كلية العلوم و التقنيات فاس
ⵜⴰⵖⵉⵡⴰⵏⵜ ⵏ ⵜⵎⴰⵙⵙⴰⵏⵉⵏ ⴷ ⵜⵙⵏⵉⴳⵉⵜⵉⵏ
Faculté des Sciences et Techniques de Fès

جامعة سيدي محمد بن عبد الله
ⵜⴰⵙⴷⴰⵡⵉⵜ ⵙⵉⴷⵉ ⵎⵓⵃⵎⵎⴰⴷ ⴱⵏ ⵄⴱⴷⵓⵍⵍⴰⵀ
Université Sidi Mohamed Ben Abdellah

Centre d'Etudes Doctorales : Sciences et Techniques de l'Ingénieur

N° d'ordre : 16/2019

THESE DE DOCTORAT

Présentée par

Mlle: SOUAD NABDI

Spécialité : Génie Industriel

Sujet de la thèse : Amélioration de la maintenabilité des systèmes de production dès le stade de la conception, étude de cas d'une éolienne.

Formation Doctorale : Sciences de l'ingénieur Sciences Physiques, Mathématiques et Informatique.

Thèse présentée et soutenue le samedi 04 mai 2019 devant le jury composé de *:*

Nom Prénom	Titre	Etablissement	
El Hassan ELKINANI	PES	Ecole Nationale Supérieure d'Art et Métier de Meknès	Président
Abdelhamid EL AMRI	PES	Ecole Nationale Supérieure d'Electricité et de Mécanique de Casablanca	Rapporteur
Abdelali EN-NADI	PES	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	Rapporteur
Lhoussine BEN AZZA	PH	Ecole Nationale Supérieure d'Art et Métier de Meknès	Rapporteur
Anas CHAFI	PH	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	Examinateur
Herrou Brahim	PES	Ecole supérieur de technologies de Fès	Directeur de thèse

Laboratoire d'accueil : Laboratoire Techniques Industrielles.

Etablissement : Faculté des Sciences et Techniques de Fès.

Résumé de la thèse

Dans un environnement mondial fortement concurrentiel, les entreprises doivent maîtriser les différents outils permettant d'assurer une compétitivité maximale et doivent s'engager dans des actions amélioratives à tous les niveaux. De ce fait, la complexité croissante des systèmes et la volonté de diminuer leurs coûts de conception, de développement et d'exploitation, font de la sûreté de fonctionnement une nécessité inéluctable dans le développement de tous les systèmes industriels. En effet, une analyse de cette dernière constitue une approche nécessaire pour l'amélioration de l'exploitation des systèmes en agissant dès les phases amonts de la conception sur les paramètres et les facteurs influençant le bon fonctionnement de ces systèmes, sans oublier la modélisation qui est une phase primordiale dans ce genre d'analyse et la littérature présente plusieurs outils permettant cette modélisation.

Dans cette optique, notre travail consiste à présenter une approche permettant l'évaluation de la maintenabilité en phase de la conception présentée par son indicateur du temps moyen de réparation tout en intégrant les avis des experts pour le choix du paramètre du taux de défaillance. Ainsi, pour réussir son intégration, et afin de soutenir des équipes de conception en séance d'innovation ou des petites entreprises dans le développement de leur produit, nous proposons une démarche méthodologique en se basant sur l'approche TRIZ qui permettra de résoudre la problématique de l'intégration de la maintenabilité en phase de conception préliminaire en générant de nouveaux concepts de solution en temps minime qui constitue une aide à la décision pour les concepteurs en cas de concepts innovants de produit, d'espace ou de processus.

Ensuite, nous allons présenter les réseaux bayésiens comme une solution de modélisation puissante pour les systèmes complexes permettant de fusionner des connaissances de natures variées au sein d'un même modèle. Dans cette logique, nous allons les présenter comme outils de modélisations de la SdF tout en présentant un état de l'art sur l'utilisation de cette méthode en analyse de la sûreté des systèmes. L'approche proposée a prouvé sa vigueur dans l'étude de cas pour l'aide au choix entre deux systèmes éolien et pour prédire la maintenabilité et la disponibilité des systèmes dans un but de les optimiser à long terme.

Mots clés *sûreté de fonctionnement, conception, maintenabilité, disponibilité, innovante, TRIZ, Réseaux Bayésien, Système éolien, optimisation, routinière.*

Centre d'Etudes Doctorales : Sciences et Techniques de l'Ingénieur

DEDICACES

A mes très chers parents

A mes précieuses sœurs

A tous ceux qui me sont chers

Je dédie le fruit de mes efforts durant cette longue démarche

Centre d'Etudes Doctorales : Sciences et Techniques de l'Ingénieur

REMERCIEMENTS

Je remercie et témoigne mes reconnaissances particulières envers mon directeur de thèse,Monsieur le Professeur Brahim HERROU, de m'avoir accueilli dans son équipe et m'avoir fait confiance. Je tiens à le remercier pour les conseils, l'accompagnement et l'encouragement qu'il m'a accordé jusqu'à la fin de cette thèse.

Je tiens également à remercier le directeur de mon laboratoire d'acceuil Monsieur le Professeur Mohammed EL HAMMOUMI pour sa disponibilité irreprochable.

J'exprime mes sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué à rendre mon aventure doctorale aussi instructive et fructueuse et pour tous ceux qui ont œuvré à la mise sur pied de cette thèse. Je pense notamment aux nombreux enseignants qui m'ont transmis leur savoir tout au long de mon parcours.

