déterminer les paramètres tels que λ_i, $MTTR_i$, Mpt_j, et, dans une certaine mesure, Nc_i et Np_j.

- Sources d'obtention des fréquences des activités de maintenance préventive

Les fréquences f_j des activités de maintenance préventive sont très souvent fournies par le fabricant du système. En effet, ce dernier définit en général les activités de maintenance préventive (remplacement d'un composant, d'un lubrifiant, etc.) à exécuter sur le système, ainsi que leur fréquence d'exécution dans des conditions données de fonctionnement.

Cependant, les conditions réelles de fonctionnement du système peuvent être différentes de celles définies par le fabricant. Cela peut nécessiter un ajustement des fréquences des activités de maintenance préventive. Dans ce cas, les nouvelles valeurs des f_j peuvent aussi être déduites à partir de l'analyse de l'historique de vie du système.

- Sources d'obtention des coûts des activités de maintenance

Les coûts MCc_i et MCp_j, quant à eux, sont évalués grâce à des outils comme la comptabilité analytique ou la méthode ABC (*Activity Based Costing*). Mais, cette évaluation est assez difficile à cause de la complexité des éléments à prendre en compte : le coût des pièces de rechange (achat, transport et stockage), le coût de main d'œuvre (embauche, formation et salaire), le coût de l'outillage (acquisition, amortissement, utilisation), etc.

Donc, en dehors des coûts, les autres paramètres peuvent être obtenus, en exploitation, à partir de l'historique de vie du système, lorsqu'il existe. Cependant, ce n'est pas toujours le cas. En l'absence d'historique, par exemple au début de la phase d'exploitation d'un nouveau système, certains paramètres, notamment, λ_i, f_j, $MTTR_i$ et Mpt_j peuvent être obtenus à partir d'autres sources présentées ci-dessous. La phase de conception d'un nouveau système étant aussi une phase dans laquelle aucun historique n'est disponible, ces

sources peuvent aussi être exploitées en conception. Nous les présentons dans la sous-section suivante.

3.3.2.2 Autres sources de données pouvant être exploitées en conception

- Autres sources d'obtention des taux de pannes des composants, λ_i

En phase de conception, les composants que le concepteur intègre dans une solution peuvent être séparés en deux groupes. Le premier est constitué des composants dont des modèles identiques ou similaires ont déjà été utilisés dans d'autres systèmes existants ou ayant existé (exemple : composants standards). Le second groupe est constitué des composants nouveaux, spécifiquement conçu pour la solution générée.

Bien que l'historique de vie du système soit totalement inexistant au stade de la conception, on peut trouver des données sur les composants du premier groupe. Ces données sont issues des historiques des systèmes existants (ou ayant existé) dans lesquels ces composants ont déjà été intégré. Plusieurs collections de données de fiabilité sont disponibles dans divers secteurs d'activités. L'activité de collecte des données de fiabilité avait atteint son apogée dans les années 1980. Elle a malheureusement diminué en intensité dans les années 1990 et depuis cette période, la majorité des bases de données publiées n'a plus été mise a jour (Smith, 2005). Les bases de données disponibles peuvent être classées en trois catégories :

- Les bases de données spécifiques à une entreprise ou à un site industriel : ce sont des données collectées des équipements similaires, utilisés dans des conditions similaires par une entreprise ;
- Les bases de données spécifiques à une industrie : les données sont issues d'un secteur d'activité donné (télécommunication, nucléaire, militaire, etc.)
- Les bases de données génériques : les données proviennent de plusieurs secteurs d'activités et de plusieurs sources. Ces bases de données présentent souvent des expressions mathématiques qui sont des modèles de régression pour l'estimation des taux de panne, par exemple.

Les informations disponibles dans ces bases de données sont valables sous certaines conditions (température, environnement, etc.) quelques fois indiquées. Elles supposent généralement que les taux de pannes sont constants dans les conditions spécifiées. Le tableau 3.6 présente quelques bases de données de fiabilité et leur auteur.

Les taux de pannes des composants sont les principales informations contenues dans ces bases de données.

Tableau 3.6 Quelques bases de données de fiabilité (ayoub et al 2015)

Base de données (dernière mise jour)	**Auteur**	**Catégorie et remarques**
NRPD-5, Non-Electronic Parts Reliability Data (1995)	RIAC (Reliability Information Analysis Center), USA	- Générique (composants électromécaniques, mécaniques, hydraulique et pneumatiques) - Quelques modes de défaillances.
Handbook of Reliability Prediction for Mechanical Equipment (2007)	NSWC (Naval Surface Warfare Center), USA	- Générique (composants mécaniques) - Modes de défaillances - Expressions des taux de panne
OREDA, Offshore Reliability Data (1997)	Consortium de neuf compagnies pétrolières (BP, Elf, Agip, Shell, Total, etc.)	- Spécifique à l'industrie pétrolière - Modes de défaillances détaillés. - $MTTR_i$
TECHNIS	Technis, UK	- Générique et industrie. - Plusieurs modes de défaillances - Quelques temps de réparation
UKAEA, United Kingdom Atomic Energy Authority	SRD (System Reliability Department) of UKAEA	- Générique et industrie nucléaire - Plusieurs modes de défaillance
ANSI/IEEE500 (1991)	IEEE	- Spécifique réacteurs nucléaires - Temps de réparations
NUCLARR, Nuclear Computerized Library for Assessing Reactor Reliability	NRC (Nuclear Regulatory Commission), USA	- Spécifique réacteurs nucléaires - taux de pannes logiciels - infos sur les erreurs humaines
EIREDA European Industry	EDF, France	- Spécifique à la production

Reliability Data (1997)		d'énergie électrique (composants mécaniques et électriques)
EPRI	EPRI (Electric Power Research Institute), USA	- Spécifique à la production d'énergie électrique (turbines à gaz)
GADS (Generating Availability Data System)	NERC (North American Electric Reliability Council).	- Spécifique à la production d'énergie électrique - Données (statistiques) annuelles - Ouvert à d'autres producteurs d'électricité du monde entier depuis 2004
US Military HandBook 217 (1992)	RIAC (Reliability Information Analysis Center), USA Department of Defense	- Générique (composants électroniques). - Expressions des taux de pannes.
HRD5, Handbook of Reliability Data (1994)	British Telecom, UK	- Spécifique à l'industrie des Télécommunications
Recueil de Données de Fiabilité	CNET (Centre National d'Études des Télécommunications), France	- Spécifique à l'industrie des télécommunications. - Expressions des taux de pannes
BELLCORE5, Reliability Prediction Procedure for Electronic Equipment (1995)	BELL (compagnie téléphonique), USA	- Spécifique à l'industrie des télécommunications.
EPRD-97 Electronic Parts Reliability Data (1997)	RIAC (Reliability Information Analysis Center), USA	- Générique (composants électroniques)

Bien qu'elles soient très utiles, les bases de données présentent tout de même plusieurs inconvénients qui invitent à une prudence lors de leur utilisation (Smith, 2005) :

- Les conditions d'exploitation ne sont pas toujours spécifiées. Et quand elles le sont, l'étendue des valeurs que peut prendre le paramètre décrit est souvent assez

large;

- Certaines bases de données comptabilisent les remplacements préventifs alors que d'autres ne prennent en compte que le correctif;
- Ce qui est considéré comme défaut et enregistré dans une base de donnée peut être ignoré dans une autre base de donnée. Car, la définition d'un défaut ou d'une défaillance varie en fonction de l'utilisateur.
- Certaines bases de données contiennent des enregistrements de diagnostics effectués sur fausses alertes. Si ces enregistrements sont comptabilisés dans le calcul des taux de pannes, ceux-ci peuvent être faussement gonflés.
- Certaines bases de données précisent les modes de défaillances alors que d'autres ne les distinguent pas.

Pour les composants du second groupe (composants spécifiquement conçus pour le système en cours de développement), les λ_i peuvent être évalués : soit par similarité lorsqu'il existe des composants plus ou moins similaires appartenant au premier groupe pour lesquels les bases de données sont disponibles, soit par les approches Bayésiennes qui permettent d'estimer des paramètres en prenant en compte à la fois les connaissances des experts et les données expérimentales, soit alors par des essais virtuels dont la faisabilité a été démontrée (Zwingmann, 2005) ou par des essais accélérés. Notons que certaines bases de données du tableau 3.6 proposent des expressions permettant d'évaluer les taux de pannes de certains composants.

- Obtention des fréquences des activités de maintenance préventive, f_j

Les fréquences des activités de maintenance préventive peuvent être déduites à partir des mêmes sources que les taux de pannes. Le remplacement préventif d'un composant sera nécessaire si la durée de vie du composant est inférieure à la durée de mission de l'équipement. À partir des bases de données, on peut estimer les durées de vie des composants et donc déduire la fréquence des remplacements préventifs sur l'horizon d'exploitation du système.

- Obtention des $MTTR_i$ et Mpt_j

Les $MTTR_i$ et les Mpt_j représentent la somme des durées des étapes de la phase active de maintenance corrective et préventive, respectivement (tableau 3.1). Certaines bases de données comme OREDA fournissent les temps de réparation des composants. Il est aussi possible d'estimer la durée de chaque étape de la phase active de maintenance d'un système en phase de conception, à partir de son modèle CAO. Par exemple, l'évaluation de la durée

de démontage ou de remontage d'un composant est possible grâce, d'une part, aux algorithmes de désassemblage (Lambert, 2003) ou (Zwingmann et *al.*, 2008) et, d'autre part, à l'existence des bases de données de temps standards des actions élémentaires de maintenance (vissage, sertissage, etc). Avec ces deux éléments (algorithmes de désassemblage et temps standards des actions élémentaires de maintenance), on peut évaluer le temps de démontage d'un composant de la manière suivante : on applique l'algorithme de désassemblage au modèle CAO du système pour déterminer la séquence optimale de démontage du composant. Connaissant la structure du produit, cette séquence va permettre de déterminer les différentes liaisons à défaire pour accéder au composant. En affectant à chaque liaison le temps standard approprié, on peut estimer le temps de démontage ou de remontage du composant. Un modèle mathématique basé sur ce principe et permettant d'optimiser le temps de démontage est proposé dans (Menye et al, 2009). Les durées des autres étapes de la phase active de maintenance peuvent être estimées à l'aide de certaines des méthodes citées plus haut (approche Bayésienne, similarité, etc.).

3.3.3 Indicateurs de maintenabilité pouvant être évalués en conception

En définitive, les expressions des quatre familles d'indicateurs de maintenabilité disponibles dans la littérature font intervenir les paramètres suivants : les taux de panne (λ_i), les fréquences des activités de maintenance préventive (f_j), les moyennes des temps techniques de réparation des composants ($MTTR_i$), les moyennes des temps d'exécution des activités de maintenance préventive (Mpt_j), le nombre d'opérateurs affectés à la maintenance corrective de chaque composant (Nc_i), le nombre d'opérateurs affectés à chaque activité de maintenance préventive (Np_j), les coûts par activité de maintenance corrective (MCc_i) et les coûts par activité de maintenance préventive (MCp_j). Nous venons d'effectuer ci-dessus une analyse des sources d'obtention des données d'évaluation de ces paramètres. Cette analyse montre qu'il est possible d'estimer certains d'entre eux, notamment λ_i , f_i , $MTTR_i$ et Mpt_j , en phase de conception, grâce à diverses sources de données comme les nombreuses bases de données de fiabilité collectés par divers organismes (tableau 3.6). Les quatre paramètres λ_i , f_i , $MTTR_i$ et Mpt_j sont les seuls qui interviennent, comment le montrent le tableau 3.7, dans les expressions des indicateurs de durée et des indicateurs de fréquence des activités de maintenance. Ces deux familles sont donc celles qui peuvent être évaluées avec moins de difficultés en phase de conception. Au chapitre 4, nous choisissons l'un d'entre eux,

précisément la Moyenne des Temps Techniques de Réparation, MTTR, pour évaluer le niveau de maintenabilité d'une solution au stade de la conception. Ce choix repose sur le fait que le MTTR est le plus connu et le plus utilisé des indicateurs de maintenabilité. Il faut tout de même préciser que dans une situation contractuelle, le choix de l'indicateur peut être imposé par l'utilisateur final.

Tableau 3.7 Synthèse des paramètres dans chaque famille d'indicateurs de maintenabilité (ayoub et al 2015)

	Λ_i	f_i	$MTTR_i$	Mpt_j	Np_i	Nc_i	MCc_i	MCp_j
Durée	X	X	X	X				
Fréquence	X	X						
Main d'œuvre	X	X	X	X	X	X		
Coût	X	X					X	X

En somme, quatre familles d'indicateurs sont utilisées dans la littérature. Dans chaque famille, les indicateurs sont calculés à partir des mêmes paramètres. Nous avons montré que deux familles d'indicateurs peuvent être évaluées en conception : les indicateurs de durée et les indicateurs de fréquence des activités de maintenance. Le choix d'un ou de plusieurs indicateurs dépend de l'utilisateur final et des données disponibles pour l'évaluation. Un indicateur agrégé, combinant plusieurs autres indicateurs, peut aussi être utilisé selon le besoin.

3.4 Indicateurs de disponibilité en conception

Dans la section 3.3 précédente, nous avons analysé les indicateurs de maintenabilité pour déterminer ceux pouvant être évalués en conception. Dans cette section, nous procédons de la même manière avec les indicateurs de disponibilité. Après avoir rappelé la définition de la disponibilité, nous analysons les indicateurs de disponibilité utilisés en exploitation pour identifier ceux pouvant être évalués en conception.

3.4.1 Indicateurs de disponibilité en exploitation

La disponibilité est définie comme étant la probabilité pour que le système, utilisé dans les conditions prévues, soit en état d'accomplir une fonction requise à un instant donné (IEC 60050-191, 1990). Cette définition suppose que le système soit utilisé et maintenu dans les conditions prescrites (Ebeling, 1997). La disponibilité peut être interprétée comme étant la proportion de temps où le système est en état de fonctionnement par rapport au temps total sur un horizon donné. Elle dépend donc à la fois de la fiabilité et de la maintenabilité du système. La disponibilité peut être mesurée:

- à un instant t donné, on parle alors de *disponibilité instantanée*,

$$\boldsymbol{A(T) = (1/T) \int_0^T A(t)dt} \quad \textbf{[3.11]}$$

- dans un intervalle $[0,T]$, c'est la *disponibilité moyenne dans l'intervalle* $[0,T]$,

La disponibilité moyenne peut être généralisée sur un intervalle de temps $[t_1,t_2]$, représentant par exemple une mission. On parle alors de *disponibilité de mission*

$$\boldsymbol{A_{t_2-t_1} = \frac{1}{t_2-t_1} \int_{t_1}^{t_2} A(t)dt} \quad \textbf{[3.12]}$$

- sur, un horizon infini, c'est la *disponibilité en régime permanent*, A

$$\boldsymbol{A = \lim_{T-\infty} A(T)} \quad \textbf{[3.13]}$$

En exploitation, il existe trois types de disponibilité en régime permanent qui dépendent de ce qu'on inclut dans les définitions du temps de bon fonctionnement et du temps d'arrêt (Ireson, 2002), (Dhillon, 2002), (Ebeling, 1997). Ces disponibilités sont présentées ci-dessous.

3.4.1.1 Disponibilité stationnaire ou Up Time Ratio UTR

UTR représente la disponibilité du système dans un environnement idéal où les ressources requises (compétences humaines, outillage, pièces de rechange, documentation, etc.) sont disponibles. Le calcul de UTR est effectué selon l'expression (3.4). Cette expression prend en compte uniquement les temps d'arrêt dus à la maintenance corrective. Les arrêts dus à la maintenance préventive, les temps logistiques et les temps administratifs ne sont pas considérés.

$$\boldsymbol{UTR = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR}} \quad \textbf{[3.14]}$$

3.4.1.2 Disponibilité inhérente, A_a

La disponibilité inhérente prend en compte les temps d'arrêt dus à l'exécution des tâches de maintenance corrective et préventive. Elle est calculée selon l'expression (3.5). Les temps administratifs et logistiques ne sont pas pris en compte.

$$\boldsymbol{A_0 = \frac{MTBM}{MTBM+M}} \quad \textbf{[3.15]}$$

Où $MTBM$ et $\overline{M}$ représentent respectivement la moyenne des temps de fonctionnement entre les actions de maintenance préventive et corrective (tableau 3.3) et la moyenne combinée des temps actifs de maintenance corrective et préventive (tableau 3.2).

3.4.1.3 Disponibilité opérationnelle, A_o

La disponibilité opérationnelle, traduite par l'expression [3.8], prend en compte la réalité de l'environnement en intégrant, dans son expression, le temps d'arrêt total du système. Le temps d'arrêt total prend en compte les temps d'arrêt dus à l'exécution des tâches de maintenance préventive et corrective, les temps d'attentes (temps morts) dus aux opérations logistiques et les temps d'attente dus aux formalités administratives.

$$\boldsymbol{A_0 = \frac{MTBM}{MTBM+MDT}} \qquad \textbf{[3.16]}$$

Avec : *MDT* : *Mean DownTime* (Moyenne des temps d'arrêt du système).

$$\boldsymbol{MDT = \bar{M} + \overline{LDT} + \overline{ADT}} \qquad \textbf{[3.17]}$$

$\overline{LDT}$: *Logistics Delay Time* (Moyenne des Temps logistiques)

$\overline{ADT}$: *Administrative Delay Time* (Moyenne des Temps administratifs)

Le tableau 3.8 présente les expressions des temps morts logistiques et administratifs pour les activités de maintenance corrective et préventive.

Les expressions de ces trois indicateurs font intervenir les termes *MTBF*, *MTTR*, *MTBM*, $\bar{M}$ ou *MDT*. En se référant aux tableaux 3.2, 3.3 et 3.8, on identifie les paramètres intervenant dans ces termes. Dans la sous-section suivante, nous analysons les sources d'obtention des données permettant d'estimer ces paramètres en vue de déterminer celles pouvant être exploitées en conception.

