



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	Examineur
Said BOUTAHARI	PH	Ecole Supérieure de Technologie de Fès	Examineur
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





## 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

# 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 Maintainability (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.	<i>Design For Reliability (DFR)</i> .....	29
1.8.5.	<i>Design For Maintenance (DFMAIN)</i> .....	31
1.9	L'ingénierie de la conception.....	32
1.9.1	<i>L'évolution de la pensée moderne de la conception.</i> .....	32
1.9.2	<i>Processus de conception.</i> .....	34
1.9.2.1	Planification et clarification des tâches.....	35
1.9.2.2	Conception conceptuelle.....	36
1.9.3	<i>Conception architecturale ou conception de réalisation.</i> .....	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	<i>Concepts de base de la fiabilité.</i> .....	41
2.2.1.1	<i>Fiabilité à l'instant <math>t</math>, <math>R(t)</math></i> .....	42
2.2.1.2	<i>Distribution cumulative des durées de vie, <math>F(t)</math></i> .....	42
2.2.1.3	<i>Taux de panne</i> .....	43
2.2.1.4	<i>La Moyenne des Temps de Bon Fonctionnement</i> .....	43
2.2.2	<i>Estimation des indices de fiabilité.</i> .....	44
2.2.3	<i>Elaboration de la fiabilité.</i> .....	44
2.2.4	<i>Les phases du cycle de vie d'un produit:</i> .....	45
2.2.5	<i>Recueil de données de fiabilité.</i> .....	47
2.3	Méthodes et outils pour l'évaluation de la fiabilité.....	48
2.3.1	<i>Modélisation et évaluation de la fiabilité d'un système multi-composant.</i> .....	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	<i>Les principales méthodes de sûreté de fonctionnement</i> _____	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	<i>Approche probabiliste de la conception</i> .....	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	<i>Méthodes d'approximation Premier/seconde ordre</i> .....	63
2.3.4	<i>Méthodes de simulation de Monte-Carlo (SMC)</i> _____	68
2.4	Modèle de prise en compte de la fiabilité au processus de conception.....	69
2.4.1	<i>Phase de planification et identification des besoins</i> .....	69
2.4.1.1	Application de la méthode à une pompe immergée.....	71
2.4.2	<i>Phase conceptuelle</i> .....	74
2.4.2.1	Application.....	76
2.4.3	<i>Phase architecturale</i> .....	79
2.4.3.1	Application .....	80
2.4.4	<i>Phase détaillée</i> .....	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	<i>Maintenabilité</i> _____	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	<i>Disponibilité</i> _____	91
3.2.2.1	Définitions .....	91
3.2.2.2	Indicateurs de disponibilité.....	91

<b>3.3 Indicateurs de maintenabilité en conception</b>	<b>92</b>
3.3.1 <i>Indicateurs de maintenabilité en exploitation</i>	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 <i>Obtention des données</i>	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 <i>Indicateurs de maintenabilité pouvant être évalués en conception</i>	103
<b>3.4 Indicateurs de disponibilité en conception</b>	<b>104</b>
3.4.1 <i>Indicateurs de disponibilité en exploitation</i>	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, $A_0$	106
3.4.2 <i>Sources d'obtention des données</i>	107
3.4.3 <i>Indicateurs de disponibilité pouvant être évalués en conception</i>	107
<b>3.5 Conclusion</b>	<b>108</b>

## **Chapitre 4 Sécurité en conception**

<b>4.1 Introduction</b>	<b>109</b>
<b>4.2 Sécurité et conception</b>	<b>110</b>
<b>4.3 Comment prendre en compte la sécurité dès la conception ?</b>	<b>111</b>
<b>4.4 Etat de l'art et définitions sur la sécurité</b>	<b>112</b>
<b>4.5 Analyse et évaluation des Risque</b>	<b>114</b>
4.5.1 <i>Les mécanismes simplifiés du risque</i>	115
4.5.2 <i>Identification du risque</i>	115
4.5.3 <i>Analyse Evaluation des risques</i>	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
<b>4.6 Méthodes principales du courant de la sûreté de fonctionnement</b>	<b>118</b>
4.6.1 <i>Analyse préliminaire des risques</i>	118
4.6.2 <i>Analyse des modes de défaillance et de leurs effets</i>	119
4.6.3 <i>Analyse par arbre des défauts (ou des causes, des défaillances, des fautes MAC)</i>	121

4.6.4	<i>Analyse par arbre d'événements ou arbre des conséquences (event tree)</i> -----	122
4.6.5	<i>Diagramme causes - conséquences</i> -----	123
4.6.6	<i>Méthode MOSAR (Méthode Organisée et Systémique d'Analyse des Risques)</i> Erreur ! Signet non défini.	
4.7	<b>Méthode d'intégration de sécurité dans la conception.</b> _____	127
4.7.1	<i>Une intégration de la sécurité dans la conception d'une machine par des voies « directes » et « indirectes » (De la Garza 2005).</i> -----	127
4.7.2	<i>Une sécurité portée par le collectif des concepteurs et l'organisation de retours d'expériences (De la Garza 2005).</i> -----	128
4.7.3	<i>La notion barrière de sécurité</i> -----	130
4.7.3.1	<b>Classification des barrières</b> .....	130
4.7.3.2	Classification de barrières par fonction .....	130
4.7.3.3	<b>Classification des systèmes de barrières</b> .....	131
4.7.3.4	<b>Critères de performance des barrières</b> .....	132
4.7.3.5	<b>Analyse des barrières assistée par ordinateur</b> .....	133
4.7.4	<i>TRIZ (Théorie de la Résolution des Problèmes d'Invention)</i> -----	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	<b>Modèle d'intégration de la sécurité au stade de conception</b> _____	135
4.8.1	<i>Phase de planification et identification des besoins.</i> -----	136
4.8.2	<i>Phase conceptuelle</i> -----	137
4.8.3	<i>Phase architecturale</i> -----	139
4.8.4	<i>Phase détaillée.</i> -----	140
4.9	<b>Conclusion</b> _____	142
	<b>Conclusion générale</b> _____	143
	<b>Références Bibliographiques</b> _____	146