TABLE DE MATIERE

Table de matière ..... **II**

INDEX DES FIGURES ..... **V**

INDEX DES TABLEAUX ..... **VII**

Liste des acronymes ..... **VIII**

Introduction générale ..... **I**

Chapitre1 : Etat de l'art : définition des concepts **1**

I. Introduction ***1***

II. Contexte, besoin industriel et problématique de l'étude ***1***

1. Contexte et besoin industriel 1

2. Contexte et problématique de l'étude 3

III. Conception système ***6***

1. Complexité du système 6

2. Vue structurelle ou statique 7

3. Vue temporelle ou dynamique 7

4. Approche systémique et ingénierie système 8

5. Performance d'un système 10

IV. Définitions et types de conception ***11***

1. Définitions 12

2. Typologies de conception 14

V. Approches et méthodes de modélisation en conception ***15***

1. Approches traditionnelles de conception 16

2. Importance des méthodes 38

3. Sous-utilisation en pratique 39

4. Guides existants pour l'aide à la sélection des méthodes 40

VI. Comparaison et choix d'approche ***41***

1. Processus de sélection 42

2. Facteurs influençant le choix des méthodes 46

2.1. Facteurs liés au contexte 46

2.2. Facteur propres aux méthodes influençant le choix 49

VII. Sureté de fonctionnement : définitions et paramètres..... 49

1. Définitions 50

2. Approches d'analyse de sûreté de fonctionnement..... 51

2.1. Approche quantitatives/quantitatives 52

2.2. Approche inductives/déductives 52

2.3. Approche statique/dynamique 52

3. Analyse et modélisation fonctionnelles 53

3.1. Acquisition des informations 53

3.2. Méthodes fonctionnelles 54

4. Paramètres de la sûreté de fonctionnement 55

4.1. La fiabilité..... 55

4.2. La maintenabilité 55

4.3. La disponibilité 56

4.4. La sécurité..... 56

4.5. Données métriques de la sûreté de fonctionnement 56

5. Méthodes d'analyse de la sureté de fonctionnement 58

5.1. Analyse de fonctionnement/ dysfonctionnement 58

5.2. Analyse de fonctionnement/dysfonctionnement par les outils de la théorie stochastique 60

VIII. Conclusion et synthèse de l'état de l'art 61

Chapitre 2 : Contribution à l'intégration de la maintenabilité en phase de conception préliminaire..... 64

I. Intégration de la maintenabilité en conception préliminaire dans le cas d'une conception routinière par une modélisation Bayésienne 64

1. Introduction 64

2. Approche bayésienne : définitions et historique..... 66

3. Calcul des indicateurs de sûreté de fonctionnement..... 68

4. Modélisation d'un système multi-états par un réseau bayésien..... 69

5. Conclusion et synthèse 72

II. Intégration de la maintenabilité en conception préliminaire dans le cas d'une conception innovante en se basant sur l'approche TRIZ 73

1. Introduction 73

2. Approche d'évaluation et de validation de la maintenabilité en conception préliminaire 73

3. Contribution à l'intégration de la maintenabilité en conception préliminaire en se basant sur TRIZ 81

III. Conclusion et synthèse 87

Chapitre 3 : Modélisation et intégration de la maintenabilité en phase de conception préliminaire pour un système éolien..... 89

I. Position du problème..... 89

II. éoliennes : Etat de l'art et analyse fonctionnelle 92

1. Définition et types d'éoliennes 92

2. Contexte général : AMDE et décomposition fonctionnelle 94

3. Positionnement du Maroc par rapport au marché éolien mondial 99

4. Conclusion et synthèse 103

III. Modélisation et évaluation de la maintenabilité d'un système éolien dans le cas d'une conception routinière 103

1. Modélisation d'un système éolien en phase de conception préliminaire par une approche bayésienne 103

2. Evaluation de la maintenabilité et la disponibilité de l'éolienne 107

3. Déterminer les composants pénalisants la disponibilité 110

4. Conclusion et synthèse 113

Conclusion générale..... 114

Références bibliographique 118

PRODUCTION SCIENTIFIQUE..... 124

INDEX DES FIGURES

***Figure 1**: Positionnement des travaux par rapport aux sciences de la conception 2*
***Figure 2**: Processus de conception selon Mougenot [9] 3*
***Figure 3**: Répartition des couts/délais sur les gains 4*
***Figure 4**: Répartition des couts engages pour un projet donne [1] 4*
***Figure 5**: Répartition des coûts d'un projet et cout engendre par une modification 5*
***Figure 6**: Système complique et système complexe 7*
***Figure 7**: Mesure et pilotage de la performance 11*
***Figure 8**: Modèle du processus de conception, selon Tate and Nordlund [29] 14*
***Figure 9**: Les étapes du processus de conception selon Pahl and Beitz [39] 18*
***Figure 10**: Les étapes de la conception conceptuelle, selon Pahl & Beitz [39] 19*
***Figure 11**: La conception axiomatique selon suh, 1990 ..... 23*
***Figure 12**: Décomposition hiérarchique d'une conception 24*
***Figure 13**: Axiome du minimum d'informations 25*
***Figure 14**: Exemple de matrice QFD 27*
***Figure 15**: Le processus de déploiement du QFD, selon Hauser & Clausing [58] 28*
***Figure 16**: Formalisation générique du processus de l'approche TRIZ [67] 31*
***Figure 17**: présentation de la démarche TRIZ [68] 31*
***Figure 18**: La position de TRIZ dans le processus de développement d'un produit 32*
***Figure 19**: Résoudre un problème par TRIZ [64], [65] 33*
***Figure 20**: Modèle standard de multi-screen a neuf écrans, selon Savransky [81] 34*
***Figure 21**: Matrice de contradiction 35*
***Figure 22**: Mécanismes de sélection des méthodes [90] 41*
***Figure 23**: Phases de cycle de vie du produit 41*
***Figure 24**: Aide à la sélection des méthodes pour la phase de conception générale [100] 43*
***Figure 25**: Aide à la sélection des outils de l'analyse de la valeur [43] 44*
***Figure 26**: Représentations intermédiaires et choix des méthodes [99] 45*
***Figure 27**: Etapes de traduction du besoin jusqu'à la validation de la solution 48*
***Figure 28**: Arbre de la sûreté de fonctionnement 50*
***Figure 29**: Description d'un système 54*
***Figure 30**: Les durées caractéristiques de la SdF 57*
***Figure 31**: Analyse de la sûreté de fonctionnement 58*
***Figure 32**: Démarche de l'approche AMDEC 60*
***Figure 33**: vue globale des thématiques abordées dans l'état de l'art 61*