Tableau 3.8 Expressions des temps logistiques et administratifs

Indicateur	Maintenance corrective	Maintenance préventive
Moyenne des temps logistiques	$\overline{LDT}c = \frac{\sum_{i=1}^{N} \lambda_i \times LDTc_i}{\sum_{i=1}^{N} \lambda_i}$	$\overline{LDT}p = \frac{\sum_{j=1}^{M} f_i \times LDTp_j}{\sum_{j=1}^{M} f_j}$
	$\overline{LDT} = \frac{\lambda \times (\overline{LDT}c) + f \times (\overline{LDT}p)}{\lambda + f}$	
Moyenne des temps administratifs	$\overline{ADT}c = \frac{\sum_{i=1}^{N} \lambda_i \times ADTc_i}{\sum_{i=1}^{N} \lambda_i}$	$\overline{ADT}p = \frac{\sum_{j=1}^{M} f_j \times ADTp_j}{\sum_{j=1}^{M} f_j}$
	$\overline{ADT} = \frac{\lambda \times (\overline{ADT}c) + f \times (\overline{ADT}p)}{\lambda + f}$	

3.4.2 Sources d'obtention des données

Les expressions des indicateurs de disponibilité présentés ci-dessus font intervenir les paramètres suivants :

- Les taux de pannes des composants, λ_i ;
- Les fréquences des activités de maintenance préventive, f_j ;
- Les moyennes des temps techniques de réparation des composants, $MTTR_i$;
- Les moyennes des temps d'exécution des activités de maintenance préventive, Mpt_j;
- Les Temps logistiques pour la maintenance corrective des composants, $LDTc_i$
- Les Temps logistiques pour les activités de maintenance préventive, $LDTp_j$
- Les Temps administratifs pour la maintenance corrective des composants, $ADTc_i$
- Les Temps administratifs pour les activités de maintenance préventive, $ADTp_j$

Les sources d'obtention des λ_i , f_i , $MTTR_i$ et Mpt_j ont déjà été présentées dans la sous-section 3.2. Il en résulte qu'en exploitation, ces paramètres sont essentiellement estimés à partir de l'historique de vie du système. Cependant, lorsque l'historique n'est pas disponible, comme c'est le cas en conception, il existe d'autres sources d'obtention des données permettant de les évaluer. Ces quatre paramètres peuvent donc être évalués en conception. Il ne reste donc plus qu'à identifier les sources de données permettant d'évaluer les temps logistiques $LDTc_i$ et $LDTp_j$ et les temps administratifs $ADTc_i$ et $ADTp_j$.

Les temps logistiques représentent la durée requise pour préparer toute la logistique nécessaire à l'exécution d'une activité de maintenance (préparation de l'outillage, approvisionnement en pièces de rechange, préparation de la documentation requise, etc.). Les temps logistiques varient en fonction de la disponibilité des pièces de rechange, de l'éloignement des fournisseurs de pièces de rechange, de l'éloignement du site d'intervention, de la disponibilité des opérateurs, de la disponible et de la qualité de la documentation, etc. Les temps administratifs quant à eux représentent la durée requise pour les formalités administratives préalables à toute intervention (émission des bons de travail, autorisation de sortie des pièces de rechange, etc.). Les temps administratifs dépendent des procédures administratives mises en place par l'utilisateur du système. En définitive, les temps logistiques et les temps administratifs dépendent beaucoup du contexte d'exploitation du système. De ce fait, il serait très difficile de les évaluer en conception.

3.4.3 Indicateurs de disponibilité pouvant être évalués en conception

Dans les sous-sections précédentes, nous avons, d'une part, identifié les paramètres figurant dans les expressions des indicateurs de disponibilité : λ_i , f_i , $MTTR_i$, Mpt_j , $ADTc_i$, $ADTp_j$, $LDTc_i$ et $LDTp_j$ (tableau 3 . 9). D'autre part, nous avons analysé les sources d'obtention des données permettant d'estimer ces paramètres. Il ressort de cette analyse que, seuls, les paramètres λ_i ,f_i , $MTTR_i$ et Mpt_j peuvent être évalués en conception. Le tableau 3.9 montre que la disponibilité stationnaire, *UTR* (*Up Time Ratio*) et la disponibilité inhérente A_a ne dépendent que d'une partie ou de l'ensemble de ces quatre paramètres. Par conséquent, ces deux indicateurs de disponibilité peuvent être évalués en conception.

Tableau 3.9 Paramètres d'indicateurs de disponibilité (ayoub et al 2015)

	λ_i	f_i	$MTTR_i$	Mpt_j	$ADTc_i$	$ADTp_j$	$LDTc_i$	$LDTp_j$
UTR	X		X					
A_a	X	X	X	X				
A_o	X	X	X	X	X	X	X	X

L'indicateur *UTR* ne prend en compte que la maintenance corrective alors que l'indicateur A_a prend en compte la maintenance corrective et la maintenance préventive. Nous nous intéressons particulièrement à la maintenance corrective. Par conséquent, pour l'évaluation de la disponibilité en conception, nous considérons comme indicateur de disponibilité le *Up Time Ratio, UTR*.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons analysé les indicateurs de maintenabilité et de disponibilité utilisés en exploitation afin de déterminer ceux pouvant être évalués en conception. Cette analyse nous a permis de conclure que les indicateurs de durée des activités de maintenance et les indicateurs de fréquence des activités de maintenance pouvaient être utilisés en conception pour évaluer la maintenabilité d'un système. Concernant la disponibilité, la même démarche a été appliquée. Il en ressort que deux des trois principaux indicateurs de disponibilité utilisés en exploitation peuvent être évalués en conception. Il s'agit de la disponibilité inhérente et de la disponibilité stationnaire ou le *Up Time Ratio*, *UTR*.

Il nous reste donc de prendre en considération la sécurité dans la phase de conception. Ça sera l'objet de prochain chapitre.

Chapitre 4 Sécurité en conception

4.1 Introduction

Ce que l'on vise, en matière de sécurité industrielle, c'est l'absence des événements aux conséquences potentielles jugées inacceptables. Cependant, cette absence n'est jamais gagnée une fois pour toutes. La sécurité est « un non-événement dynamique ». Un système n'acquiert une certaine sécurité que par le travail initial de ceux qui le conçoivent et le travail quotidien de nombreux acteurs qui visent à éviter l'événement non souhaitable, à en limiter les conséquences, et à en tirer les leçons s'il survient. Comme le système, au fil du temps, subit des évolutions internes et externes, la sécurité suppose aussi un travail périodique de reconsidération des hypothèses précédentes, et de réajustement.

Les industries sont confrontées à des dangers : phénomènes physicochimiques qui peuvent diverger, énergie cinétique d'un train, haute tension électrique. Ces dangers entraînent des risques, c'est-à-dire la possibilité de dommages aux personnes, à l'environnement et aux biens matériels. La sécurité industrielle consiste à prévenir des événements dont la gravité pourrait être élevée, même si leur probabilité a priori est faible.

Tout système industriel se caractérise par une migration naturelle vers des frontières de performance et de sécurité acceptables, depuis la conception et ce, jusqu'à l'exploitation. L'accident survient lorsque les seuils de tolérance du système sont dépassés, la dérive devenant alors irréversible (Amalberti, 2001 ; Fadier, De la Garza, Didelot, 2003 ; Neboit, 2003).

L'intégration de la sécurité lors de la conception des systèmes complexes implique de prendre en compte les opérateurs, les biens et l'environnement, dès le départ du processus de conception, non comme variable d'ajustement, mais comme un élément central dans ce processus de conception. Les erreurs de conception dans ce domaine peuvent en effet être détectées uniquement après l'accident, et les modifications du système technique coûteront éventuellement très chers. En outre, s'il est le plus souvent possible de modifier des spécifications de sous-ensembles techniques, en augmentant les fonctionnalités disponibles, les algorithmes de traitement de l'information ou la présentation, il n'en va pas de même chez l'homme. On peut, par l'apprentissage et l'entraînement l'aider à acquérir et maintenir des compétences, mais cette capacité spectaculaire de modification des compétences ne doit pas

en masquer les limites importantes que, précisément, montrent de nombreux accidents. On ne peut pas apprendre à maintenir sur de longues périodes une vigilance constante à son plus haut niveau, à conserver son attention focalisée sur une tâche monotone, ni à raisonner de manière infaillible sur des données numériques présentées de façon inadéquate.

Ce chapitre a pour finalité de faire comprendre ce qu'est la sécurité, son analyse et son évaluation lors de la conception et les moyens d'y parvenir. Dans un premier temps, nous montrons comment aujourd'hui les risques sont analysés et évalués. Dans un deuxième temps, nous expliquons la sécurité vue par les méthodes de sûreté de fonctionnement.

Ces méthodes considèrent la sécurité comme l'amélioration de la fiabilité des composants des systèmes. Après nous détaillons, les modes de prises en compte de l'humain dans l'évaluation des risques. Les moyens actuels dont le concepteur dispose pour améliorer la sécurité vont être exposés. Ces moyens consistent la mise en place de barrières de sécurité. L'analyse des effets de ces barrières, en mode virtuel, sera expliquée. Par la suite nous développons le concept de prise en compte de la sécurité dans les approches de conception des produits. Finalement nous exposerons notre démarche pour intégrer la sécurité au processus de conception en se basant sur les quatre phases de conception décrit par (Pahl&Beitz 2007).

4.2 Sécurité et conception

Le processus de conception des systèmes de productions et des produits est de plus en plus rapide, et implique de fournir au client, exploitant industriel ou consommateur, un système fiable, qu'il puisse s'approprier rapidement, facile à exploiter et à maintenir. Compte tenu de l'obsolescence rapide des techniques et des produits, il n'est plus possible de passer des mois ou des années à apprendre à démarrer un atelier et le piloter pour obtenir la productivité et la qualité visée ou faire disparaître les risques pour les opérateurs. La sécurité ne peut donc plus, comme par le passé, être le résultat de la capitalisation des expériences malheureuses, lorsqu'on "renforçait" le système aux points dangereux, à la suite d'accidents, par des protections (quelquefois faisant obstacle à la production), des effectifs plus nombreux ou de simples consignes de sécurité : il faut proposer un système à la fois sans danger et fiable, et ceci "du premier coup".

L'ingénierie simultanée vise à faire face à ces contraintes, en utilisant les nouvelles technologies de circulation et de partage des informations, en quasi-temps réel, pour des équipes et des métiers différents, quelquefois géographiquement dispersées. Elle pose aussi de

nouvelles questions, du fait même du raccourcissement des délais de réflexion et de la diminution de l'inertie des systèmes (J. Rasmussen, 1988).

Pour la sécurité, les nouvelles techniques de modélisation et de simulation permettent de calculer et de vérifier de nombreuses hypothèses à coût réduit, par rapport au développement réel et de nombreux défauts de sécurité sont repérés et corrigés dès cette phase de conception. Les difficultés qui demeurent sont les "détails" mais qui peuvent s'avérer catastrophiques dans des états particuliers du système, rares, et qui ne peuvent pas être repérés lorsque la prise en compte du Facteur Humain est faite de façon empirique.

4.3 Comment prendre en compte la sécurité dès la conception ?

Il ne s'agit pas de dire que la sécurité ne doit pas être une préoccupation en exploitation, mais la fiabilité d'un système anthropo-technique est déterminée en grande partie lors de la conception, et ne pourra généralement plus être améliorée radicalement après mise en exploitation sans de nouveaux investissements : les marges de manœuvres seront étroites, entre les difficultés techniques, économiques et réglementaires (certification). On pourra agir sur la formation des opérateurs : mais les limites humaines peuvent dans certains domaines être rapidement atteintes (par exemple si les variables à maîtriser en instantané sont nombreuses en interactions non linéaires, si les situations successives se ressemblent par leurs traits de surface en étant différentes en réalité, si l'on doit toujours réagir en urgence) ; dans de nombreux cas, la formation n'apportera pas de gain perceptible (vigilance, mémoire). On pourra agir aussi sur l'organisation du travail ; les marges de manœuvres sont parfois considérables, mais avec des coûts très variables d'un cas à l'autre. Les interfaces Homme-Machine, lorsqu'elles sont informatisées, donnent de nouvelles marges de manœuvre intéressantes ; dans ce cas, il faut compter avec la difficulté à changer des habitudes les procédures peuvent être changées, mais on risque là aussi de mettre en difficulté des opérateurs qui avaient fait un effort conscient ou non de mémorisation de procédures qui vont devenir obsolètes.

En exploitation, éviter les dérives dans l'exécution des procédures et la répartition des tâches, lutter contre les habitudes, veiller à conserver le niveau de compétence pour faire face aux situations accidentelles jamais vues dans la réalité constituent des tâches suffisamment redoutables pour que l'on s'efforce, dès la conception, de prendre en compte la sécurité.

4.4 Etat de l'art et définitions sur la sécurité

La revue de la littérature sur l'intégration la sécurité de dans le processus de conception du système de production montre que l'on peut regrouper les travaux de recherche dans deux classes principales. Le premier concerne l'amélioration de la conception de point de vue ergonomique. Le concepteur adopte une approche anthropocentrique (Hale et al 2007). Il essaie de réaliser un système adapté à l'homme afin de soulager la charge de travail physique ou cognitive (W. Karwowski et al 98).

La seconde classe de travaux concerne l'intégration de la sécurité au stade de la conception pour éliminer les risques qui menacent le système (homme, machines, environnement) (R. Hasan et al 2003) (R. Houssin et al 2006).

Intégration de la sécurité dans le processus de conception est plutôt considérée comme une contrainte et réalisé dans la dernière phase de la conception à respecter les directives européennes 98/37 / ED et le nouveau 2006/42 / CE applicable après Décembre 2009 (Directive 98)(Directive 2006). Cependant, l'application de normes demeure volontaire; et les concepteurs et les fabricants sont libres de choisir toute solution technique garantissant la conformité avec les exigences de la directive (C.A. Cordero 2009).

Les mesures de sécurité, qui sont déduites de cette classe, souvent, augmentent la charge de travail ou des procédures pèsent sur l'exploitation du système. Pour résoudre les problèmes de sécurité, le concepteur propose souvent des obstacles matériels et / ou logiciels de restreindre l'utilisation (Freija van 2007), ce qui provoque des problèmes de productivité. Rausand et Utne (Rausand et al 2009) proposent un modèle pour améliorer la sécurité de la performance produit par l'approche systémique en utilisant un modèle de cycle de vie du produit. Ce modèle se compose de huit étapes selon trois niveaux (entreprise, produits et de composants) et trois étapes (pré-développement, développement et post-développement). Ils ont noté que l'intégration de la sécurité provoque un problème de productivité qui conduit les utilisateurs à neutraliser les équipements de sécurité.

Néanmoins, le fait que la sécurité entraîne un coût supplémentaire peut évoluer si l'on utilise des méthodes efficaces permettant surmontant contradiction entre la productivité et la sécurité. Par conséquent, une contradiction, ce qui correspond à des exigences opposées (coût minimum, des gains immédiats, et le risque potentiel) que le concepteur doit faire face, apparaît. D'un côté, l'analyse des situations de travail réelles nous a montré qu'il ya une différence entre la situation définie par le concepteur de travail et qui ont vraiment vécu par

l'utilisateur (E. Fadier 98). De l'autre côté, les réponses proposées par les normes et les règles semblent incomplets car pour un contrôle efficace des risques (A. Didelo 2000) pour les systèmes évolution permanente. Hasan et al. (Hasan et al 2003) a expliqué clairement le problème de l'intégration de la sécurité dans les processus de conception et présenté un bon état de l'art. Il a proposé un modèle de situation de travail à prendre en compte de manière systématique tous les paramètres liés à l'utilisation du système. Kjelle'n (U. Kjelle'n 2007) analyse l'intégration de la sécurité dans la conception processus appliqué en Norvège industrie offshore à partir de perspectives de remorquage de «centrée sur l'homme " et " barrière d'énergie ". Utilisation premier, il se concentre sur la conception des lieux de travail afin de permettre à l'utilisateur de fonctionner dans une façon optimale pour minimiser les erreurs humaines et d'atténuer les perturbations.

Ensuite, il a utilisé le «point de vue " de barrière d'énergie 'pour fournir des fonctions techniques de sécurité sur la plate-forme qui interviennent dans le chemin de l'accident pour minimiser les pertes. Coulibaly considère la sécurité comme une fonction qui doit être définie à l'étape de spécification fonctionnelle. Coulibaly assure que la conception des équipements et des machines ne peut plus être séparée de la notion de sécurité et il a conduit à la définition des critères, qui sont liés à l'utilisation de l'équipement et doivent être prises en compte lors de leur conception. Il a proposé deux indicateurs pour évaluer la sécurité des produits de l'utilisateur et la maintenabilité du produit au stade de la conception. Indicateur de sécurité présente le niveau de sécurité pour les solutions techniques choisies pour remplir la fonction du produit. Indicateur de maintenabilité tente de déterminée la cible optimale pour supprimer un composant de produit. Cela signifie que, à la diminution du temps d'intervention de l'utilisateur et ainsi augmenter la productivité. En réalité, de nombreux travaux prouvent que l'accident se produit souvent lors de l'entretien (Vatn et al 2010). Houssin (Houssin et al 2009) propose un logiciel pour aider concepteur d'intégrer la sécurité lors de la conception. Il est dommage qu'il n'a pas proposé d'intégrer ce logiciel dans le système de CAO existants. Ailleurs, concepteur voir ce logiciel comme une charge de travail supplémentaire.

- ***Définitions***

La sécurité est définie comme l'absence d'un effet indésirable. la norme (EN 292 – 1, 1991) sur la sécurité des machines donne cette définition : Aptitude d'une machine à accomplir sa fonction, à être transportée, installée, mise au point, entretenue, démontée et mise au rebut dans les conditions d'utilisation normales spécifiées dans la notice d'instructions, sans causer de lésions ou d'atteinte à la santé. La sécurité peut également

s'exprimer sous forme d'une probabilité : probabilité que le système évite de faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques (Villemeur, 1988). Si on considère que les défaillances d'un système se partagent en deux catégories, celles qui sont dangereuses et celles qui ne le sont pas, la sécurité peut être considérée comme la part de la fiabilité relative aux défaillances dangereuses.

En d'autres termes, la sécurité est l'état dans lequel le risque de dommages corporels ou matériels est limité à un risque acceptable.

On peut aussi définir la sécurité comme l'ensemble des "mesures de prévention et de réaction mises en œuvre pour faire face à une situation d'exposition résultant de risques accidentels, qu'ils soient le fait de l'homme, de la machine ou de la nature" (GEI et al. 98).