***Figure 34**: exemple de modélisation par un RB* *67*
***Figure 35**: Système a trois vannes en étages* *70*
***Figure 36**: réseau bayésien par les liens minimaux pour le système des vannes* *71*
***Figure 37** : Structure d'un RB compact* *71*
***Figure 38**: Approche d'évaluation des MTTR en phase de conception avec la prise en compte des avis d'experts [135]* *78*
***Figure 39**: processus de conception en tant que colonne vertébrale de l'innovation* *82*
***Figure 40**: modele pour la resolution de la problematique de l'integration et l'evaluation de la maintenabilite en phase de conception preliminaire .* *86*
***Figure 41**: pourcentage de disponibilité par an de certains parcs éoliens offshore* *90*
***Figure 42**: Répartition du cout d'entretien d'un parc éolien entre les différentes taches* *91*
***Figure 43**: Les composants d'une éolienne* *93*
***Figure 44**: la distribution des défaillances des principaux composants, par rapport au nombre totale de défaillances* *94*
***Figure 45:** la décomposition par unité et sous unité d'une éolienne* *95*
***Figure 46**: Cartographie du vent au Maroc* *100*
***Figure 47**: Projets d'énergie renouvelables réalises 2009-2012* *101*
***Figure 48**: Parc éolien réalise et en cour de développement* *101*
***Figure 49**: Capacité totale installe en 2012 et installations des énergies renouvelables prévues en 2020 [152]* *102*
***Figure 50**: Les éléments constitutifs d'une éolienne indirecte* *104*
***Figure 51**: Représentation d'une éolienne indirecte* *104*
***Figure 52**: Représentation d'une éolienne directe* *105*
***Figure 53**: Réseau bayésien de fonctionnement d'une éolienne indirecte/ directe [156]* *107*
***Figure 54**: Représentation des taux de défaillance des composants des deux systèmes considérés[156]* *111*
***Figure 55**: Représentation des taux de réparation des composants de Vestas 39/500 et Enercon e40 [156]* *111*
***Figure 56**: L'indisponibilité des composants de Vestas 39/500 et Enercon e40 [156]* *112*
***Figure 57**: Les probabilités d'état conditionnel des systèmes considérés [156]* *112*

INDEX DES TABLEAUX

***Tableau 1**: Les 40 principes d'innovations de la méthode TRIZ 29*
***Tableau 2**: Les 39 critères de conception 30*
***Tableau 3**: Matrice de contradiction 30*
***Tableau 4**:Comparaison des methodes durant processus de developpement systeme 39*
***Tableau 5**: Familles de méthodes de conception 42*
***Tableau 6**: Synthèse des exemples de guides de sélection des méthodes 46*
***Tableau 7**: L'impact du contexte sur la gestion de l'innovation[101] 47*
***Tableau 8**: Les facteurs du contexte qui influencent la sélection des méthodes 49*
***Tableau 9**: facteurs lies aux méthodes influencant la selection 49*
***Tableau 10**: Famille de méthode et son classement 52*
***Tableau 11**:Classifications des indicateurs de maintenabilité 74*
***Tableau 12**: Analyse AMDE d'un système éolien 96*
***Tableau 13**: Les taux de pannes et de réparations des systèmes considérés 107*
***Tableau 14**: Spécifications techniques des systèmes considérés 108*
***Tableau 15**: Calcul de probabilité de fonctionnement et de panne des composants du système Vestas 39/500 ..... 109*
***Tableau 16**: Calcul de probabilité de fonctionnement et de panne des composants du système Enercon E40 ..... 109*
***Tableau 17**: Table de probabilité conditionnelle des deux systèmes considérés 110*
***Tableau 18**: Table de probabilité des deux systèmes considérés 110*

LISTE DES ACRONYMES

MCc : Coût moyen par activité corrective

MCp : Coût moyen des activités préventives par heure de fonctionnement

Mc : Coût moyen des activités par heure de fonctionnement

$\boldsymbol{MCci}$: Coût de l'activité corrective sur le composant i

$\boldsymbol{MCpj}$: Coût de l'activité préventive j

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

MLHc : Temps moyen de main d'œuvre par activité corrective

$\boldsymbol{MLHp}$: Temps moyen de main d'œuvre par activité préventive

$\boldsymbol{Mcti}$: Temps de maintenance corrective du composant i

$\boldsymbol{Nci}$: Nombre d'opérateurs affectés à l'activité corrective du composant i

$\boldsymbol{M}$**ptj** : Temps d'exécution de l'activité préventive j

$\boldsymbol{N}$**pj** : Nombre d'opérateurs affectés à l'activité préventive j

MTBM : Temps moyen entre les actions de maintenance

MTPM : Temps moyen entre les actions de maintenance préventive

MTBF : Le temps moyen entre pannes

Mpt : Moyenne des temps de maintenance préventive

$\mathbf{M_{moy}}$: Moyenne des temps actifs de maintenance

MTTR : Temps moyen de réparation

$\boldsymbol{f_i}$: Fréquence de l'activité préventive j

$\boldsymbol{\lambda}$: Taux de panne du système

$\boldsymbol{f}$: Taux d'activités de maintenance préventive du système

APR : Analyse préliminaire de risque

SdF : Sûreté de fonctionnement

INTRODUCTION GENERALE

De nos jours, dans tous les secteurs d'activité la problématique de compétitivité industrielle occupe une importante place. Le coût et la qualité des systèmes subissent plus de pression dans les prochaines années pour faire face à la concurrence d'où le besoin d'innover .