D'après ces définitions La notion de sécurité est toujours liée avec celle de risque. Dans le paragraphe suivant nous allons définir la notion de risque, l'identification des risques et leurs méthodes d'évaluation

4.5 Analyse et évaluation des Risque

Le risque est défini comme la possibilité qu'un effet indésirable puisse se produire (Hollnagel, 2008a), selon Alain Villemeur le risque est la Mesure d'un danger associant une mesure de l'occurrence d'un événement indésirable et une mesure de ses effets ou conséquences (Villemeur 1998).

Cependant il existe des définitions légèrement plus complexes que celle d'Alain Villemeur dans lesquelles apparaît une troisième dimension : l'acceptabilité du risque, seuil en dessous duquel on accepte l'existence du danger bien que sa gravité et sa probabilité d'occurrence ne soient pas nulles. C'est par exemple la définition de P.Périlhon : "le risque est la mesure du niveau de danger : le risque est une grandeur à trois dimensions au minimum associée à une phase précise du système et caractérisant un événement non souhaité par sa probabilité d'occurrence, sa gravité et son acceptabilité (EDF 1998). Cependant la notion d'acceptabilité laisse en suspend plusieurs questions. Est-ce une grandeur de mesure du risque ? Peut-on considérer que l'acceptabilité d'un risque en change la nature ?

Enfin, nous verrons par la suite que cette définition du risque, faisant appel aux notions de gravité et de probabilité, n'est pas sans poser de problèmes. Ces deux notions sont, en particulier, très mal prises en compte au niveau de la législation qui utilise plutôt le concept de danger. Ceci se traduit notamment par des difficultés pour la définition des objectifs de l'analyse des risques.

4.5.1 Les mécanismes simplifiés du risque

Sans rentrer dans le vocabulaire et le formalisme du risque proposés par chaque méthode explicitée ci-après, nous allons définir succinctement ce qui amène à envisager l'existence d'un risque et la potentialité de production d'un accident dans certaines conditions, dans une entreprise. Ces notions nous permettront de pouvoir avancer des critères de comparaison des différentes méthodes existantes d'analyse des risques.

Le risque est un accident potentiel qui pourra se transformer en accident réel dans certaines conditions à définir pour chaque risque. Cet accident aura des causes susceptibles d'être de natures différentes (matériel défectueux, erreur humaine, réglementation non respectée,…) et pourra occasionner des dommages à une "victime" elle aussi pouvant être de nature variée (homme, poissons, machines,…). Cette représentation intuitive nous permet alors d'étudier les différentes victimes (et leurs natures) et les différentes causes (et leurs natures) que l'on peut rencontrer. Ces éléments vont permettre d'établir certains des critères utilisés pour le choix d'une méthode "test" d'analyse des risques.

4.5.2 Identification du risque

L'identification du risque consiste à identifier les phénomènes dangereux. Ces derniers sont ou bien présents en permanence pendant l'utilisation normale de la machine ou peuvent apparaître de manière inattendue.

L'identification du risque lié à la conception d'une machine nécessite d'abord, une description du fonctionnement du système étudié. Cette description doit tenir compte, pour chaque phase du cycle de vie, des conditions d'utilisation, des limitations dans l'espace et dans le temps. Les conditions d'utilisation décrivent d'abord, les différents modes de fonctionnement et les procédures d'intervention des utilisateurs. Ces limites doivent différencier la typologie des utilisateurs (suivant le sexe, l'âge, les capacités physiques…) et ainsi les niveaux attendus de formation, d'expérience et d'aptitude des utilisateurs doivent également être considérés. Enfin, il convient de tenir compte de la possibilité d'exposition d'autres personnes que l'utilisateur. La limite dans l'espace prend compte des amplitudes des mouvements requis et des postures; des exigences anthropométriques des utilisateurs et de l'interaction "homme-machine" (ISO, 2007). La limite dans le temps correspond à la durée de vie du système et de ses composants et des fréquences d'entretien recommandées. (Gemeraoui 2013).

4.5.3 Analyse Evaluation des risques

L'analyse des risques consiste à les identifier et à comprendre les mécanismes conduisant à leur concrétisation dans le but de réduire leur probabilité d'occurrence et/ ou leur gravité. Cette étude doit aboutir à la mise en place de mesures permettant de réduire leur apparition ou leurs conséquences sur l'homme au travail, les matériels de production, les produits, les populations extérieures à notre domaine d'étude ainsi que les écosystèmes pour tendre le plus possible à une maîtrise des risques. (Perilhon 1998).

Dans les paragraphes qui suivent, nous proposons de décrire les courants méthodologiques d'analyse des risques existants.

4.5.3.1 Méthodes du type "Audit"

Les méthodes "d'audit" constituent les pratiques les plus anciennes de diagnostic a priori des risques. Leur objet est clair : il s'agit de repérer, dans une situation de travail existante, des manques, des anomalies ou des insuffisances concernant en particulier les dispositifs techniques des installations ou des modes opératoires par rapport aux dispositions réglementaires ou aux règles de l'art.

Elles consistent donc à observer un écart par rapport à un référentiel préalablement défini. Pour certaines, le risque est équivalent à un défaut d'application de la réglementation susceptible de provoquer, souvent très directement, un accident. Dans ce cas, la notion de risque est souvent très proche de celle de "danger", le danger étant ce qui s'avère (dans ce cas) par nature incompatible avec une présence humaine, de telle sorte que le dommage naîtra nécessairement de sa rencontre avec l'homme.

Ces méthodes se matérialisent par une check-list ou un questionnaire. Le référentiel qui lui est adjoint est quant à lui issu de pré-analyses dans lesquelles on a identifié des conjonctions particulières entre un homme et un objet (machines, moyens techniques) provoquant dans un grand nombre de cas des blessures. Ce référentiel peut être la réglementation, mais certains cabinets d'audit développent leur propre référentiel enrichissant la réglementation.

Selon cette logique, le souci d'améliorer la prévention conduit à renouveler et à développer les aspects réglementés.

Ces méthodes ont confirmé leur efficacité par la rareté observée des accidents uniquement matériels (lorsque la réglementation est respectée) (INRS 1990-1). Mais elles montrent, selon les experts, une efficacité maximale dans deux cas extrêmes où il faut :

- baisser rapidement un niveau de risque trop élevé dans des situations de travail très précaires.

- maintenir un niveau de risque faible en évitant les dérives dans l'application des procédures et l'utilisation du matériel par exemple. On peut alors à partir de ces constats mieux cibler les programmes de formations dites d'entretien ou "piqûres de rappel". Mais leur efficacité est moindre dans les situations intermédiaires à ces deux cas. (INRS 1990-1)

Pour résumer, on peut penser que les méthodes d'audit sont plutôt destinées aux entreprises à hauts risques ou fortement automatisées. Dans les autres entreprises l'utilisation en tant qu'indicateurs de suivi reste possible, mais pour ces dernières, les accidents sont principalement dus à des conditions épisodiques où l'observation de la réglementation se révèle insuffisante. La complexité d'une installation est aussi l'un des paramètres influençant négativement les résultats, la prise en compte des risques non listés étant impossible.

4.5.3.2 Méthodes du type "ergonomie"

Une autre approche consiste à s'intéresser à l'analyse des conditions de travail. Cette vision du risque consiste à considérer l'homme comme élément fondamental. Le risque devient le symptôme de dysfonctionnements dans l'entreprise (conditions de travail, absence de marge de manœuvre, systèmes de contraintes organisationnelles,…). Nous proposons de décrire deux méthodes issues de ce courant, la première proche des méthodes d'audit mais pour laquelle les éléments et écarts à détecter sont à composantes principalement humaines et applicables dans le champ du poste de travail, la deuxième quant à elle est plus large, sans référentiel et basée sur l'inadéquation du couple homme-machine

- Analyses des risques en termes de conditions dangereuses et d'actions dangereuses

Dans cette méthode proche d'une démarche d'audit, l'accident découle d'actions dangereuses qui peuvent elles-mêmes provenir, soit d'une condition dangereuse, soit d'une déficience humaine. Cette vision du risque établit une distinction entre le domaine technique et le domaine humain. La mise en pratique de cette méthode passe souvent par des outils de type check-list.

- Approche ergonomique du système homme - machine

Dans les méthodes ergonomiques actuelles, l'accident est considéré comme la conséquence de l'inadaptation du couple homme - machine. L'adaptation de l'homme à la machine pouvant

se traduire par le fait que ce couple assure une fonction requise sans nuire à l'une ou l'autre de ses composantes :

- humaines : absence de fatigue, de stress, d'accidents corporels,…
- techniques : absence d'incidents, de pannes, de casse,…

On ne considérera pas ici l'événement dangereux comme la résultante d'un simple écart entre l'action prescrite et l'action réelle. Le fait de prendre en compte toutes les inadaptations possibles entre l'homme et la machine fait que la sécurité n'est qu'un des objectifs de l'approche ergonomique. Cela comprend la prise en compte des aspects techniques, organisationnels, des facteurs d'ambiance, etc… considérés comme facteurs accidentogènes. On utilise toutefois dans l'industrie des outils plus précis pour optimiser le rapport amélioration / coût (des analyses standardisées pour des postes de travail évoluant peu, des guides construits par des institutions spécialistes des conditions de travail, des groupes de travail, des grilles d'analyse pour sélectionner les postes à problèmes, etc.) [INRS 1990-1] :

Ces méthodes ont l'avantage de ne pas restreindre l'accident à des composantes techniques, cependant leur vision très large de l'accident est difficile à mettre en œuvre dans un temps réduit pour une installation complexe comme une entreprise prise dans sa totalité, (c'est pour cela que des outils basés sur des check-list ou grilles d'évaluation par exemple ont été développés afin de réduire le temps de mise en œuvre).

4.5.3.3 Méthodes du type "sûreté de fonctionnement"

Les méthodes du type "sûreté de fonctionnement", regroupées également sous la dénomination "sécurité des systèmes" font partie des approches à dominante technique du risque industriel, mais elles peuvent dans certains cas intégrer le facteur humain. Ces méthodes utilisent en principe pour la définition du risque les notions de gravité et de probabilité d'apparition d'un événement indésirable.

Nous décrirons dans la suite les principales méthodes de la sûreté de fonctionnement

4.6 Méthodes principales du courant de la sûreté de fonctionnement

4.6.1 Analyse préliminaire des risques (APR)

L'APR a pour objet d'identifier les risques d'un système et par la suite de définir des règles de conception et des procédures afin de maîtriser les situations dangereuses. Elle intervient le plus efficacement au stade de la conception et doit être remise à jour dès

qu'un nouveau matériel est ajouté mais aussi lors du développement et de l'exploitation. Pour déceler les risques et leurs causes, on recherche (Lievens 1976):

- les éléments pouvant être dangereux,
- ce qui transforme les éléments dangereux en situations dangereuses
- les situations dangereuses
- les éléments transformant ces situations en accidents potentiels
- les accidents potentiels et leurs conséquences en terme de gravité.

Ensuite on cherche des mesures préventives comme des règles de conception ou des procédures afin d'éliminer ou de maîtriser les situations dangereuses et les accidents potentiels mis en évidence. On doit aussi vérifier que les mesures sont efficaces. On peut schématiser l'APR par son modèle d'accident. Pour la mettre en œuvre, et représenter les résultats, on se servira d'un tableau ou d'un arbre logique.

L'identification des risques est effectuée à l'aide des données issues d'un retour d'expérience, du jugement des experts et de l'analyse de l'environnement aidés par l'utilisation de check-lists élaborées pour un domaine précis et régulièrement enrichies. Enfin, des actions correctives sont proposées, afin d'anticiper les risques (Lievens 1976 et Villemeur 1988). Les résultats de cette analyse sont capitalisés dans un tableau à 11 colonnes regroupant les informations suivantes (Tableau 4.1):

Tableau 4.1 Grille d'analyse pour l'APR

1 Système ou fonction	2 Phase	3 Entités dangereuses	4 Evénements causant une situation dangereuse	5 Situation dangereuse	6 Evénement causant un accident potentiel	7 Accident potentiel	8 Effet ou conséquences	9 Classification par gravité	10 Mesures préventives	11 Application de ces mesures

4.6.2 Analyse des modes de défaillance et de leurs effets

La méthode d'Analyse par Mode de Défaillances et de leurs Effets (AMDE) est utilisée pour l'étude systématique des causes et des effets des défaillances qui peuvent affecter les composants de ce système.

On emploie cette méthode a priori en exploitation mais surtout en phase de conception. Cette AMDE ou FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) consiste à identifier les modes de défaillance et chercher leurs causes et leurs effets qui affecteraient les composants du système étudié. Plus généralement on emploie l'AMDE pour identifier les modes de défaillance ayant d'importants effets sur la fiabilité, la maintenabilité, ou la sécurité du système.

Tableau 4.2 Exemple de la présentation d'une AMDE ou d'une AMDEC [Lievens 1976]

1	2	3	4	5 6		7	8	9	10
Identification du composant	Mode de défaillance	Causes possibles	Phases	Conséquences		Probabilité de la défaillance	Criticité	Actions correctives	Recommandation applications
				Locales	Sur l'ensemble du système				

L'AMDE peut utiliser le Tableau 4.2 pour être menée à bien. Ce tableau que l'on commence à remplir par la colonne de gauche, permet de décrire le fonctionnement de l'AMDE. On définit le système en déterminant ses principales fonctions, ses limites fonctionnelles et celles de ses composants. On s'intéresse ensuite aux spécifications relatives au fonctionnement, aux composants de ce système et à l'environnement de ce système. Le repérage des phases de vie les plus critiques se fait à ce moment là, par le biais d'une APR par exemple. La deuxième étape est l'établissement des modes de défaillance du système. On recense pour chacun des composants, dans une phase de vie donnée, ses modes de défaillance qui se définissent par l'effet par lequel une défaillance de ce composant est observée. Cette étape peut être facilitée par l'utilisation de check-list de modes génériques de défaillance (fonctionnement intempestif ou prématuré, non fonctionnement au moment prévu, non arrêt au moment prévu,…). On examinera ensuite les effets de ces modes sur les fonctions du système ainsi que sur chacun des composants. On peut étendre cette AMDE en s'intéressant à la probabilité et à la criticité des effets, on fait alors une AMDEC (Analyse des modes de défaillance, leurs effets et de leur criticité). On construit, dans ce cas, une grille de criticité (figure 4.1)

Probabilité Gravité	Très faible	Faible	moyenne	Forte
Effets mineurs				
Effets significatifs				
Effets critiques				
Effets catastrophiques				

Figure 4.1 Matrice de criticité réalisée dans le cadre d'une AMDEC

Zone de criticité

L'évaluation de la probabilité et de la criticité des événements redoutés permet de les comparer. Si on veut connaître les risques inhérents à l'activité d'un ensemble de systèmes, on fait alors l'AMDE(C) de chaque sous-système et on étudie en plus leurs interactions.

Afin de faciliter des étapes de l'AMDE et de mieux les formaliser, on emploie parfois des outils tels que l'APR (pour déterminer les phases de fonctionnement les plus critiques mais aussi pour élargir le champ de l'AMDE en intégrant le facteur humain), ou l'arbre des causes pour recenser les causes des modes de défaillance et bien distinguer modes de défaillance, causes de défaillance et effets de la défaillance. D'autres outils tels que la méthode des pannes résumées peuvent aussi être utilisés (Villemeur 1988).

4.6.3 Analyse par arbre des défauts (ou des causes, des défaillances, des fautes MAC,)

Cette méthode est également connue sous les noms d'arbre des défauts ou d'arbre des défaillances (Fault Tree Analysis). Elle se base sur une représentation graphique de combinaisons logiques de causes conduisant à l'événement redouté ou événement sommet qui représente généralement l'accident et correspondant au sommet de l'arbre (Figure 4.2). Cet arbre peut aussi bien être utilisé en phase de conception qu'en analyse des accidents survenus en situation d'utilisation. Une cause est une combinaison logique de différents événements.

Cette méthode peut être utilisée d'une part, dans l'analyse d'un système (précédé par une analyse du type AMDEC) et d'autre part, dans l'analyse des accidents révélés en situation normale d'utilisation.

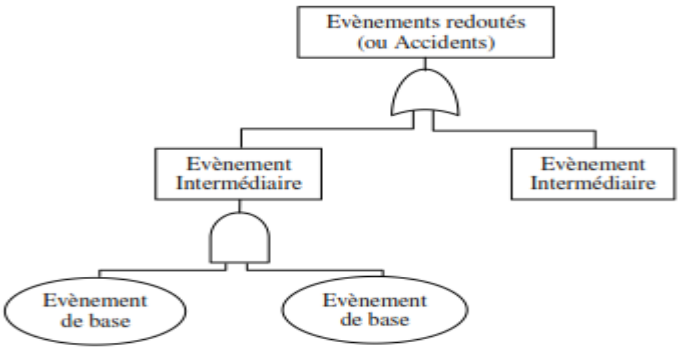


Figure 4.2 Exemple de représentation de l'arbre des causes

Selon la taille de l'arbre, il est possible de déduire directement des résultats. En effet, de par sa représentation graphique, l'arbre constitue une image synthétique des différents chemins conduisant à l'événement redouté. Il s'agit également d'un support pour l'identification et l'installation des mesures de sécurité. La Figure 4.3 représente un arbre des causes. Cet arbre

permet d'identifier 2 coupes minimales : C1= {E1,E2}, d'ordre 2 et C2={E3,E4,E5}, d'ordre 3.

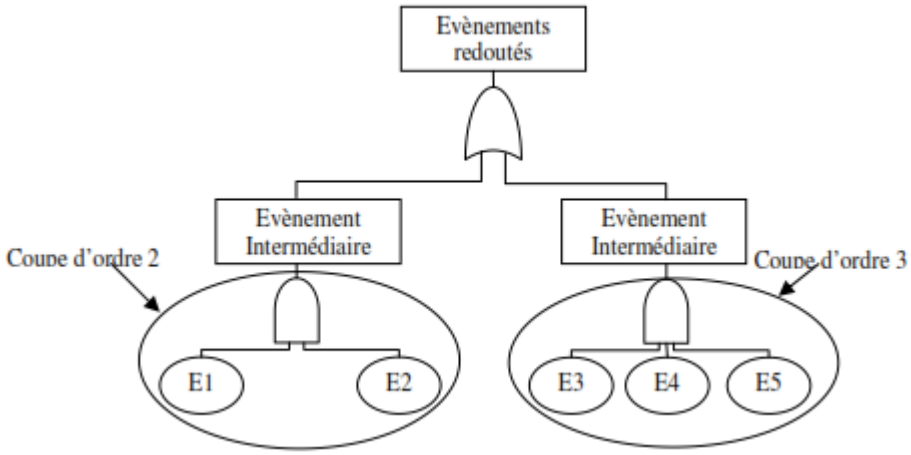


Figure 4.3 Identification de l'ordre des coupes

La probabilité d'occurrence de l'événement redouté est : $P(ER)\ P\ ((E1\ E2)\ \ (E3\ \ E4\ E5))$

Des mesures de sécurité devront être mises en place afin d'amener l'ordre des coupes minimales à un niveau souhaité.

La MAC est une méthode permettant une analyse qualitative, par l'identification des combinaisons d'évènements, et une analyse quantitative, par l'évaluation des probabilités d'occurrence de l'événement redouté. Néanmoins, il est impossible de tenir compte des séquences d'événements, et également des modifications d'états des composants et notamment des réparations (Polet, 2002). Enfin, sa mise en œuvre s'avère rapidement difficile pour les systèmes complexes, de par la difficulté rencontrée à recenser tous les évènements et combinaisons possibles.

4.6.4 Analyse par arbre d'événements ou arbre des conséquences (event tree)

Il s'agit également d'une méthode probabiliste qui se prête à la quantification (Lees 1986), comme l'arbre des causes. C'est une forme dérivée de l'analyse de la décision que nous n'aborderons pas (Villemeur 1988).

Le principe consiste à partir d'un événement élémentaire susceptible d'être à l'origine d'une séquence accidentelle puis de déduire les conséquences possibles de cet événement. L'arbre se développe à partir d'un événement initiateur et progresse surtout dans le cas où des systèmes de sécurité sont mis en place pour enrayer le déroulement des événements menant à l'accident. On part d'un événement initiateur considéré comme un événement conduisant à un événement indésirable. On élabore alors une séquence d'événements qui est une combinaison temporelle (fonctionnement ou panne de systèmes élémentaires) conduisant à des événements indésirables. On ne prend généralement en compte que les événements (pannes,…) de probabilités jugées suffisantes pour rendre le scénario. Ce

processus peut amener à un nombre considérable de séquences, son originalité réside donc dans les processus utilisés pour réduire ce nombre. Cependant pour que ces réduction n'amènent pas à des représentations fausses des séquences accidentelles, cette méthode nécessite de connaître parfaitement et complètement le système. Ce n'est possible que pour des systèmes relativement réduits. Lorsqu'on connaît les fonctions dont les échecs mènent à l'accident, on emploie l'arbre des causes pour envisager les causes conduisant à l'échec de ces fonctions. Cet arbre se prête assez bien à l'analyse quantitative.

On peut alors mener une analyse systématique des conséquences potentielles d'un événement ou d'une séquence d'événements. Si on prend n événements initiateurs, on a alors 2n chemins possibles et autant d'événements finaux et ainsi de suite. Par exemple, en exploitation, on peut faire une analyse quantitative des probabilités de défaillance et / ou de bon fonctionnement pour chaque événement initiateur (INRS 1990-1). Surtout utilisée de manière probabiliste (mais pas seulement), en particulier dans le domaine du nucléaire, elle est généralement employée avec l'arbre des causes. Son utilisation est donc de primes abords inductifs mais peut aussi conduire à une démarche déductive en l'associant à un arbre de défaillances. Il est difficile d'étudier une installation importante avec l'arbre des conséquences (pas seulement du fait de la taille importante mais surtout à cause du grand nombre d'arbres engendrés) - on peut limiter la taille en limitant le niveau de détail, comme pour l'arbre des causes - en revanche on ne peut pas représenter et être sûr d'avoir pris en compte les interactions entre chaque sous-système étudié.

4.6.5 Diagramme causes - conséquences

Utilisé en premier lieu dans le domaine du nucléaire par le biais de la fiabilité, ce diagramme est une combinaison de l'arbre des causes et de celui des conséquences. Cette méthode n'a été mise en application que dans un champ limité. On associe les deux démarches inductive et déductive, c'est donc une démarche qui se fait en deux temps :

- La partie "causes" représentant un ou plusieurs événements "sommet" (comme la défaillance d'un composant ou d'un sous-système), conduisant à des conséquences non souhaitées.
- La partie "conséquences" donnant les conséquences envisageables lorsque se réalisent les événements "sommet" en tenant compte des conditions de fonctionnement ou de défaillance de composants ou d'autres sous-systèmes (par

exemple le sous système de protection). (VILLEMEUR 1988). Les principales étapes de l'élaboration du diagramme causes – conséquences sont :

- ✓ la sélection de l'événement initiateur parfois nommé événement critique lié à des défaillances de composants ou de sous-systèmes et qui est a priori susceptible d'engendrer des conséquences redoutées que l'on cherchera à préciser. Cette sélection peut se faire par la méthode AMDE (analyse des modes de défaillances et de leurs effets).
- ✓ la recherche des causes de cet événement initiateur par la méthode de l'arbre des causes. L'événement initiateur équivaut alors à l'événement indésirable défini dans cette méthode.
- ✓ la recherche des conséquences de l'événement initiateur par la méthode de l'arbre des conséquences généralement.

On obtient alors par développements successifs un diagramme causes – conséquences représentant les chemins partant des causes de défaillances et aboutissant à des conséquences.

En analysant ce diagramme, on obtient la liste des combinaisons d'événements qui peuvent conduire aux événements indésirables ou non souhaités. Ce processus doit être généralisé à tous les événements pouvant être considérés comme événements "sommet".

On se trouve alors avec un ensemble de diagrammes représentant une grande partie des combinaisons possibles allant des événements initiateurs aux événements non souhaités (ou ENS). On utilise alors les outils des arbres des causes et des conséquences pour réduire ce diagramme. Ce diagramme ouvre une possibilité d'analyse quantitative de la probabilité des événements finaux ou événements redoutés.

4.6.6 Méthode MOSAR (Méthode Organisée et Systémique d'Analyse des Risques)

Il s'agit d'une méthode d'analyse des risques reposant sur un modèle d'accident proche de celui de Dumaine et formalisant un grand nombre des étapes de l'analyse des risques. C'est une méthode nécessitant la réflexion d'un groupe de travail concerné par le système étudié. Ce travail de groupe est aussi souvent implicitement préconisé dans la plupart des méthodes précitées. Le modèle d'accident nommé MADS (Modèle d'Analyse des Dysfonctionnements des Systèmes) définit l'accident comme un événement non souhaité résultat de l'atteinte d'une ou plusieurs cibles du danger par un flux de danger lui-même issu

d'une source de danger. Des événements internes ou non au système étudié peuvent aggraver la situation.

Ce modèle repose sur les notions :

- de système(s) source : système(s) à l'origine des flux de danger donc des événements non souhaités.
- de système(s) cible : système(s) sensible(s) aux flux de danger et subissant des dommages.

Il existe quatre types de cibles déjà citées.

- d'événement initial : événement qui caractérise le changement d'un système qui passe d'un état ou d'une situation normale à un état ou une situation défaillante.
- d'événement non souhaité : ensemble de dysfonctionnements susceptibles de provoquer des effets non souhaités sur des systèmes cibles.
- de flux de danger : vecteur du danger déclenché par l'événement initiateur.
- d'événement initiateur qui va déclencher l'événement initial.
- d'événement renforçateur qui accroît la vulnérabilité de la cible ou augmente les effets.

Cette méthode a priori, développée au CEA et dans les installations d'EDF intègre l'approche déterministe du risque et l'approche probabiliste lorsque cela est possible. On peut considérer un grand nombre de types d'accident puisque l'on applique ce modèle d'accident (basé sur le processus de danger) sur le ou les champs d'application qui nous intéressent. On aboutit à la construction de scénarios dans lesquels on peut ensuite mettre en place des mesures de prévention ou de protection en les définissant précisément dans la durée et dans leur action sur le système.

Les étapes principales de la méthode sont caractérisées par:

- un module de définition du système s'appuyant sur les principes de la systémique (Moigne 1977). On considère alors le système à étudier, son environnement extérieur et ses interactions avec les autres systèmes. Si le système est trop important, on le décompose alors rigoureusement en sous-systèmes ayant les mêmes propriétés.
- un module d'identification des risques qui passe par l'identification des sources et des cibles du danger. On peut utiliser les arbres logiques pour représenter les processus d'accident.
- un module d'évaluation des risques qui utilise la même grille gravité / probabilité que l'AMDEC à laquelle on associe la limite d'acceptabilité de Fermer permettant de

distinguer les risques acceptables des risques inacceptables. Les risques inacceptables feront alors l'objet d'actions prioritaires de prévention.

- un module de proposition de solutions pour rendre les risques inacceptables acceptables. On sort alors du domaine de l'audit. On définit (et caractérise) ensuite les solutions choisies (quoi, par qui, comment, fréquence des vérifications,…).
- un module de vérification de l'efficacité et donc de validation des solutions choisies.

Cette méthode contient une deuxième partie, la partie B, qui utilise les outils de la sûreté de fonctionnement tels que l'arbre des causes afin de rentrer dans le détail des scénarios inacceptables établis précédemment. Cela est indispensable lorsque le degré de décomposition de l'accident n'a pas été suffisant pour définir la ou les mesures de prévention à mettre en place qui répondent aux exigences que l'on s'est fixées (niveau de sécurité, coût).

Le tableau suivant présente pour chacune des méthodes de sécurité des systèmes décrites, leur positionnement par rapport aux critères de comparaison énoncés antérieurement.

Tableau 4.3 : Tableau récapitulatif des méthodes de sécurité

Critères		Méthodes					
		APR	AMDEC	Arbre des défaillances	Event tree	Diag. Causes csq	MOSAR
ETAPES : formalisation	Définition du Système	Non	Oui	Non	Non	Non	Oui
	Identification des risques	Oui	Oui	Non	Non	Non	Oui
	Identifications des mécanismes générateurs de risques	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
	Evaluation	Non	Oui	Oui	Non	Non	Oui
	Hiérarchisation	Non	Oui	Non	Non	Non	Oui
	Identification des solutions	Oui	Oui	Non	Non	Non	Oui
Victimes prises en compte	Installation	X	X	X	X	X	X
	Homme au Travail	X	Possible	X		X	X
	Ecosystèmes	X	Possible	X		X	X
Types de facteurs de risques envisagés	Technologiques	X	X	X	X	X	X
	Humains	X	Possible	X			X
	Organisationnels	Possible	Possible				Possible
Modèle d'accident		Oui	Oui (faible)	Oui (faible)	Non	Implicite	Oui
Sens d'investigation		Inductif	Inductif	Déductif	Inductif	Inductif	Inductif et (Déductif possible)

Nous détaillons par la suite les méthodes qui intègrent la notion de la sécurité dans la conception

4.7 Méthode d'intégration de sécurité dans la conception.

4.7.1 Une intégration de la sécurité dans la conception d'une machine par des voies « directes » et « indirectes » (De la **Garza 2005).**

D'un point de vue général, les modalités d'intégration effectives de la sécurité, dans les projets de conception, se caractérisent par une double structure liant des voies dites « directes » et des voies dites « indirectes ». Les voies directes sont définies ici comme des modalités d'intégration explicites de la sécurité à partir des normes, guides ou autres documents officiels. Cet aspect normatif apparaît comme un ensemble de connaissances partagées par un collectif impliqué à un moment donné dans un processus de conception. Il s'agit d'un référentiel opératif commun qui facilite le dialogue et la coopération entre acteurs de la conception. En revanche, les voies indirectes se caractérisent comme des modalités d'intégration implicites qui découlent d'un système de connaissances individuelles. Ce système se fonde sur la connaissance de différents acteurs sur la situation d'exploitation suite à des visites sur le terrain, des retours d'expérience informels ou formels par la voie du Service Après Vente ou d'un autre service le Product Performance Group, qui s'occupe de dysfonctionnements techniques nécessitant des modifications importantes chez un client .Le tableau (4.1) ci-dessous résume les principales caractéristiques de ces modalités d'intégration.

Dans la partie qui suit, nous décrirons comment la sécurité est intégrée selon ces deux voies, qui sont les acteurs impliqués dans l'une ou dans l'autre et pourquoi ces deux modalités sont à la fois nécessaires et insuffisantes telles qu'elles sont pratiquées actuellement.

Tableau 4.4. Articulation des voies directes et indirectes lors de l'intégration de la sécurité au cours d'un processus de conception (De la Garza 2005).

Voies directes : modalités d'intégration explicites et officielles	Voies indirectes : modalités d'intégration implicites
Normes AFNOR **Normes et directives européennes** **Documents internes** **Certification de la machine par des organismes externes** **Impliquent le partage d'un « référentiel opératif commun » en relation avec un système collectif de connaissances, mais un seul expert sécurité en est responsable** **Une intégration de la sécurité systématique mais qui n'est pas articulée à une phase de la conception particulière**	Ces modalités peuvent concerner des choix liés aux : Accès machine, carters Emplacement des commandes, boutons Flux de circulation : passerelles, plates-formes, escaliers, rambardes Impliquent des connaissances sur le travail réel, ses exigences et contraintes et/ou des retours du terrain ou d'accidents. Sont liées à un système individuel de connaissances Une intégration de la sécurité non systématique : des objectifs de sécurité qui viennent se greffer aux objectifs de conception

4.7.2 Une sécurité portée par le collectif des concepteurs et l'organisation de retours d'expériences (De la Garza 2005).

Les Retour d'EXpérience (REX) restent actuellement pauvres et non systématiques, en particulier par rapport à la sécurité et à l'usage des équipements industriels, surtout dans les PME-PMI, mais aussi dans nombre de grandes entreprises. Dans le cadre d'une conception cherchant à intégrer des critères de sécurité dans les différentes phases de la conception, l'organisation d'un REX ainsi que la capitalisation des connaissances et des ressources internes à l'entreprise sont absolument nécessaires. Les REX concernent à la fois les événements critiques survenus en situation d'exploitation, les situations quotidiennes d'exploitation et les projets de conception. Différentes méthodes d'analyse d'accidents ont fait leurs preuves depuis plusieurs années maintenant. Cependant, dans les secteurs industriels qui ne sont pas considérés à haut risque, elles ne sont pas forcément connues. C'est pourquoi, dans certains cas, il faut mener une réflexion par rapport à l'événement a posteriori en partant des outils de recueil avant même d'envisager des outils d'analyse (Michaud, 2003).

La certification ISO 9001 a favorisé une structuration du processus de conception pouvant aider à une mémoire de projet et à un REX par rapport à la santé/sécurité au sens de La monde et al. (2001). En effet, depuis 1998, il existe des traces écrites des projets les plus importants de conception dans l'entreprise puisque la certification impose des fiches de suivi de dossier d'étude qui doivent spécifier les données d'entrée, la planification de la phase projet et de la phase étude, l'exécution et la validation. Pour chaque point, il faut joindre les documents correspondants. Comme le démontre Reverdy (1999), les normes de l'assurance qualité ont introduit un changement fondamental dans les entreprises par « l'injonction en faveur de l'écriture ». Cette écriture est vécue comme contrainte, car elle donne le sentiment « d'alourdir » le travail. Mais parallèlement, certains reconnaissent l'intérêt d'une telle démarche lorsque l'écrit devient « instrument de l'action collective » (Reverdy, op. cit.) et instrument de la mémoire de projet. Elle peut, en effet, si elle est bien organisée, conduire à une capitalisation des connaissances et assurer leur transmission et leur pérennisation, une fois l'équipe projet dissoute. Nous avons constaté, au cours de notre étude, des effets de cette écriture quant à un choix technique réutilisé systématiquement dans la conception de nouvelles plieuses, sans pour autant l'avoir évalué. L'équipe projet a pris conscience, en discutant avec le SAV, que ce choix technique induisait des problèmes sur le terrain depuis dix ans. Cette solution a donc été notée comme inadéquate, en expliquant les raisons. Il y a désormais une trace des choix techniques étudiés, ceux qui ont été retenus et ceux qui ne l'ont

pas été. La même démarche pourrait être enrichie avec des aspects de santé/sécurité qui seraient connus de l'expert sécurité, du SAV, de l'exploitant ou de l'utilisateur final lui-même.

En conclusion, cette démarche d'intégration de la sécurité et de la santé dans les projets de conception se situe dans une perspective de « conception sûre » qui signifie un changement de philosophie de la conception. Il s'agit de donner un statut à la sécurité et à la santé en tant qu'objectifs de conception mentionnés dans les cahiers des charges. La conception sûre se veut, en outre, écologique car elle cherche à adapter les caractéristiques des dispositifs et des organisations aux besoins des utilisateurs finaux en interaction avec leurs caractéristiques physiques et cognitives (Rasmussen, Vicente, 1989). Elle intègre la variabilité industrielle, comme la variabilité individuelle, et cherche à anticiper l'évolution du système socio-technique dans sa globalité et dans le temps.

La conception sûre peut être considérée comme un investissement, car s'occuper de la sécurité et de la santé des opérateurs a aussi, pour effet, une meilleure performance et une plus grande efficacité du système socio-technique (Fadier, 1998). Bien entendu, une conception sûre ne relève pas uniquement des seules compétences de l'ergonome, mais ce dernier peut y contribuer. Ainsi, dans les années 80, la notion de « concevoir pour la sécurité » (design for safety) s'est développée, en particulier, pour les aspects techniques et les ingénieurs s'y sont familiarisés (cf. Wang, Ruxton, 1998 ; Birmingham, Sen, Cain, Cripps, 2000), mais deux constats importants ressortent.

- La sécurité et la prévention apparaissent comme réservées aux systèmes à hauts risques, en crainte des grandes catastrophes dans le nucléaire, l'aéronautique, le ferroviaire ou le maritime.
- Les démarches de conception intégrant les besoins des utilisateurs finaux en relation avec les exigences physiques et cognitives du travail et les caractéristiques des utilisateurs, semblent être le privilège du domaine des interfaces homme-machine (IHM) et des logiciels. Les normes dans ce domaine préconisent une démarche « centrée utilisateur » (cf. par exemple, NF EN ISO 13407, ISO TC 159/SC 4, ISO/TR 16982) et la littérature spécialisée est abondante depuis les années 80.