Cependant, l'innovation est de diverses natures et la quête permanente à chercher de nouvelles solutions à des problémes techniques dès la phase de conception tient une part significative et constitue la majorité des innovations dites radicales surtout quand il s'agit des innovations sur des produits. Souvent les méthodes classiques déstinées à résoudre ce genre de problématique sont de caractère psychologique y compris l'exemple le plus connu du brainstorming.

Il est indispensable de prendre en compte la dimension sûreté de fonctionnement et de valoriser chaque projet de création dans tous les modèles de création d'objets.

Par ailleurs, le développement d'un nouveau produit/système est considéré par les entreprises comme étant une activité centrale pour le developpement de la performance à long terme. En effet, le marché exerce une forte pression sur les sociétés industrielles et la conception est devenue de plus en plus une source indispensable de compétitivité pour ces dernières afin de faire face à cette pression qui se traduit par la réduction des cycles de développement, par l'apparition de nouvelles technologies et d'assurer une fiabilité optimale du produit développé. Cette pression et compétitivité du marché pousse les chercheurs à s'attacher au développement des modèles, méthodes, outils et techniques pour optimiser les performances et supporter les processus de conception et d'innovation de plus en plus dans un monde complexe et changeant.

De ce fait, une analyse de la sûreté de fonctionnement constitue une approche nécessaire pour l'amélioration de l'exploitation des systèmes en agissant dès les phases primaires de la conception sur les paramètres et les facteurs influençant le bon fonctionnement de ces systèmes. En effet, la modélisation est une phase primordiale dans ce genre d'analyse et la littérature présente plusieurs outils permettant cette modélisation. La définition des paramètres définissant la loi jointe en sûreté de fonctionnement est très difficile car les informations sont peu disponibles. C'est pour cette raison que pour construire un modèle structuré les outils de modélisations se basent sur les avis d'experts et les bases de données des constructeurs. Ainsi, il est indispensable de donner une grande importance aux paramètres

de la sûreté de fonctionnement en plus des facteurs liés à l'optimisation des ressources et l'utilisation des matériaux en phase de conception et plus précisément à la maintenabilité d'un système réparable.

L'objectif principal de notre recherche de thèse est de modéliser le processus de conception avec une prise en compte de la sûreté de fonctionnement dans les phases amont dans une vision de les optimiser. Durant les lectures bibliographiques, nous avons remarqué que les méthodes de conception sont présentées comme langage de modélisation par combinaison avec la sûreté de fonctionnement. Ainsi, l'étude bibliographique montre que le coût du projet est estimé à 75% en phase de conception et à 95% en phase de développement dans sa globalité [1] . Dans cette optique, nous avons pu dégagé un axe considérable d'optimisation qui concerne principalement l'optimisation du processus de conception en le combinant avec la sûreté de fonctionnement et son intégration en phase préliminaire dans un but principal d'évaluation et d'optimisation de ses paramètres.

De ce fait, notre travail de recherche se focalise sur le développement d'une approche combinant la conception dans ses phases amonts et la sûreté de fonctionnement pour les deux cas de figues à savoir une conception routinère et celle innovante.

Dans cette optique, les réseaux bayésiens constitue une solution de modélisation considérable pour les systèmes complexes qui permet de combiner plusieurs connaissances de diverses natures dans le même modèle. Et pour réussir son intégration, et afin d'assister des équipes de conception en séance de créativité ou des petites entreprises dans le développement de leur produit, nous proposons une démarche méthodologique en se basant sur les réseaux bayésiens pour une conception routinière et sur l'approche TRIZ qui à son tour permettra de résoudre la problématique de l'intégration de la maintenabilité en phase de conception préliminaire en générant de nouveaux concepts de solution en temps réduit qui constitue une aide à la décision pour les concepteurs en cas de concepts innovants de produit, d'espace ou de processus.

Pour aboutir à notre but, nous avons défini un certain nombre d'objectifs intermédiaires à franchir. La première étape consiste à définir les notions de base relatives aux différentes méthodes de conception et celles de sûreté de fonctionnement. Et plus précisement le vocabulaire de modèle, de méthode et des outils techniques. Puis, nous interessons à connaitre d'une façon plus détaillée la nature des méthodes de conception exploitées dans différents projet et également les méthodes de sûreté de fonctionnement existantes et quelles sont les conditions pour lesquelles les spécialistes utilisent une et écartent d'autres.

Finalement, à travers notre recherche bibliographique nous avons pu définir notre problématique de recherche qui s'articule sur **Comment intégrer le paramètre maintenabilité de la sûreté de fonctionnement en phase amont de conception pour assurer un cycle de développement optimal d'un produit/système ?.**

Dans le but de concrétiser notre démarche proposée, une étude de cas a été faite sur un système éolien en se basant sur des données extraites du terrain au sein d'un parc éolien en europe.

Pour supporter notre argumentation ce manuscrit est organisé en trois chapitres résumés comme suit :

Chapitre I : Etat de l'art : définition des concepts

Ledit chapitre a été conduit selon différents volets. En effet, nous allons présenté dans un premier volet une taxonomie pour définir les notions de base essentielles abordées dans notre recherche tout en mentionnant celles de méthodologies, les modèles, méthodes, outils et techniques que ce soit pour la conception ou pour la sûreté de fonctionnement.

Ensuite, nous allons présenté les différentes méthodes de conception et celles de sûreté de fonctionnement existantes selon leurs utilisations.Ainsi, nous définissons les paramètres de sûreté de fonctionnement tout en mettant le point sur la problématique de combiner conception et sûreté de fonctionnement pour l'optimisation de la maintenabilité, la disponibilité et par conséquence le cycle de développement d'un produit.