Un élargissement s'avère indispensable dans le domaine de la conception des équipements industriels, pour une réelle prévention des accidents et des atteintes à la santé spécifiques (maladies professionnelles).

Enfin, si la conception est une étape clé pour une prévention efficace et adaptée aux conditions réelles de la production, elle ne peut pas tout résoudre. Au-delà du système technique, et d'une vision individuelle du rôle de l'Homme dans la sécurité, il faut considérer les aspects organisationnels dans l'approche de la sécurité. Les analyses d'accidents dans divers domaines (Rasmussen, Svedung, 2000 ; De la Garza, 1999) montrent comment ces aspects jouent aussi un rôle important dans l'émergence de ces processus. Il s'agit alors d'articuler la conception sûre d'équipements industriels avec la conception sûre de systèmes organisationnels. (**De la Garza 2005**).

4.7.3 La notion barrière de sécurité

Dans le langage courant, le mot barrière est souvent utilisé pour décrire un obstacle, physique ou autre, ce qui empêche quelque chose se produise.

Hollnagel, 1999 définit Les barrières de sécurité comme *des obstacles, des obstructions ou des gênes qui peuvent soit prévenir l'exécution d'une action ou l'apparition d'un évènement, soit prévenir ou diminuer l'impact des conséquences* (Hollnagel, 1999). Elles sont donc, par définition, des moyens visant l'amélioration de la sécurité.

Les Barrière de sécurité dans l'industrie peuvent être expliquées comme une barrière qui empêche un accident de se produire, ou à réduire les conséquences.

4.7.3.1 Classification des barrières

Afin de faire la distinction entre les barrières de différents types, et de faciliter la gestion de la barrière, les barrières sont souvent classés en fonction de différentes propriétés. la catégorisation des barrières, basé sur une variété de propriétés, ont été introduites dans la littérature. Comme le montre Sklet (2006), certaines méthodes de catégorisation des obstacles fondés sur les propriétés que l'on attribue généralement à des fonctions de la barrière, tandis que d'autres classent les obstacles fondés sur les propriétés que l'on attribue généralement à des systèmes de barrière. Cette section présentera une sélection de façons dont les fonctions de barrière et systèmes d'étanchéité peuvent être classés.

4.7.3.2 Classification de barrières par fonction

Lorsque les barrières de sécurité sont classés par fonction, il est souvent lié à l'effet de la fonction de barrière a sur le scénario d'accident. La définition de barrières de sécurité stipule que les obstacles sont des moyens physiques ou non physiques qui soit prévenir, contrôler ou atténuer des événements ou des accidents indésirables. Utilisant les verbes prévenir, contrôler et atténuer de classer les fonctions de barrière est fréquent lorsque les fonctions sont liées à une séquence de l'accident ou de l'événement (Sklet, 2006). La prévention a pour objectif de réduire la

probabilité d'un évènement ou de réduire son intensité. Le contrôle limite la déviation d'une situation normale à une situation anormale ou inacceptable. "Contrôler" consiste à empêcher la transition du manque de contrôle à la perte de contrôle. La mitigation consiste à prévenir que l'énergie soit absorbée par la cible.

Cependant, Hollnagel (Sklet, 2006) décrit deux principales fonctions; la prévention et la protection. Les barrières de prévention sont celles destinées à fonctionner avant qu'un évènement dangereux se produise. Ces barrières sont censées éliminer le risque d'accident ou au moins ralentir son développement. Les barrières de protection sont celles déclenchées une fois qu'un évènement initiateur se produit. Elles sont supposées protéger l'environnement, les personnes ainsi que le système lui-même des conséquences d'un accident. Enfin, Dujim (Sklet, 2006) proposent quatre catégorie de fonctions: empêcher (ou éliminer), prévenir, contrôler et protéger. L'empêchement correspond à changer la conception d'un équipement ou d'un produit afin d'éliminer toutes les causes potentielles d'un évènement.

4.7.3.3 Classification des systèmes de barrières

Les barrières de sécurité sont définies comme des moyens soit physiques ou non physiques. Ceci est une nomenclature commune des systèmes de barrière. Certains auteurs distinguent entre les barrières physiques et techniques sur le côté physique (Svenson, 1991), et certains distinguent entre les barrières procédurales / administratives et des actions humaines sur le côté non-physique (Neogy et al., 1996). D'autres distinguent entre les barrières actives et passives (Kjellffen, 2000; CCPS, 2001,). Barrières passives sont inhérents à la conception du lieu de travail et ne nécessitent aucune sorte d'activation ou de services publics, alors que les obstacles actifs dépend de l'opérateur, un système automatisé, et / ou d'autres utilitaires pour effectuer sa fonction.

Schupp distingue les ***barrières inhérentes*** des ***barrières ajoutées*** (Sklet, 2006). Une barrière inhérente consiste dans le changement d'un ou plusieurs paramètres de conception. Les barrières ajoutées sont des systèmes ou des composants ajoutées à la solution détaillée pour des objectifs de sécurité.

Hollnagel (2008b) a proposé une classification fondée sur la nature des obstacles, en utilisant quatre catégories: matériels, fonctionnels, symboliques et barrières immatérielles. Barrières matérielles empêchent physiquement un événement d'avoir lieu, les barrières fonctionnelles effectuent une fonction active (par exemple un mot de passe), barrières symboliques nécessitent une interprétation (par exemple des signes, des instructions) et des barrières immatérielles ne sont pas physiquement présent (par exemple, la compétence, les principes de sécurité) (Rausand 2011).

Autres systèmes de classification comprennent une catégorisation basée sur la capacité des

obstacles à exécuter une fonction de barrière elle-même. Les obstacles qui sont en mesure d'empêcher complètement la progression d'un scénario d'accident sont appelés barrières pleines. Les obstacles qui peuvent empêcher que partiellement la progression d'un scénario d'accident sont appelés barrières partielles.

4.7.3.4. Critères de performance des barrières

Afin de mesurer et décrire la capacité d'un système de barrière à remplir sa fonction, une série de différents critères de performance ont été introduites dans la littérature. PSA (2002) suggère que la performance de barrière peut comprendre, entre autres, les propriétés suivantes:

- Capacité
- Fiabilité
- Disponibilité
- Capacité à supporter les charges
- Intégrité
- Robustesse

Ces critères peuvent être classés en trois groupes. Tant disponibilité et la fiabilité décrivent la capacité de la barrière de fonctionner en cas de besoin. La robustesse et sa capacité à résister à des charges décrivent la capacité de la barrière pour résister aux chocs externes et des charges accidentelles. La capacité est une propriété qui décrit la capacité de la barrière d'exécuter suffisamment sa fonction prévue.

Hollnagel propose les critères suivant pour étudier la qualité des barrières (Hollnagel, 2008b):

L'efficacité ou l'adéquation: l'efficacité de la barrière pour accomplir ses objectifs dans les conditions considérées;

Les ***ressources exigées*** (coût): les ressources nécessaires pour sa mise en place, sa maintenance et son utilisation;

La ***robustesse***: l'aptitude à résister aux changements et à la variabilité de l'environnement;

Le ***délai d'implémentation***: le temps nécessaire de sa conception à sa mise en service;

La ***disponibilité***: l'aptitude à accomplir ses fonctions dans des conditions données et à un instant donné;

L'***évaluation***: détermine si la barrière fonctionne et est disponible comme prévu.

L'évaluation peut être jugée selon la facilité d'exécution de la barrière;

L'***indépendance de l'humain***: le degré de dépendance de l'humain pour accomplir sa fonction.

Rausand (2011) présente les critères suivants pour la performance de la barrière, adaptée de
CCPS (1993), Hollnagel (2004) et HSE (2008):

- Spécificité: La capacité de la barrière de détecter et de prévenir ou d'atténuer les conséquences d'un événement dangereux spécifié
- Adéquation: La capacité de la barrière pour prévenir les accidents dans le fondement de la conception et répondre aux exigences réglementaires, ainsi que la capacité de la barrière
- Indépendance: Idéalement, une barrière doit être indépendant de tous les autres obstacles liés à l'événement dangereux spécifique.
- Fiabilité: La capacité de la barrière à remplir sa fonction à la demande
- Robustesse: La capacité de la barrière pour résister à des événements extrêmes, et ne pas être désactivé par l'activation d'une autre barrière
- Vérifiabilité: La capacité de la barrière afin de permettre la validation périodique de la fonction de barrière (par exemple les essais, maintenance)

4.7.3.5 Analyse des barrières assistée par ordinateur

Shahrokhi propose une modélisation dynamique de l'humain et du risque afin d'informatiser l'analyse de la sécurité lors de la conception (Shahrokhi, 2006c). Ainsi, il définit les entités de risque suivantes: la cible, la zone dangereuse, le phénomène dangereux (appelé agent de danger), l'évènement dangereux et la barrière de sécurité. L'idée finale étant de mettre à la disposition du concepteur un outil qui lui permettra de simuler les effets de ses choix et des mesures de sécurité qu'il propose (barrières de sécurité). De cette manière, le concepteur a une vision globale des relations et de l'interdépendance qui existent entre les causes, les déviations et les conséquences.

La zone dangereuse est alors considérée comme un espace flou et dynamique dont les effets sont fonctions d'un côté de la distance entre le phénomène dangereux et la cible et, d'un autre côté, de la vulnérabilité de la cible. Ainsi, la zone dangereuse est considérée comme une zone d'énergie et l'index du risque est calculé en fonction de l'énergie absorbée par la cible. De ceci découle le fait qu'à une source d'énergie, on peut associer plusieurs zones dangereuses avec différents niveaux de vulnérabilité (Shahrokhi, 2006d).

Cette définition floue de la zone dangereuse est utilisée pour calculer des index de risque pour les utilisateurs qui travaillent dans l'environnement de travail. Ces index sont calculés en mesurant le degré d'appartenance de chaque membre du corps humain dans les zones

dangereuses, pour chaque séquence de la simulation et la durée de ces séquences. Lors de la simulation, la dynamique de la position du danger et de l'utilisateur, et le changement de l'amplitude de danger et la protection de la cible peuvent être effectués.

Ensuite, (Shahrokhi, 2006a) s'intéresse au concept de barrière, étant donné que modifier et ajouter des barrières sont les moyens les plus couramment utilisés par les concepteurs pour réduire le risque. Selon ce modèle, une barrière peut avoir des effets sur la source de dangers, la cible, la zone dangereuse, la probabilité ou la durée de l'impact (Shahrokhi, 2006b). Ensuite, il associe le danger aux éléments du système, et utilise l'environnement 3D, pour introduire les zones dangereuses et les barrières avec leurs effets

4.7.4 TRIZ (Théorie de la Résolution des Problèmes d'Invention)

TRIZ, acronyme russe de «Théorie de la Résolution des Problèmes d'Invention», permet de guider le concepteur dans une approche systémique pour trouver les solutions des problèmes posés en particulier en conception et innovation de produits. TRIZ ne donne pas les solutions mais propose plutôt des pistes pour chercher les solutions. Elle est basée sur cinq notions : le résultat idéal final, l'inertie psychologique, les niveaux d'inventivité, les lois d'évolution et la contradiction, elle dispose d'outils différents pour formaliser les problèmes et permettre de les résoudre, comme les hommes miniatures, les opérateurs DTC (Dimension, Temps, Coût) et la méthode poly-écrans (Savransky 1999). De plus d'autres outils pour résoudre les problèmes formalisés comme l'algorithme de résolution des problèmes d'innovation ARIZ (Marconi 1998), les 76 Standards (Terninko & al 2000), l'analyse substances-champs (vépoles), la matrice de résolution des contradictions techniques et les principes de séparation (Cavalucci 1999) sont associés. Sur le marché on trouve des outils d'innovation assistée par ordinateur basés sur l'approche TRIZ comme Techoptimizer et Idéation.

4.7.4.1 TRIZ une méthode de conception créative

Dans la littérature la méthode TRIZ a été évaluée, appliquée et comparée aux méthodes de conception créatives. Cavallucci (Cavallucci 1999) positionne TRIZ par rapport à d'autres méthodes utilisées en conception pour permettre d'exprimer les besoins ou d'analyser des solutions. Du point de vue créativité, Zusman a comparé et classé des centaines de méthodes et techniques de résolution créatives suivant sept critères : Techniques d'organisation et de motivation, Techniques pointues, Techniques systémiques, Techniques de focalisation, Techniques évolutionnistes, Techniques qui utilisent les bases de connaissances et Techniques stochastiques; les techniques stochastiques étant évidemment le seul critère parmi les sept

auquel TRIZ ne répond pas (Zusman & al 1999; Gogu 1999). Dans (Marsot 2001) Morsot montre la méthode TRIZ peut être un vecteur d'intégration des exigences de prévention des risques dans la conception des équipements de travail.

4.7.4.2 TRIZ une méthode de résolution des contradictions

Cet aspect est fondamental dans les méthodes d'innovation. TRIZ propose une démarche systématique et exhaustive de résolution de contradiction en utilisant la matrice de contradiction pour résoudre les problèmes de contradictions techniques (Matrix 1997; Royzen 1997) et le principe de séparations (dans le temps, l'espace, en phase) pour résoudre les problèmes de contradictions physiques (Hipple 1999).

TRIZ identifie deux types de contradictions liées au produit (au sens large) : physique et technique. La contradiction ou l'opposition directe de deux paramètres formulés par un seul et même système, par exemple un rouleau doit tourner à grande vitesse pour assurer la production et à vitesse lente pour assurer son nettoyage. La contradiction technique (ou d'ingénierie) est une situation dans laquelle l'amélioration d'un paramètre A conduit à la détérioration d'un paramètre B, par exemple ajouter une protection pour augmenter la sécurité diminue l'accessibilité. On constate qu'il existe également dans l'exploitation des systèmes de production des contradictions organisationnelles qui sont des situations dans lesquelles l'amélioration d'une procédure augmente la charge de travail ou complexifie le système, par exemple l'application de la procédure de nettoyage du blanchet exigée par le concepteur entraîne l'arrêt du système et des nouveaux réglages, elle augmente ainsi la charge de travail de l'opérateur. On constate que pour résoudre ces dernières contradictions on retombe sur des contradictions soit physiques soit techniques.

Après la présentation de notion de risque et les méthodes pour l'évalué et l'analysé. Et la détaille des approches qui intègre la notion de la sécurité en conception, nous exposons dans le paragraphe suivant note modèle d'intégration de la sécurité au stade de conception en se basant sur les quatre phases (Pahl&Beitz 2007)

4.8 Modèle d'intégration de la sécurité au stade de conception

Dans ce paragraphe nous s'intéressons à notre modèle d'intégration de la sécurité au processus de conception, en suivant les quatre phases décrit par (Pahl&Beitz, 2007) : la clarification des tâches ou la définition du besoin client, la conception conceptuelle, la conception architecturale et la conception détaillée du produit.

4.8.1Phase de planification et identification des besoins.

A ce stade de la planification, on s'intéresse à comprendre les multiples attentes du client, et de traduire le besoin client en fonctions techniques, et de constituer une équipe et assurer les ressources nécessaires pour qu'un programme de sécurité puisse être réalisé dans les meilleures conditions (figure 4.4). L'intégration de la sécurité dans cette phase du processus de conception est expliquée brièvement ci-dessous

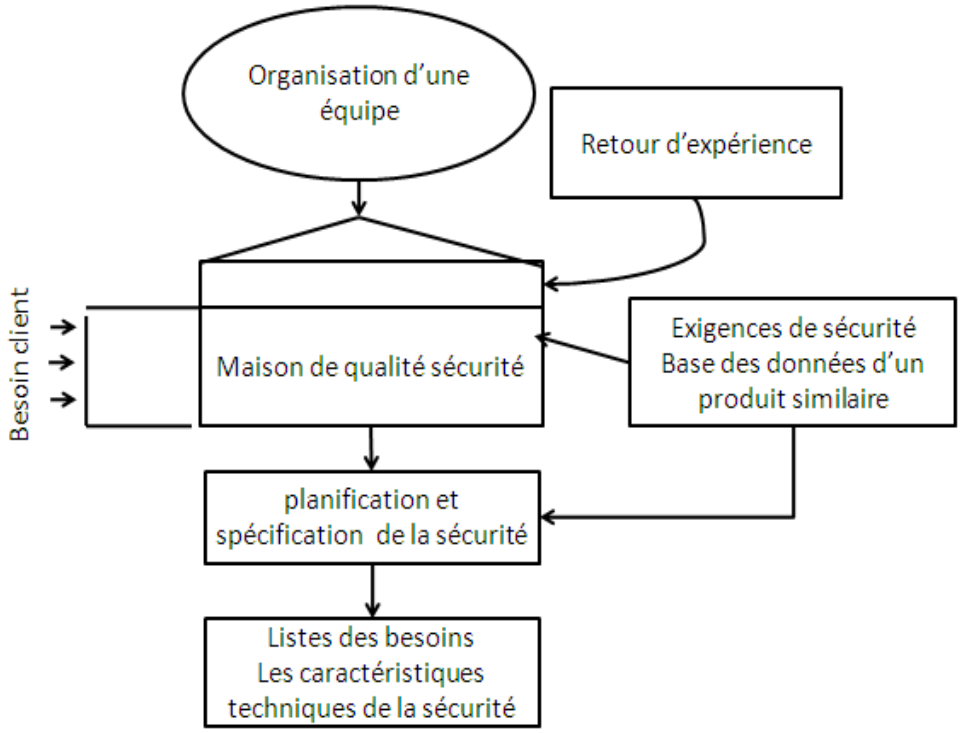


Figure 4.4 Intégration de la sécurité dans la Phase de planification des tâches (Ayoub et al 2014b).

Mise en place d'une équipe de la sécurité. Une équipe multidisciplinaire qui possède une expertise reconnue dans les divers domaines techniques, économiques,... doit être assemblée au début d'une étape de la planification du produit de sorte que les exigences de la sécurité soient prises en compte dans le processus de prise de décision. La solution proposée par l'équipe peut être maximisée si les membres de l'équipe possèdent une expertise diversifiée, telles que : la sécurité, les études de marché, la conception, les essais, la fabrication et l'exploitation sur le terrain.