Chapitre II : Contribution à l'intégration de la maintenabilité en phase de conception préliminaire

Dans le chapitre II, nous exprimons de manière précise et concise la question centrale de notre recherche. En conséquence, nous avons deux hypothèses de recherche à savoir, l'intégration de la maintenabilité en phase de conception préliminaire pour le cas d'une conception routinière pour laquelle nous avons une base de données sur un produit existant dans un but de l'optimiser. La deuxième hypothèse, est l'intégration et l'évaluation de la maintenabilité en phase préliminaire de conception en se basant sur l'approche TRIZ pour le cas d'une conception innovante dans le but de générer des solutions innovantes.

Chapitre III : Modélisation et intégration de la maintenabilité en phase de conception préliminaire pour un système éolien

Le troisième chapitre est décomposé en deux parties, une consacrée à la présentation des énergies éoliennes dans un context mondial et marocain afin de justifier notre choix d'étude de cas. Ensuite, une deuxième partie qui concrétise notre recherche par l'application de notre modèle Bayésien proposé sur deux systèmes éoliens, un à entrainement direct et l'autre à entrainement indirect, dans le but de faire un choix entre les deux systèmes en se basant sur une prédiction de maintenabilité et de disponibilité et pour dégager les composants pénalisants chaque solution choisie.

Premier chapitre

Etat de l'art : Définition des concepts

CHAPITRE1 : ETAT DE L'ART : DEFINITION DES CONCEPTS

I. INTRODUCTION

Nous allons présenter dans ce chapitre l'état de l'art de notre travail vis-à-vis du génie industriel d'une part, et par rapport au domaine de la conception et l'innovation des systèmes d'autre part. Ensuite nous allons présenter un état de l'art des différents concepts traités dans ledit travail sous différents angles. Nous allons cloturé le chapitre à la fin par une conclusion et une synthèse de l'état de l'art qui prendera en susbstance les éléments essentiels des différentes parties et les enjeux de cette recherche.

II. CONTEXTE, BESOIN INDUSTRIEL ET PROBLEMATIQUE DE L'ETUDE

1. CONTEXTE ET BESOIN INDUSTRIEL

La définition du génie industriel selon l'institut américain du génie industriel se focalise sur le fait que le génie industriel englobe à la fois la conception, l'amélioration et l'installation des systèmes [2]« *Le génie industriel concerne la conception, l'amélioration et l'installation de systèmes intégrés mettant en jeu des hommes, des matériaux, des équipements et de l'énergie. Il s'appuie tant sur les connaissances spécialisées et les aptitudes dans le domaine des mathématiques, de la physique et des sciences sociales que sur les principes et méthodes des sciences de l'ingénieur, ceci pour spécifier,prédire et évaluer les résultats de ce type de système.* », Cette définition met en évidence la pluridisciplinarité d'un tel domaine, qui exploite à la fois les concepts et les méthodes de pensées propres aux différents domaines. Gousty [2] présente le génie industriel en tant qu'interface entre tous ce qui est technologie et ce qui est management. Dans cette optique, le génie industriel gère de façon simultanée les fonctions techniques en cohérence avec ceux managériales (planification, organisation, direction et contrôle) durant tout le cycle de vie du système depuis la définition du besoin jusqu'au service après-vente et même jusqu'au recyclage.

Hales et Gooch [3] définissent le génie de la conception en tant que piliers du génie industriel de la façon suivante : *« L'ingénierie de la conception est le processus par lequel une idée ou besoin du marché est transformé en information détaillée qui permette à un produit ou système technique d'être produit. »*

Depuis les années 60 plusieurs écrits ont pu changer la vision traditionnelle qui disait que conception et science sont deux branches séparées, et ils ont montré des passerelles

existaient entre les deux domaines. Ainsi, ils proposent de développer la conception en tant que science « science de la conception ». Tout en découpant le domaine en quatre théories : Systèmes techniques, Sciences humaines et sociales, processus de conception et Méthodologie de conception. Pour conclure que le positionnement de notre étude par rapport aux écrits est bien au croisé du processus de la conception et ses méthodologies, nous avons découpé le domaine de la science de conception en quatre à savoir : « système technique, processus de conception, méthodes de conception et des connaissances techniques débouchées des différentes sciences » .[3], [4]

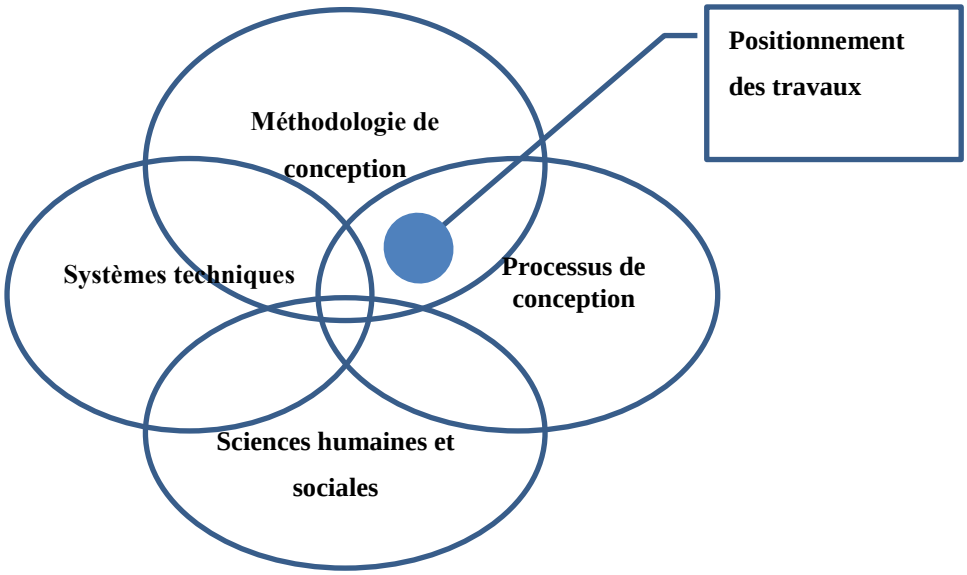


Figure 1: Positionnement des travaux par rapport aux sciences de la conception

L'objectif principal de notre recherche est le processus de conception et les méthodologies de conception en elles-mêmes. En effet, nous avons pour objectif d'adapter à chaque processus de conception une méthodologie adéquate permettant de prendre en compte les paramètres de sûreté de fonctionnement objet de l'étude.

Dans cette optique, nos travaux sont bien d'un coté au sein de la théorie de conception dans le sens de positionner les travaux dans deux cadres un pour le processus d'une conception routinière et l'autre pour une conception innovante, et d'autre coté dans le choix de la méthodologie adéquate pour chaque processus qui permettra l'intégration de la sûreté de fonctionnement dans les premières phases du processus en toute fluidité et objectivité.

Parmis les objectifs tracés pour ledit travail, c'est de viser l'optimisation du processus de conception. En effet, plusieurs recherches sont inscrites dans ce sens parmis eux on trouve

ceux de Aoussat depuis les années 90 [5]–[8] et ceux de Mougenot [9]. Les axes de ces recherches sont centrés sur les étapes amont de la conception, les étapes pendant lesquelles les produits sont présentés d'une façon floue et imprécise. De ce fait, quand on parle d'une phase amont, on parle bien du passage d'une idée et besoin (état immatériel) à la maquette et prototype (état matériel). D'une autre vision, c'est le regroupement de deux principales phases, celles de définition, planification et validation du concept et celles de conception architecturale et la génération d'un prototypage.

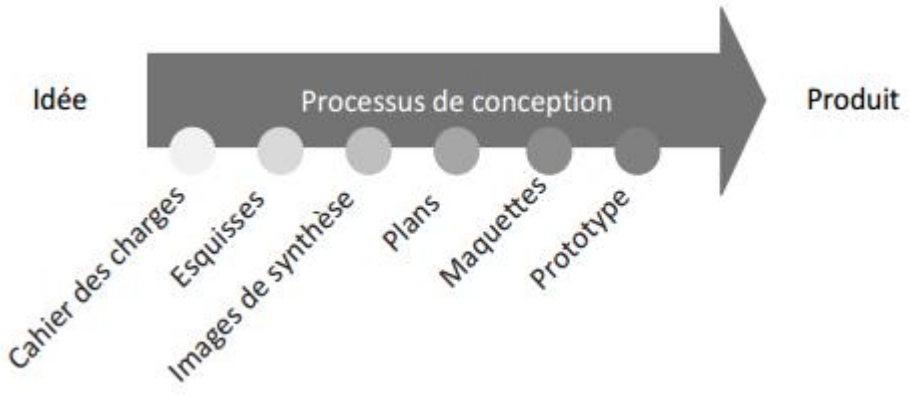


Figure 2: Processus de conception selon Mougenot [9]

2. *CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE DE L'ETUDE*

Pour bien définir la problématique de l'étude un enjeu économique au choix des méthodes de conception dans l'industrie s'impose. Il faut bien évidement prendre en compte les enjeux de la conception et autres facteurs en parallèle à savoir le rôle de chaque méthode dans la formalisation du processus de conception que ce soit routinière ou innovante ainsi que son utilisation insuffisante dans les industries. Tout en s'assurant des bénéfices attendus d'une intégration de la sûreté de fonctionnement en phase amont de conception par rapport aux industriels.

Dans cette optique, les industries considèrent la conception comme étant une phase décisive pour le succès d'un projet. Pour cela, ils effectuent un lien direct entre agir sur le chiffre d'affaire et le gain de temps en conception, et comme démontré dans les écrits, 30% des pertes sont dû à un retard de six mois de la mise d'un produit sur le marché. (Figure 3)

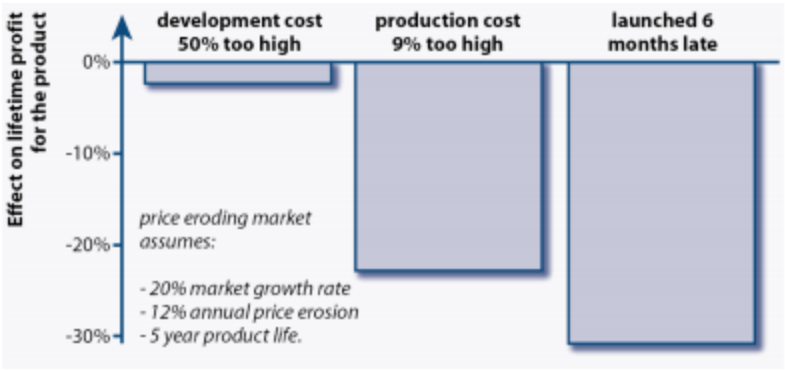


Figure 3: Répartition des couts/délais sur les gains

Comme cité ci-dessus, il existe bien évidement une relation de cause à effet entre la mise du produit sur le marché et son temps de développement, mais aussi les décisions prises en amont du projet auront un impact significatif sur les coûts. L'étude de Tichkiewitch montre que le projet définie 80% de ses coûts totaux en phase de conception. A cet effet, plus le projet avance plus les modifications sont plus couteuses et la possibilité d'avoir une modification dans la phase pré-étude semble moins couteuse.