Retour d'expérience (Si disponible). Cette tâche consiste à collecter, rassembler et analyser les commentaires des utilisateurs d'un produit similaire,

Planification et spécification de la sécurité

L'objectif de cette tâche est d'établir un objectif de la sécurité qui est économiquement réalisable, et développer un programme de sécurité efficace pour atteindre ou dépasser le seuil fixé. Cette tâche peut être facilitée en utilisant les résultats de l'analyse du maison qualité sécurité, le retour d'expérience et les bases de données disponibles collectée auparavant.

Cette phase se traduit par une spécification des besoins et l'identification des caractéristiques techniques les plus importantes et leurs valeurs cibles. Ces caractéristiques doivent être déployées dans les phases suivantes et servir comme des facteurs de contrôle lors du processus de conception.

Exigences de sécurité regroupent :

- Les exigences de sécurité externes – exigences fonctionnelles relatives aux éléments du milieu d'utilisation ;
- La vulnérabilité de l'homme – effets qu'a une énergie sur l'humain;
- La contrainte anthropométrique – contraintes relatives aux dimensions du corps humain de la population considérée ;
- La limitation physique – contraintes relatives aux postures, aux mouvements et aux forces physiques de l'humain de la population considérée ;
- La limitation mentale – niveau de formation, expérience, âge et le nombre de tâches simultanées autorisées pour la population considérée. Nous ne prenons pas en considération les facteurs organisationnels.

4.8.2 Phase conceptuelle

Les engagements pris en cours de la phase conceptuelle sont différents de ceux réalisés plus tard : ils sont souvent d'ordre fonctionnel, indiquant ce que le comportement de la conception détaillée devrait présenter sans préciser comment ce comportement sera atteint, Smith et Clarkson (2005). À ce stade, on ne s'intéresse pas à l'intégration de la sécurité. Mais plutôt, on s'intéresse à réduire les risques en réduisant les causes qui mènent à la apparition de certain risques. L'intégration de la sécurité dans cette phase du processus de conception est expliquée brièvement ci-dessous (figure 4.5)

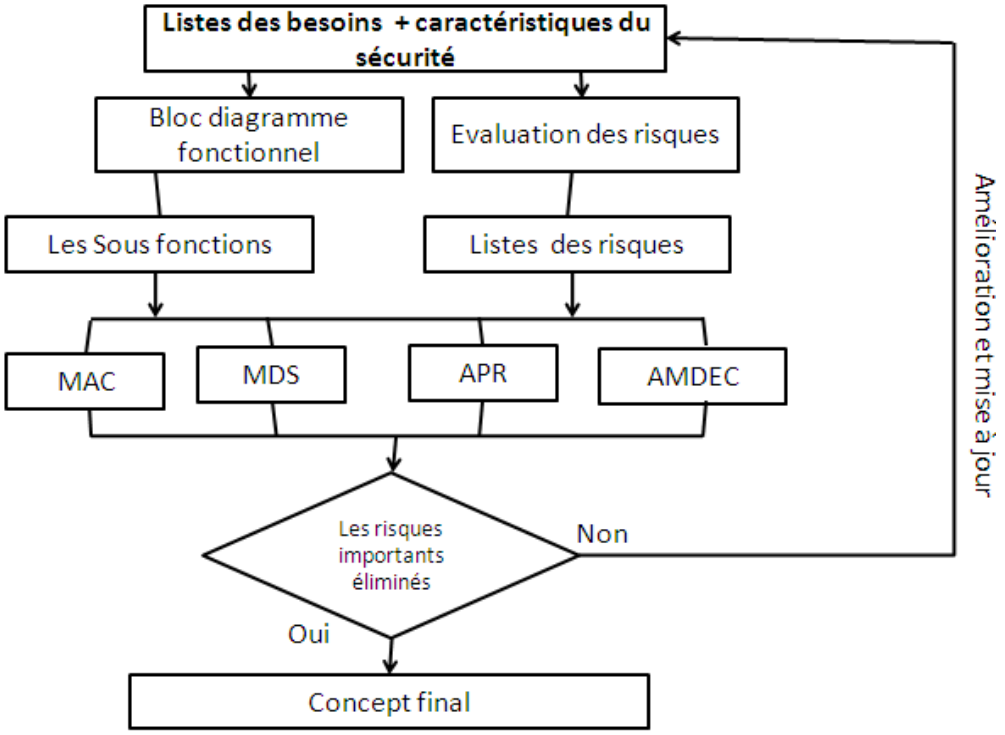


Figure 4.5 Intégration de la sécurité dans la Phase conceptuelle tâches (Ayoub et al 2014b)

Cette tâche consiste à identifiés Les phénomènes dangereux, et évaluer les risques correspondant à chaque phénomène. L'évaluation du risque s'effectue en déterminant et en analysant l'énergie constituant le principe physique de la solution ; afin d'identifier la nature du risque, les effets possibles et évaluer la gravité.

Pour l'évaluation des risques on distingue deux méthodes: méthodes inductive et déductive (Belmonte, 2008; Villemeur, 1988).

Dans les méthodes inductives, la défaillance (ou l'effet indésirable) d'un élément est présumée. L'analyse qui suit détermine les événements que cette défaillance pourrait provoquer. Cela consiste à raisonner du *plus particulier au plus général* et à répondre à des questions du type "que se passe t-il si…?". Parmi les méthodes inductives, nous citons l'Analyse préliminaire des risques ou des dangers (APR ou APD), l'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE), la Méthode de l'arbre des conséquences (MACQ). Ici, nous développons les concepts principaux de l'APR et de l'AMDEC. Le lecteur intéressé par plus d'informations peut se référer à (Villemeur, 1988).

Dans les méthodes déductives, l'événement final est présumé et les circonstances qui pourraient provoquer cet événement final sont ensuite recherchées. Cela consiste *à raisonner du plus général au plus particulier* et à répondre à des questions du type "quelle

est la cause de…?". Parmi les méthodes déductives nous citons, la Méthode de Diagramme de Succès (MDS) et la Méthode par Arbre des Causes (MAC).

L'évaluation et l'élimination des principaux risques nous a permet d'effectuer une pré-validation du concept choisi avant de passer à la phase qui suit. L'effort de la conception relatif au temps et aux connaissances requises par le concepteur sera moins important pour assurer la sécurité au cours des étapes de la conception architecturale et la conception détaillée, si le concept final élaboré à la phase conceptuelle est fiable de point de vue sécurité. Cela se traduira par un produit plus sécurisé et moins coûteux.

4.8.3 Phase architecturale

La conception architecturale consiste à définir la mise en page préliminaire du concept choisi dans la phase conceptuelle. A ce stade, la configuration du système prend forme, tandis que les études de performances initiales sont effectuées en utilisant des modèles simplifiés et des règles standards de conception mis à la disposition du concepteur.

Cette phase est réservée à l'élimination des risques ergonomiques et au respect des Exigences de sécurité du système (figure 4.6).

Les exigences de sécurité du système englobent :

- Activité de l'utilisateur : organisation dans le temps et l'espace des tâches de l'utilisateur ;
- Exigences de sécurité internes : exigences relatives à la solution et issues de l'étape précédente de la conception ;
- Temps requis : temps estimé pour effectuer une tâche ;
- Fréquence d'intervention : fréquence estimée d'une tâche ;
- Localisation spatiale : position de l'utilisateur dans l'espace ;
- Exigences des limitations physiques : contraintes spécifiées à l'issue des choix de la conception et relatives aux données physiques de l'humain ;
- Exigences anthropométriques : contraintes spécifiées à l'issue des choix de la conception et relatives aux mesures du corps humain.

Les risques ergonomiques :

- Typologie du risque –nature du risque relatif à la solution physique;
- Sévérité du risque –gravité du risque relatif à la solution physique.
- Caractéristique affectée de l'homme –paramètres impliqués dans la tâche;
- Localisation de la zone dangereuse –position dans l'espace de la zone d'énergie;

- Classification de la zone dangereuse –niveau de dangerosité de la zone dangereuse considérée.

L'intégration de la sécurité dans cette phase du processus de conception est expliquée brièvement ci-dessous (figure 4.6)

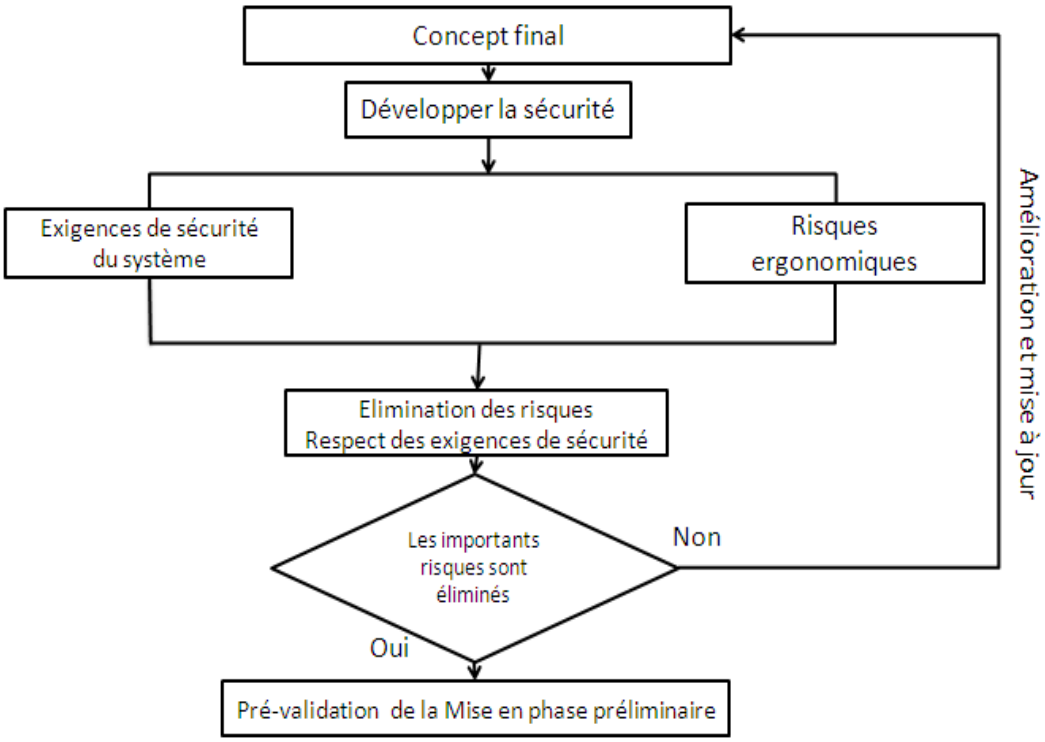


Figure 4.6 Intégration de la sécurité dans la phase architecturale (ayoub et al 2014b)

4.8.4 Phase détaillée.

La conception détaillée participe à la validation et au raffinage de la conception préliminaire dont la définition des formes des composants, des matériaux, des tolérances, des dimensions définitives, Dans ce but une compagne d'essais est effectuée grâce au plan d'expérience.

À ce stade de conception, on commence à détailler les risques de chaque composant, afin de ressortir les risques résiduels.

les risques résiduels comme étant les risques relatifs à la conception mais dont les effets sont minimes par rapport aux risques relatifs aux autres choix effectués au cours de la conception. A cette étape de la conception détaillée, les risques relatifs aux choix physiques peuvent engendrer soit des accidents soit des problèmes d'ergonomie.

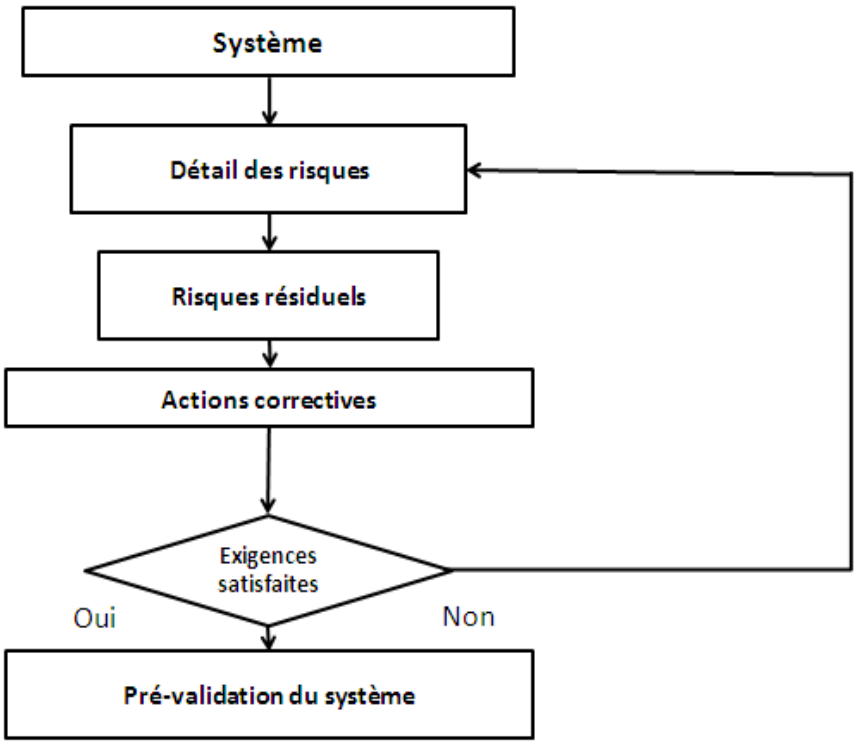


Figure 4.7 Intégration de la sécurité dans la phase détaillée (ayoub et al 2014b)

Les composants du produit, et par suite leur architecture, permet une description des phénomènes dangereux relatifs aux composants.

Ces phénomènes sont relatifs d'une part à la structure du composant et d'autre part à l'énergie qu'il renferme et sont définis par des zones dangereuses. Ces zones sont définies par une forme, une localisation, un volume et une gravité. Ce type de risques est relatif aux décisions prises lors de la conception et sont internes au produit. Les phénomènes sont identifiés à l'aide du retour d'expérience issu de l'utilisation de ses composants dans d'autres conceptions. Dans le cas de la conception d'un nouveau composant, les phénomènes dangereux peuvent être déduits de l'étude des interactions potentielles entre le squelette du composant et le squelette de l'humain.

Les actions correctives :

- Localiser les zones dangereuses pour un composant donné ;
- Confronter le squelette du composant avec la partie impliquée de l'homme pour la/les position(s) possible(s);
- Identifier l'importance de la caractéristique affectée de l'humain.
- Typologie du risque –nature du risque relatif à la solution physique;
- Sévérité du risque –gravité du risque relatif à la solution physique.

- Caractéristique affectée de l'homme –paramètres impliqués dans la tâche;
- Localisation de la zone dangereuse –position dans l'espace de la zone d'énergie;
- Classification de la zone dangereuse –niveau de dangerosité de la zone dangereuse

4.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons montré comment aujourd'hui les risques sont analysés et évalués. Après nous avons expliqué les modes de prises en compte dans l'évaluation des risques et les moyens actuels dont le concepteur dispose pour améliorer la sécurité. Par la suite nous avons développé le concept de prise en compte de la sécurité dans les approches de conception des produits. Finalement nous avons proposé une démarche basée sur des outils qui permettent au concepteur d'intégrer la notion de la sécurité au processus de conception, afin de réduire les risques possibles et de protéger les utilisateurs, les machines et l'environnement. Dans une première étape nous avons mis en œuvre l'exigence de sécurité du système. Dans une deuxième étape nous avons évalué et éliminer des principaux risques qui sont inhérents au sous-système tout en faisant une décomposition fonctionnelle de l'entité. Dans la troisième étape nous avons dégagé et écarter les risques d'ergonomie pour protéger l'homme contre tout évènement catastrophique. Et en fin nous avons ressortir tous les risques élémentaires du système afin d'éviter tout danger.

Conclusion générale

Ce travail nous a permis d'aborder le sujet de la prise en compte des caractéristiques de la sûreté de fonctionnement au processus de conception. La problématique de la sûreté de fonctionnement en conception reste toujours très complexe à traiter, cela est dû au manque des données disponibles à ce stade de développement et à l'imprécision des variables et paramètres de conception.

Afin d'approcher cette problématique, une méthodologie de prise en compte de la sûreté de fonctionnement a été développée.

Cette méthodologie permet au concepteur d'anticiper la prise en compte des caractéristiques de la sûreté de fonctionnement au stade de la conception, chose qui ne se faisait qu'une fois les prototypes réalisés, et nécessitait un temps considérable pour la validation du produit.

La méthodologie développée comporte différentes tâches à mettre en œuvre dans le processus de conception, pour les quatre caractéristiques de la sûreté de fonctionnement (Fiabilité, Sécurité, Maintenabilité et la disponibilité).

Fiabilité

La validation de certaines caractéristiques passe par le développement d'un prototype physique et par une batterie de tests. Pour certaines caractéristiques, telle que la fiabilité, qui s'exprime par la probabilité que le produit réalise la fonction pour laquelle il a été conçu dans des conditions données et dans un intervalle de temps donné, le processus de validation peut nécessiter un nombre important de prototypes physiques pour affirmer que la caractéristique est satisfaite avec un niveau de confiance donné. Le processus de validation peut se révéler coûteux et matériellement non réalisable pour un programme de mise en marché du produit

Le chapitre 2 présente un rappel des principaux concepts de la fiabilité. L'accent est mis sur l'estimation des indices de fiabilité, les différentes phases du cycle de vie d'un produit du point de vue de la fiabilité, et un recueil des données de la fiabilité des composants mécaniques.

Par la suite nous avons traité les méthodes et les outils qui permettent l'évaluation de la fiabilité et, plus précisément, ceux qu'on peut utiliser dans le processus de conception.

Finalement nous avons exposé le modèle d'évaluation de la fiabilité dès les premières phases de conception.

Sécurité

Dans la conception des produits techniques, la sécurité des utilisateurs est prise en compte à la fin du processus de conception et plus particulièrement à l'étape de la conception détaillée. De par les caractéristiques inhérentes de chacune des deux disciplines de conception et de la sécurité, pour être efficaces les méthodes actuelles d'analyse des risques nécessitent une description détaillée du produit. Cependant, le retour d'expérience montre que ce type d'intégration séquentielle de la sécurité ne permet pas d'atteindre les résultats escomptés.

L'un des objectifs scientifiques de cette thèse était de proposer une méthode de préconception basée sur les outils méthodologiques existants et permettant l'intégration structurée et formelle de la sécurité des utilisateurs et des machines.