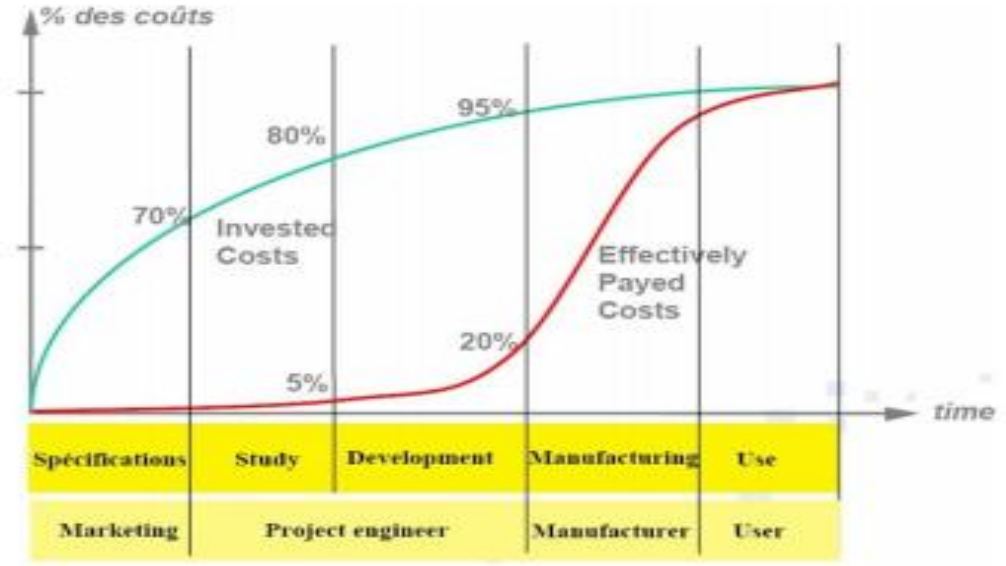


Figure 4: Répartition des couts engages pour un projet donne [1]

On résume cette notion par rapport au coût engendré par la conception comme suit :

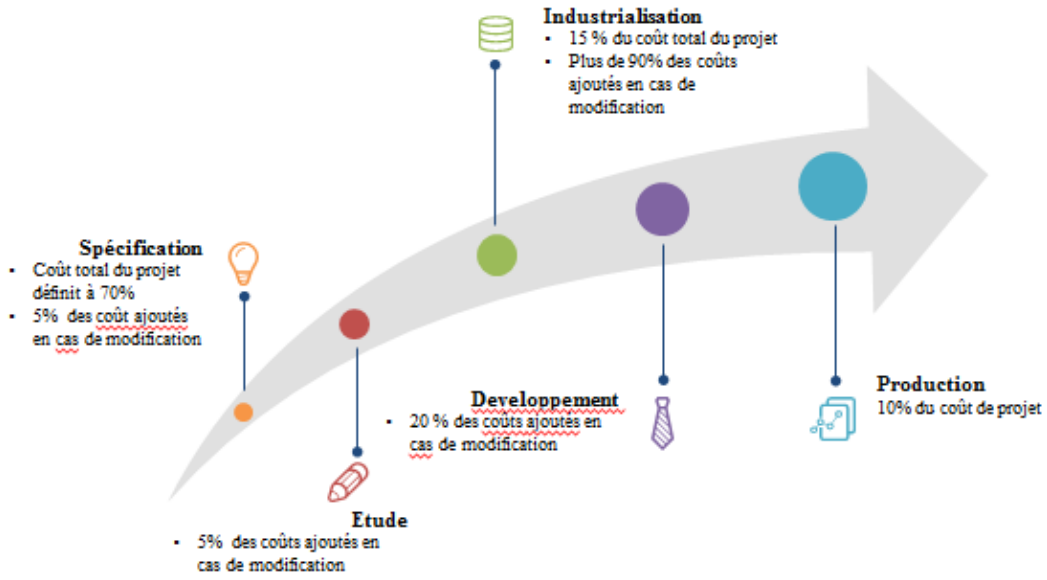


Figure 5: Répartition des coûts d'un projet et cout engendre par une modification

Agir dans la phase préliminaire de conception permet d'innover, en d'autres termes c'est le moteur de l'innovation. En adoptant cette vision, on perçoit bien les enjeux de la conception sur le triplet coût, qualité et délai, ainsi sur l'emplacement de l'industrie dans ce monde compétitif.

La complexité de la conception se situe à plusieurs niveaux, que ce soit celui du produit, de son processus de développement ou celui de son environnement, en d'autre termes tous ce qui est concurrence, règlementation, normes, marché,…etc. La source de cette complexité est l'intégration ou l'amélioration de nouvelles fonctionnalités dans le système, les concepteurs doivent aussi prévenir les contraintes tout au long du cycle de vie. Ce qui augmente les risques qui poussent les concepteurs à faire recours aux différentes méthodes de conceptions qui permettent de structurer les plans d'actions pour atteindre un objectif prédéfini.

III. CONCEPTION SYSTEME

1. COMPLEXITE DU SYSTEME

La littérature présente plusieurs définitions de la notion du système dans différents domaines. A la fois présente un système comme un « ensemble déterminé d'éléments discrets (composants, constituants) interconnectés ou en interaction » [10].

Cette définition a l'avantage d'une certaine génécité et peut être étendue pour exprimer la complexité du système. Formé d'éléments en interaction dynamique eux avec une frontière selon une répartition de 75% pour la conception, 15% pour l'industrialisation et 10% pour la production. En effet, un système peut être considéré comme étant une boite noire de la part de son environnement avec des entrées et des sorties pour définir le fonctionnement de l'intérieur.[11]

Un système peut être considéré de plusieurs façon :

- De l'intérieur, par decortiquer :
  - ✓ Les caractéristiques physiques (décomposition organique en sous-système et composants)
  - ✓ Les modes d'organisation (relationnelles, hiérarchiques,…)
  - ✓ Les propriétés (autonomie, robustesse, vulnérabilité,…)
  - ✓ Le comportement (dynamique d'évolution, productivité,…)

Plusieurs formes de classification existantes :

- Fonctionnels (le système fait quoi)
- Structurels (qui fait quoi dans le système)
- Comportementaux (comment le système se developpe)
- Technologiques ou physiques

La nature des interactions entre les éléments peut caractériser la compléxité d'un système.