Pour atteindre cet objectif scientifique, nous avons initialement basé la méthode sur une description systématique du processus de conception qui a l'avantage de donner une certaine typologie des représentations du produit au cours de son processus de développement et qui correspond à des activités spécifiques de l'ingénierie. L'idée principale fût d'identifier, d'exprimer et d'intégrer les exigences de sécurité tout au long du processus de conception.

Au final, nous avons proposé une démarche qui intègre la notion de la sécurité de manière systématique au processus de conception, et qui prend en considération les risques qui peuvent apparaître lors de l'utilisation d'un système de production et qui peuvent menacer la sécurité de l'utilisateur.

Maintenabilité & Disponibilité

La problématique de la validation des exigences de maintenabilité et de disponibilité en conception a été abordée dans cette thèse. Le but était de développer des outils permettant d'ouvrir la voie au développement d'un module de validation de la maintenabilité et de la disponibilité en conception. Les exigences de maintenabilité et de disponibilité apparaissent de plus en plus aux côté des exigences classiques portants sur la structure et les fonctionnalités du produit. Cette apparition est due à la complexité croissante des nouveaux produits mis sur le marché. La validation des exigences fonctionnelles et structurelles est possible en conception grâce à des

modules disponibles dans les systèmes CAO. Par contre, de tels modules ne sont pas disponibles pour la validation de la maintenabilité et de la disponibilité. Il faut donc les développer pour limiter les inconvénients causés par une unique validation a posteriori de la conception. Pour ce faire, un certain nombre de questions fondamentales se posent. Quels indicateurs peut-on utiliser en conception?

Le chapitre 3 présente une analyse méthodique des principaux indicateurs de maintenabilité et de disponibilité présents dans la littérature. Le but était de déterminer ceux pouvant être évalués en conception. Ces indicateurs sont essentiellement utilisés en exploitation. La méthodologie adoptée a été la suivante. Dans un premier temps, les indicateurs ont été recensés. Dans un second temps, les paramètres permettant de les calculer ont été identifiés à partir de leurs expressions. En troisième lieu, les sources d'obtention des données permettant de calculer ces paramètres ont été identifiées. Parmi ces sources, celles pouvant être exploitées en conception ont été distinguées en quatrième lieu. Ce qui a permis de déduire finalement les indicateurs pouvant être évalués en conception. Parmi les indicateurs admissibles, la Moyenne des Temps Techniques de Réparation, MTTR, et la disponibilité stationnaire, UTR (Up Time Ratio), ont été choisis, respectivement, comme indicateurs de maintenabilité et de disponibilité à valider dans le cadre de cette thèse.

Perspectives :

Au terme des travaux de ce mémoire, plusieurs perspectives se dessinent. Les principales extensions envisagées sont les suivantes :

- Modélisation mathématique des différentes procédures de pré-validation de la fiabilité.
- Intégration de l'approche Bayesienne (probabilité conditionnelle) afin d'estimer la fiabilité à chaque phase du processus de conception.
- Intégration de la méthodologie de validation de la fiabilité à des logiciels de la Conception Assistée par Ordinateur.
- Un modèle générique de validation de la maintenabilité et de la disponibilité en conception.
- Validation du modèle de sécurité sur un cas industriel.

Références Bibliographiques

A

ABBOU R, 2003. Contribution à la mise en œuvre d'une maintenance centralisée : conception et optimisation d'un atelier de maintenance. Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, France.

AFNOR (1988). Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité. Recueil de Normes Fran¸caises, AFNOR.

AFNOR (2005a). NF EN 1005-4, Sécurité des machines - Performance physique humaine - Partie 4 : évaluation des postures et mouvements lors du travail en relation avec les machines. Editée par Association Française de NORmalisation (AFNOR).

AFNOR (2005b). NF EN 1325-2, Vocabulaire du management de la valeur, de l'analyse et de la valeur et de l'analyse fonctionnelle - Partie 2 : management par la valeur. Editée par Association Française de NORmalisation (AFNOR).

AFNOR (2007). NF X 50-152, Management par la valeur - Caractéristiques fondamentales de l'analyse de la valeur. Editée par Association Française de NORmalisation (AFNOR).

AFNOR (2008a). NF EN 547-1+A1, Sécurité des machines - Mesures du corps humain -Partie 1 : principes de détermination des dimensions requises pour les ouvertures destinées au passage de l'ensemble du corps dans les machines. Editée par Association Française de NORmalisation (AFNOR).

AFNOR (2008b). NF EN 1005-3+A1, Sécurité des machines - Performance physique humaine - Partie 3 : Limites des forces recommandées pour l'utilisation de machines.

AFNOR (2009). NF EN 614-1+A1Sécurité des machines - Principes ergonomiques de conception: Terminologie et principes généraux. Editée par Association Française de NORmalisation (AFNOR).

A. Didelot, E. Fadier, J. Ciccotelli, Contributions and limitations of standardization with respect to automated system design, In: Cottam, Harvey, Pape, Tate (Eds.), Proc of ESREL 2000, Foresight and Precaution. Rotterdam, Netherlands, vol. 1, 2000, pp. 127–131. ISBN 90-5809-1414.

AIT-KADI D., NOURELFATH M., 2007. OPTIMIZATION OF SERIES-PARALLEL MULTI-STATE SYSTEMS UNDER MAINTENANCE POLICIES Reliability Engineering and System Safety 92 (2007), pages1620-1626.

AIT-KADI D., NOURELFATH M., SORO I-W., 2010. Performance evaluation of multi-state degraded systems with minimal repairs and imperfect preventive maintenance. Reliability Engineering and System Safety 95 (2010),pages 65-69.

AIT-KADI, D. (2002). Fiabilité des systèmes. Notes de cours / Université Laval, département de génie / mécanique Québec.

Ait-Kadi, D., (2007), «Fiabilité des systèmes», Notes de cours, département de génie mécanique, Université Laval,

Ait-Kadi, D., Diallo, C., Chelbi, A., (2004) «A Joint Spare-Provisioning and Preventive Maintenance Strategy for Availability Maximization », PSAM 7 / ESREL '04, 14 au 18 juin 2004, Berlin, Allemagne (Dhillon, 1999),

AKAO, Y. et MAZUR, G. (2003). The leading edge in qfd past, present and future. International Jouranl of Quality end Reliability Management, 20(1):20 - 35.

Allen, K. D. (1987). Processing alternatives for cost reduction. Annals of CIRP N°36/2/1987: pp. 431-434.

A. Coulibaly, A. Re ´my Houssin, B. Mutel, Maintainability and safety indicators at design stage for mechanical products, Computers in Industry 59 (May (5)) (2008) 438–449

Ayoub.A, Naciri O, Herrou B, El Hammoumi M (2014a) Integration of reliability in the design process, a case study of a submersible pump,. International Journal of Scientific & Engineering Research Volume 5, Issue 2, February-2014, ISSN 2229-5518

Ayoub.A, Naciri O, Herrou B, El Hammoumi M (2014b) Consideration of security in the design process. International Journal of Scientific & Engineering Research Volume 5, Issue 7, July 2014, ISSN 2229-5518

Ayoub.A, Naciri O, Herrou B, El Hammoumi M (2015) Consideration of indicators maintainability design International Journal of Scientific & Engineering Research Volume 6, Issue 2, February 2015 Edition, ISSN 2229-5518

ARMP-7, (2003), «Reliability and Maintainability (R&M) Part 7 : NATO R&M Terminology Applicable to ARMP's», Ministry of Defence, UK.

Editée par Association Française de NORmalisation (AFNOR).

B

BANERJEE A., FLYNN B. (1987). A simulation study of some maintenance policies in a group technologie shop .International Journal of Production Research, vol. 25, n؛11, pages 1595-1609.

Belmonte, F. (2008). Impact des postes centraux de supervision de trafic ferroviaire sur la sécurité (pp. 232): Université de Technologie de Compiègne.

Bernard, A., Hasan, R., (2002). Working situation model for safety integration during design phase. Annals of the CIRP Manufacturing 51, 119-122.

BERTSCHE, B. (2008). Reliability in Automotive and Mechanical Engineering. Springer, Berlin, ENGLAND

BERTSHE, B. et LECHNER, G. (1999). ZuverlAssigkeit im Maschinenbau. Springer, Germany.

Blanchard, B. S. and Fabrycky, W. J., (2005),bn! *Systems Engineering and Analysis*, 4th Edition, Prentice-Hall International n! Series in Industrial and Systems

Blancho, J. D. (1999). Sûreté de fonctionnement et maîtrise des risques, la maintenabilité. Institut de Sûreté de Fonctionnement, CETIM (Centre Technique des Industries Mécaniques). ISBN N° 2-85400-494-X.

BOCQUET, J. et DUFFAU, B. (1997). La gestion du changement : de la gestion de production à la gestion de conception. Dans L'art du management, pages 626-631.

Boothroyd Dewhurst. 138 Main Street. Wakefield.

Boothroyd, G., Alting, L. (1992). Design for Assembly and Disassembly. Annals of the CIRP N° 41. pp. 625-636.

Boothroyd, G., Dewhurst, P. (1986). Product design for assembly. Handbook. Wkefield, RI : Boothroyd Dewhurst, Inc.

Boothroyd, G., Dewhurst, P. (1991). Product Design for Assembly. Handbook.

BOUZAIENE, L. (2005). Anticipation du Vieillissement par Interrogation et Stimulation d'Experts. Application à un matériel passif d'une centrale nucléaire. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Paris, Paris, FRANCE.

Bréchet, Y., Asbhy, F., Dipeux, M., Louchet, F. (1990). Choix des matériaux. In Technique de l'ingénieur, traité Génie Industriel. Kirkland (1988)

C

C.A. Cordero, J.L. Mun ˜oz Sanz, Measurement of machinery safety level: European framework for product control: Particular case: Spanish framework for market surveillance, Safety Science 47 (December (10)) (2009) 1285–1296.

CORAZZA, M. (1975). Technique mathématiques de la fiabilité prévisionnelle des systèmes. Cepad, Toulouse , FRANCE.

Chapouille, P. (1999). Fiabilité. Maintenabilité. T 4 300. In Techniques de l'Ingénieur, traité L'entreprise industrielle. Paris.

Chen, L., Cai, J. (2003). Using Vector Projection Method to evaluate maintainability of mechanical system in design review. Reliability Engineering and System Safety N°81: pp. 147–154. (Aoussat et Le Coq, 1998)

COHEN, L. . Quality Function Deployment, how to make QFD work for You.Engineering Process Improvement Series. Addison Wesley 1995.

Corbett, J., Dooner, M., Meleka, J., Pym, C. (1991). Design for manufacture stratégies, principles and techniques. Reading: MA: Addison-Wesley.

CROSS, N. (2002). Engineering Design Methods, stategies for product design. John Wilez, England, 4th édition.

CUIGNET R, 2002. Management de la maintenance. Edition DUNOD.

D

De La Garza, C. (2005). L'intégration de la sécurité lors de la conception de machines à risques pour les opérateurs : comparaison de logiques différentes de conception. Pistes, 7.

DEBORDE R., GEORJON A., 1999. Maintenance des systèmes industriels. Edition HACHETTE Technique.

DEHEEGER, F. (2008). Couplage mécano-fiabiliste : méthodologie d'apprentisage stochastique en fiabilité. Thèse de doctorat, Université Clermont II, Clermont, FRANCE.

DEKKER R. (1996). APPLICATIONS OF MAINTENANCE OPTIMIZATION MODELS : A REVIEW AND ANALYSIS Reliability Engineering and System Safety, n؛51, pages 229-240.

Despujols, A. Approche fonctionnelle de la maintenance. Techniques de l'ingénieur, dossier MT9020, 2004.

Despujols, A. Méthodes d'optimisation des stratégies de maintenance. Techniques de l'ingénieur, dossier MT9050, 2005.

Directive 98/37/ED of the European parliament and of the council of 22 June 1998 on the approximation of the laws of the Member States relating to machinery, OJ L207, pp. 1–46 (23.7.1998).

Directive of the European Parliament and of the Council of 17 may 2006. Onmachinery, and amending Directive95/16/EC (recast). OJ L157, pp. 24–86 (9.6.2006).

Dhillon B.S., (2002), *Engineering Maintenance : A Modern Approach*, CRC Press, ISBN1-58716-142-7, 2002.

Directive (2006). 2006/42/CE, Parlement Européen et du Conseil, relative aux machines. Journal officiel de l'Union européenne.

Dumez, B. (1993). Le soutien logistique intégré au sein de GIAT industries. Procedings of international conférence ILCE 93, EC2, Montpellier.

E

Ebeling C. E., (1997), *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering,* McGraw-Hill, 1997.

ENSCORE E., BURNS D., 1983 ENSCORE E., BURNS D., 1983. DYNAMIC Scheduling of a preventive maintenance program International Journal of Production Research, vol. 21, n‹3, pages 357-368.

EPRI. Reliability Centred Maintenance menées par l'Electric Power Research Institute RCM technical handbook, 1982

F

Fadier, E. (1994). Etat de l'art dans le domaine de la fiabilité humaine. Edition OCTARES.

Fadier, E., De La Garza, C., (2007). Towards a proactive safety approach in the design process: The case of printing machinery. Safety Science, 45, 199–229.

Fadier, Cecilia De la Garza, Towards a proactive safety approach in the design process: the case of printing machinery, Safety Science 45 (2007) 199–229

Fadier, E., DeLaGarza, C., (2006). Safety design: Towards a new philosophy. Safety Science, 44, 55-73.

Freija van Duijne, Andrew Hale, Heimrich Kanis, Bill Green Design for safety: involving users' perspectives Redesign proposals for gas lamps using a pierceable cartridge, Safety Science 45 (2007) 253–281.

FRANCASTEL J-C., 2001. Externalisation De La Maintenance - Stratégies Méthodes – Contrats . Edition DUNOD

Francastel, J. C. (2003). Ingénierie de la maintenance : De la conception à l'exploitation d'un bien. Dunod, Paris. 485 p.

FRENK J. B. G., DEKKER R., KLEIJN M. J., 1995. A NOTE ON THE MARGINAL COST APPROACH IN MAINTENANCE . Journal of Optimization Theory and Applications.

G

GAKWAYA, A. (2010). Modélisation et analyse en CAO. Université LAVAL, Département de génie mécanique, Québec, CANADA, automne 2010 édition

Gautier, F. (2003). Pilotage économique des projets de conception et développement deproduits nouveaux. Economica, Paris.

GOSSE B., SARGIS C., SPRIMONT P-A., BENAVENT C, 2000. Les strategies d'externalisation :opérationnalisation et changements organisationnels

Grusenmeyer, C. (2002). Interactions maintenance exploitation et sécurité. Hygiène et sécurité du travail N°186: pp. 53-66.

H

HAHNEL, A., LEMAIRE, M., RIEUNEAU, F. et PETIT, F. (2007). Machines and mechanisms design for reliability. 12th IFToMM World Congress.

HALDAR, A. et MAHADEVAN, S. (2000). Probability, Reliability and Statistical Methods in Engineering Design. John Wiley et Sons, New York, USA.

HALES, C. et GOOCH, S. (2004). Managing Engineering Design. Springer, London, second édition.

HALES, C. et GOOCH, S. (2004). Managing Engineering Design. Springer, London, second édition.

HALES, C. et PATTIN, C. (2002). Design Review for Failure Analysis and Prevention. ASM Handbook.

HALES, C. et PATTIN, C. (2002). Design Review for Failure Analysis and Prevention. ASM Handbook.

Hasan, R. (2002). Contribution à l'amélioration des performances des systèmes complexes par la prise en compte des aspects socio-techniques dès la conception : proposition d'un modèle original de SITUATION DE TRAVAIL pour une nouvelle approche de conception, Université Henri Poincaré, Nancy I.

Hale.a. Andrew, Kirwan.b. Barry, Kjelle ´n. Urban, Safe by design: where are we now? Safety Science 45 (2007) 305–327.

Hasan, R., Bernard, A., Ciccotelli, J., Martin, P., (2003). Integrating safety into the design process: elements and concepts relative to the working situation. Safety Science, 41,155-179.

Hasan, R., Martin, P., Bernard, A., (2004). Solving Contradictions Problems Related to Safety Integration in Design Process. TRIZ Journal. (Hollnagel, 2008a).

Hassanain, M. A., Froese, T. M., Vanier, D. J. (2003). Framework model for asset maintenance management. Journal of Performance of Constructed Facilities N°17(1): pp. 51-64.

HATELET E., BERENGUERAND C., JELLOULI O., 2002. PERFORMANCE ASSESSMENT OF COMPLEX MAINTENANCE POLICIES USING STOCHASTIC PETRI NETS. Lambda-Mu 13 Lyon ESREL 2002, pages 532537.

Hollnagel, E. (1999). Accident and barriers (pp. 175-180). 7th European Conference on Cognitive Science Approaches to Process Control, 21-24 September, France.

Hollnagel, E. (2008a). The changing nature of risks. Published online:http://erik.hollnagel.googlepages. com/Changingnatureofrisks.pdf.

Hollnagel, E. (2008b). Risk + barriers = safety? Safety Science, 46, 221-229.

HSIAO, S. (2002). Concurrent design method for developing a new product. International Journal of Industrial Ergonomics, 29:41-55.

I

IEC 60050-191, (1990), «International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 191 :Dependability and quality of service», International Standard, International Electrotechnical Commission, IEC, December 1990

International Standard, Safety of machinery – Basic concepts, general principles for design – Part 2: Technical principles, 2003.

Ireson W., Coombs C.F., Moss R.Y., (1995), *Handbook of Reliability Engineering and Management*, 2nd Edition, McGraw-Hill Companies, ISBN 0-07-012750-6, 1995.

J

ISO (2007). ISO 14121-1, Sécurité des machines - Appréciation du risque - Partie I : Principes. Editée par International Standards Organization (ISO).

ISO (2009). ISO 12100-1+A1, Sécurité des machines - Notions fondamentales, principes généraux de conception - Partie 1: Terminologie de base, méthodologie. Editée par International Standards Organization (ISO).

JANSEN S., RIJSEMUS W., 2006. BALANCING TOTAL COST OF OWNERSHIP AND COST OF MAINTENANCE WITHIN A SOFTWARE SUPPLY NETWORK. Proceedings of the IEEE International Conference on Software Maintenance (ICSM2006, Industrial track), (2006).

Jo, H., PARSAEI, R. et SULLIVAN, G. Principles of concurrent engineering Chapman and Hall, London. 1993.

JONGE M., MONAJEMI R., 2001. COST-EFFECTIVE MAINTENANCE TOOLS FOR PROPRIETARY LANGUAGES . Software Engineering (SEN) SEN-R0116 May 31, 2001

K

KAFFEL H. (2001). La maintenance distribuée : concept, évaluation et mise en œuvre. Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences et de Génie, Université Laval,Québec.

Kapur, K. C., Lamberson, L. R. (1977). Reliability in Engineering Design. Wiley, New-York: pp. 291-338.

KATTAN B., 2004. Synthèse structurelle d'un contrôleur basée sur le Grafcet. Thèse de doctorat, Laboratoire d'Automatique de Grenoble, Université Joseph Fourier, Grenoble, France.

KEIZERS J., ADAN I., VAN DER WAL J., 2001. A QUEUEING MODEL FOR DUE DATE CONTROL IN A MULTI SERVER REPAIR SHOP. Naval Research Logistics, Vol. 48, 2001, pp. 281-292.

KELLY. C., MOSIER C., MAHMOODI F. 1997. IMPACT OF MAINTENANCE

Kjellen, U. (2007). Safety in the design of offshore platforms: Integrated safety versus safety as an add-on characteristic. Safety Science, 45, 107-127

KUHN H., 1999. PERFORMANCE EVALUATION OF AUTOMATED FLOW LINE SYSTEMS WITH LIMITED REPAIR CAPACITIES . 2 Aegean International Conference on Analysis and Modeling of Manufacturing Systems,pages 79-88.

Kuo, T. C., Huang, S. H., Zhang, H. C. (2001). Design for manufacture and design for 'X' : concepts, applications, and perspectives. Computers & Industrial Engineering N°41: pp. 241-260.

L

Lambert A. J. D., (2003), «Disassembly sequencing: a survey», *International Journal of Production Research* , vol. 41 n° 16, 2003, p. 3721-3759.

Landy, 2002), Landy, G. (2002). AMDEC Guide pratique. Afnor: 218 p.

Lavina, Y. (1996). Réussir l'Auto maintenance. Edition d'Organisation Paris.

LEVIN, A. et KALAL, T. (2003). Improving Product Reliability strategies and implantation. John Wiley, England.

LEWIS, E. (1994). Introduction to Reliability Engineering. John Wiley, Illinois, second édition.

Ligeron, J. C., Lyonnet, P. (1988). Le management des grands contrats, prise en compte des aspects qualité et sûreté de fonctionnement. Tec et Doc Lavoisier Paris.

LlNDAHL, M. (1999). E-fmea-a new promising tool for efficient design for environment. Dans Proceedings First International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, pages 734 - 9, Los Alamitos, CA, USA.

LOUNIS Z., VANIER D.J., 1998. OPTIMIZATION OF BRIDGE MAINTENANCE MANAGEMENT USING MARKOVIAN MODELS Originally published in the Proceedings of the International Conference on Short and Medium Span Bridges, 1998, Calgary, Alberta, pp.1045-1053, v.2

Lyonnet, P. Optimisation d'une politique de maintenance. Edité par TEC ET DOC, 1999.

M

Manata, J. P. (1996). 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. Doctorat de l'Université Henry Pointacre, Université Nancy I.

Mann, D., Dewulf, S. (2003). Matrix 2003: Updating the TRIZ Contradiction Matrix: CREAX press.

M.I.B. Rausand, I.B. Utne, Product safety – principles and practices in a life cycleperspective, Safety Science 47 (2009) 939–947.

Marouzé, C. (1999). Proposition d'une méthode pour piloter la trajectoire technologique des équipements dans les pays du Sud. Application au secteur agricole et agroalimentaire. Thèse de doctorat de Génie Industriel Aix-en-Provence ENSAM Paris.

Marsot, J. (2005). QFD: A methodological tool for integration of ergonomics at the design stage Applied Ergonomics, 36, 185-192.

MCLEAN, H. (2000). Halt, hass hasa explained : Accelerated reliability techniques. ASQ Quality press.

Menye J.-B., Ait-Kadi D., Coulibaly A., Caillaud E., Zwingmann X., «Contribution à l'optimisation du MTTR d'un système mécanique en conception», 8ème Congrès International de Génie Industriel CIGI 2009, Tarbes, 10-12 juin 2009.

MENYE, J. (2009). Validation de la maintenabilté et de la disponibilité en conception d'un système multicomposants. Thèse de doctorat, Département de génie mécanique, université Laval, Québec, CANADA.

Menye, J.-B., Ait-Kadi, D., Coulibaly, A., Caillaud, E., (2007), «Prise en compte de la maintenabilité en conception des produits mécaniques», *Actes (CD-ROM) du 7 Congrès International de Génie Industriel (CIGI 2007)*, Trois-Rivières, Canada, 5-8 juin, 2007

MIKCHEVITCH, A. (2004). Méthodologie de simulation d'assemblage ou désassemblage de composants flexibles : Application à la simulation de pièces de type « poutres flexibles » dans un environnement de réalité virtuelle. Thèse de doctorat, INPG, Grenoble France.

Military HandBook – 470A, (1997), «Designing and Developing Maintenable products and Systems», U.S. Department of Defense, Washington, DC. 1997.

Military HandBook – 791, (1988), «Maintainability design techniques», U.S. Department of Defense, Washington, DC, 1988.

Modélisation des coûts de cycle de vie : prévision des coûts de maintenance et de la fiabilité Application à l'aéronautique. Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, 2007.

Monchy, F. (2000). Maintenance, Méthodes et Organisation. Dunod, Paris. 449 p

Mortureux, Y. (2001). La sûreté de fonctionnement : méthodes pour maîtriser les risques. Traité l'Entreprise Industrielle.

Moubray J. RCM2 – Butterworth Heinemann,1997.

MSG-1993 Maintenance Steering Groug. Maintenance Program Development Document. Air Transport Association, Washington, D.C. Révision 2, 1993.

N.

Nakajima, S. (1989). La Maintenance Productive Totale (TPM) : Mise en œuvre. AFNOR Gestion, Paris.

NF X60-301 (1982), «Guide pour la prise en compte des critères de maintenabilité des biens durables à usage industriel et professionnel - Fascicule de documentation» (versions française et anglaise), Norme française, Mai 1982.

Nikolopoulos, K., Metaxiotis, K., Lekatis, N., Assimakopoulos, V. (2003). Integrating industrial maintenance strategy into ERP. Industrial Management & Data Systems N°103(3-4): pp. 184-191

Nzie, W. (2006). Intégration de la maintenance en conception : application à un équipement agroalimentaire.Thèse de doctorat : Sciences pour l'Ingénieur.Université de technologie de Belfort-Montbéliard.

P

Pahl&Beitz (2007). Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., Grote, K.-H, Engineering design: Asystematic approach. 3 edition Berlin: Springer-Verlag.

PAHL, G., BEITZ, W., FELDHUSEN, J. et GROTE, K. Engineering design : a systematic approach. Springer, 3th edition 2007..

Pimor, Y. (2001). Logistique, techniques et mise en oeuvre. Dunod, Paris. 579 p.

Polet, P. (2002). Modélisation des franchissements de barrières pour l'analyse des risques des systèmes homme-machines: Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis.

POLICIES ON THE PERFORMANCE OF MANUFACTURING CELLS International Journal of Production Research, vol. 35, n‰3, pages 767-787.

Pons, E. Waroquier, C. (1993). La logistique intégrée. Edition Hermes, Paris.

PRINCIPE R., JACQUEMYNS Y., la gestion de la fonction maintenance.

PROCACCIA, H. et MORILHAT, P. (1996). Fiabilité des structures des installations industrielles. Eyrolles, France L'entreprise industrielle. Paris.

R

Ridoux, M. (1998). AMDEC-Moyen. AG 4220. In Techniques de l'Ingénieur, traité

Riout, J. (1994). Le guide de l'AMDEC machine.Sentis, CETIM.

Re ´my Houssin, Gardoni Mickae¨l, Software framework for the approach: computer aided Safety integration in design process (CASID), Journal of Advanced Manufacturing Systems 8 (1) (2009) 27–45

R. Houssin, A. Bernard, P. Martin, G. Ris, F. Cherrier, Information system based on the working situation model for an original concurrent engineering design approach, Journal of Engineering Design 17 (1) (2006).

R. Hasan, A. Bernard, J. Ciccotelli, P. Martin, Integrating safety into the designprocess: elements and concepts relative to the working situation, Journal Safety Sciences, 41 (2–3) (2003) 155–179. ISSN: 0925-7535, ''Safety by design'',http:// www.sciencedirect.com/

ROJAS, E. (2008). Méthodologie d'analyse de fiabilité basée sur des techniques heuristiques d'optimisation et modèles sans maillage : applications aux systèmes Mécaniques. Thèse de doctorat, INSA, Rouen , FRANCE.

RUSTENBURG J., 2000. A system approach to budget-constrained spare parts management. Thèse de doctorat, Eindhoven University of Technology, Pays Bas.

S

SALAMONE, T. (1995). What Every Engineer Should Know about Concurrent Engineering. M. Dekker, New York. (Pahl et al, 2007).

SASSINE Ch., SIMEU-ABAZI Z., 1998. Intégration des politiques de maintenance dans les systèmes de production manufacturiers. Thèse de Doctorat, INPG, Grenoble, France.

SCARAVETTI, D. (2004). formalisation préalable d'un problème de conception pour l'aide a la décision en conception préliminaire. Thèse de doctorat, ENSAM, Bordeaux France.

SCARAVETTI, D. formalisation préalable d'un problème de conception pour l'aide a la décision en conception préliminaire. Thèse de doctorat, ENSAM, Bordeaux France 2004.

Schoefs, Y. (2001). Guide d'organisation industrielle. Delagrave, Paris.

Shahrokhi, M. (2006a). Intégration d'un modèle de situation de travail pour l'aide à la formation et à la simulation lors de la conception et l'industrialisation de systèmes, Ecole Centrale de Nantes.

Shahrokhi, M., Bernard, A., (2006b). Barrier analysis through industrial design processes. Ergo IA.

Shahrokhi, M., Bernard, A., (2006c). Human Modelling In Industrial Design: Springer Series in Advanced Manufacturing, ElMaraghy, Hoda A.; ElMaraghy, Waguih H. (Eds.) 2006, XXII, 576 p. 264 illus., Hardcover, ISBN: 1-84628-004-4.

Shahrokhi, M., Bernard, A., (2006d). Modelling of the occupational hazards entities in a general model of products, processes and resources. Integrated design and production: CPI 2005, 2, 113-128.

SIMEU-ABAZI Z., 2000. Optimisation de la maintenance préventive dans les systèmes de production. Colloque National de Sûreté de fonctionnement 12, Montpellier, pages 395-400.

Sklet, S. (2004). Comparison of some selected methods for accident investigation. Journal of Hazardous Materials, 111, 29–37.

Sklet, S. (2006). Safety barriers: Definition, classification and performance. Journal of loss prevention in the process industries, 19, 494-506.

Smith, D., J., (2005), *Reliability, Maintainability and Risk : practical methods for engineers*, 7th Ed., Amsterdam, Elsevier/Butterworth-Heinemann, ISBN:0750666943, 2005

SMITH, J. et CLARKSON, P. (2005). Design concept modeling to improve reliability, of engineering design, 16(5):473-492.

SMITH, J. et CLARKSON, P. Design concept modeling to improve reliability, of engineering design, 16(5):473-492. 2005.

Sohlenius, G. (1992). Concurrent Engineering. Annals of the CIRP, 41, 645-655.

STAPELBERG, F. (2009). Handbook of Reliability, Availability, Maintainability and Safety in Engineering Design, limited. Springer, LONDON, ENGLAND

Suh, N. (2001). Axiomatic Design: Advances and Applications, Oxford University Press.

SUH, P. (1990). The principles of design. Oxford.

T

TEBBI, O. (2005). Estimation des lois de fiabilité en mécanique par les essais accélérés. Thèse de doctorat, ISTI Angers, Angers, FRANCE.

TEBBI, O., GUERIN, F. et DUMON, B. (2003). Statistical analysis of accelerated experiments in mechanics using a mechanical accelerated life model. Dans Annual Reliability and Maintainability Symposium, pages 124 - 31, Piscataway, NJ, USA.Warmer.

TIANHAI Z., YONG Q.i, JUNYI S., DI H., XIAOMEI Z., 2006, The Optimal Rejuvenation Schedule Driven by Maintenance Cost in Application Server Volume 3, No.8 (Serial No.21) Journal of Communication and Computer,ISSN1548-7709, USA.

TICHKIEWITC, S. (2011). Method and tools for the effective knowledge management in product life cycle. Dans Global Product Development, pages 19-26, Nantes France. CIRP Design conférence.

U

U. Kjelle ´n, Safety in the design of offshore platforms: Integrated safety versus safety as an add-on characteristic, Safety Science 45 (January–February (1–2)) (2007) 107–127.

V

Vanier, D. J. (2001). Why industry needs asset management tools. Journal of Computing in Civil Engineering N°15(1): pp. 35-43.

Vatn Jørn, Terje Aven An approach to maintenance optimization where safety issues are important, Reliability Engineering & System Safety 95 (January (1)) (2010) 58–63.

Villemeur, A. (1988). Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. Collection de la direction des études et recherches d'EDF, Eyrolles.

W

W. Karwowski, G. Salvendy, Ergonomics in manufacturing raising productivity through workplace unprovement, Society of Manufacturing Engineers, USA, 1998. ISBN: 0-87263-485-X

Y

YANG, G. (2007). life cycle reliability engineering. Wiley , Sons HOBOKEN, NEW JERSEY, USA.

Z

ZEMOURI R., RACOCEANU D., ZERHOUNI N., DURAND S., 2003. Une approche hybride pour l'évaluation et l'amélioration des performances d'un service de maintenance, basée sur les modèles analytiques et la simulation

Zille, V. Bérenguer, C., Grall, A., Despujols, A. & Lonchampt, J. Modelling and performance assessment of complex maintenance programs for multi-component systems. In ESREDA 32 Seminar proceedings, Alghero, Mai 2007.

ZWINGELSTEIN G., 1995. Livre Diagnostic Des Défaillances - Théorie Et Pratique Pour Les Systèmes Industriels. Livre.

ZWINGELSTEIN G., 1996. La Maintenance Basée sur la fiabilité - Guide Pratique D'application de la RCM. Livre.

ZWINGMANN, X. (2005). Modèle d'évaluation de la fiabilité et de la maintenabilité au stade de la conception. Thèse de doctorat, Département de génie mécanique, université Laval, Québec, CANADA

Zwingmann, X., Ait-Kadi, D., Coulibaly, A., et Mutel, B., (2008), «Optimal disassembly sequencing strategy using constraint programming approach», *Journal of Quality in Maintenance Engineering* , Vol. 14 No. 1, pp46-58, 2008

.

UNIVERSITE SIDI MOHAMED BEN ABDELLAH
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES - FES
Centre d'Etudes Doctorales : Sciences et Techniques de l'Ingénieur

Contribution à l'intégration des caractéristiques de la sûreté de fonctionnement au processus de conception

Résumé de la thèse

De nos jours, les nouveaux produits mis sur le marché sont de plus en plus complexe. Cette complexité vient en partie du fait que les fonctions que les systèmes doivent assurer requièrent l'intégration de plusieurs composants utilisant des technologies différentes. Le concepteur doit intégrer dans son processus toutes les phases du cycle de vie du système et de ses composants. Il doit opter pour des solutions qui sont simples à produire, peu coûteuses, très fiables, sécuritaires, faciles à entretenir et ayant un coût global sur tout le cycle de vie qui soit attrayant pour le consommateur.

Les récentes préoccupations en matière d'environnement et de développement durable ont conduit à l'émergence de nouvelles façons de faire en matière de conception, de fabrication, de distribution, de récupération et de valorisation des produits. Ces nouvelles façons imposent d'accorder une place privilégiée à de caractéristiques qui définissent l'état du système tout au long de son cycle de vie. Parmi ces caractéristiques, on note : la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la sécurité.

Plusieurs outils existent ou sont en cours de développement pour améliorer ou pour évaluer la sûreté de fonctionnement d'un produit. Leurs intégrations dans un processus de conception sont toutefois mal établies. Le concepteur ne dispose pas, à l'heure actuelle, d'une vision globale de la disposition de ces méthodes. C'est dans cette optique que notre thèse vient de traiter la problématique de la prise en compte et la validation de la sûreté de fonctionnement au stade de la conception.

Notre contribution, dans ce travail, est d'élaborer des modèles et des outils permettant de répondre aux questions suivantes:

- **Comment prendre en compte la fiabilité en conception ?**
- **Comment peut-on intégrer la notion de la sécurité (Machine, utilisateur) dans la phase de conception des produits ?**
- **Comment mesurer la maintenabilité et la disponibilité dès le stade de conception?**

Mots clés : Intégration, sûreté de fonctionnement, fiabilité, disponibilité, maintenabilité, sécurité, maintenance, conception

Contribution to the integration of the characteristics of dependability in the design process

Abstract

Nowadays, new products on the market are increasingly complex. This complexity is in part because the functions that the systems must ensure require the integration of several components using different technologies. The designer must include in its process all phases of the life cycle of the system and its components. It should opt for solutions that are simple to produce, inexpensive, very reliable, safe, easy to maintain and has a total cost throughout the life cycle that is attractive to the consumer.

Recent environmental concerns and sustainable development have led to the emergence of new approaches in the design, manufacturing, distribution, recovery and recycling of products. These require new ways to give a privileged place to features that define the state of the system throughout its life cycle. Among these characteristics, there is: reliability, maintainability, availability and security.

Several tools exist or are under development to improve or to assess the safety of operation of a product. Their integration in a design process, however, are not well established. The designer does not have, at present, a comprehensive view of the provision of these methods. It is in this perspective that our thesis is to address the issue of recognition and validation of operational safety at the design stage.

Our contribution in this work is to develop models and tools to answer the following questions:

- **How to take into account the reliability design?**
- **How can we incorporate the concept of safety (machine, user) in the product design phase?**
- **How to measure the maintainability and availability right from the design stage?**

Keywords: Integration, dependability, reliability, availability, maintainability, safety, maintenance, design