La complexité est décrite de plusieurs façons, on retiendra la définition de Moigne [12] qui présente un tel système comme « *un ensemble d'éléments liés entre eux, et cette interdépendance crée des propriétés qui n'apparaissent pas dans les spécificités des éléments eux-mêmes.* ».

Il est à noter qu'il existe une différence entre système complexe et système compliqué. En effet, dans un système compliqué, les relations entre les composants sont simples, de type arborescence [13].

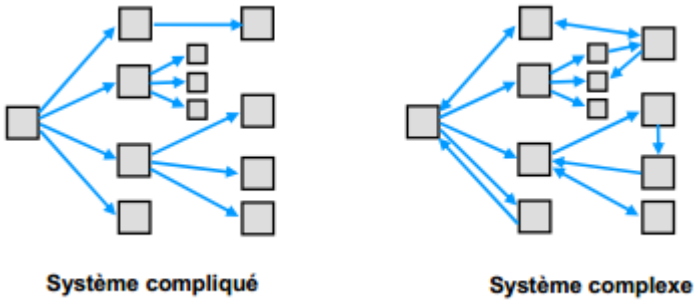


Figure 6: Système complique et système complexe

Pour mieux comprendre un système compliqué, nous pouvons le décomposer en éléments simples (figure 6). Par contre, dans un système complexe, les relations entre les composants comportent des « boucles », le système est non décomposable sous crainte de confusion de la compréhension.

On distingue la compléxité liée à l'architecture du système de celle propre aux intéreferences entre composants ou avec l'environnement du système ce qui rend indispensable de considérer le système sur les deux plans structurels et temporels.

2. *VUE STRUCTURELLE OU STATIQUE*

Il existe trois manières pour définir la structure d'un système, à savoir :

- ***Fonctionnelle :*** décomposer les fonctions opérationnelles d'un système en sous fonctions
- ***Organique :*** cette vue vise à identifier la décomposition hiérarchique des différents constituants jusqu'au niveau physique élémentaire
- ***Organisationnelle :*** vise à intégrer les aspects hiérarchiques et relationnels pour définir les modes d'organisation relatif à un système donnée

3. *VUE TEMPORELLE OU DYNAMIQUE*

La dynamique de système caractérise à la fois son fonctionnement et son évolution (adaptation du système à la mission assurée ou à l'environnement).

Nous pouvons caractériser cette dynamique sous trois formes temporelles à savoir:

- Continue
- Discrete à dates fixes
- Discrete propre au système (obsérvée à l'instant de discontinuités de fonctionnement)

La notion de boucle de pilotage induit trois fonctions principales :

- La récupération d'informations à partir de capteurs correctement positionnés
- La mésure de l'écart entre paramètres courants et les paramètres à atteindre
- La régulation du système, réalisée par injection de nouveaux paramètres déduits des facteurs de corrections

Le pilotage du système peut être effectué par anticipation ou interaction, le système est alors contrôlé en boucles ouverte par des informations prises sur ses entrées.

Il peut aussi être régulé en boucle fermée par des informations prises sur ses sorties selon des principes de rétroaction.

4. APPROCHE SYSTEMIQUE ET INGENIERIE SYSTEME

Nommée de théorie du système général par Moig [12], la systémique et les sciences dont elle dérive, reposent sur la notion de système qu'il convient de définir. La définition de Rosn [14] semble être la plus satisfaisante : « *un système est un ensemble d'éléments en interaction dynamique, organisé en fonction d'un but* ». La systémique s'attache à comprendre un système complexe selon :

- L'analyse globale du système plutôt que l'analyse des éléments du système pris séparément
- La mise en évidence des interactions au sein du système qui traduisent le comportement du système et ses arborescentes
- L'organisation du système en différentes parties qui évoluent et se transforment pour atteindre un but qui leur est propre. La jonction de ces parties apporte de nouvelles propriétés au système permettant sa représentation en plusieurs niveaux organisationnelles et fonctionnelles

L'approche systémique vise donc à percevoir et comprendre les systèmes dans leur complexité, leur dynamique et leur évolution.

La croissance de complexité des systèmes impliquerait souvent de considérer le système dans une vue d'ensemble, ce qui est rarement possible.

L'approche systémique permet de rendre intelligible un système qualifié de complexe par la construction d'un modèle simple de ce système. Cette opération de modélisation permet d'introduire des connaissances sur un système complexe, dans l'objectif d'entreprendre des actions futures sur ce système.

La démarche de modélisation est définit par Moig [12] en neuf niveaux positionnés dans un référentiel « Espace, Temps, Forme ». Pour mieux modéliser un système, on peut considérer les niveaux suivants du système :

- Passif et il est reconnaissable par ses frontières avec l'environnement
- Actifs, il est alors caractérisé par des entrées et sorties
- Actifs et régulé (relation de bouclage)
- S'informe, l'information faisant suite à une boucle de rétroaction
- A une mémoire des informations
- Coordonne ses activités d'information, de décisions et d'opérations
- Capable d'imaginer et s'auto organiser

L'ingénierie système est le cadre méthodologique qui formalise l'approche systémique dans le domaine des processus indistriels et organisationnels.

Cette démarche est mise en avant en France par l'AFIS [15] (Association Française d'Ingénierie Système) et, de manière internationale par l'INCOSE (International Council On Systems Engineering).

L'approche systémique est un processus collaboratif et multidisciplinaire de résolution de problèmes. Elle prend en compte tous les domaines et disciplines impliqués dans le cycle de vie d'un système, depuis la conception jusqu'à la mise en exploitation et le recyclage tout en prenant en compte les différents besoins pour développer une solution optimisée à la fois économique, performante et satisfaisante pour toutes les parties prenantes.

Les quatres aspects caractérisant la complexité des systèmes homme-machines basés sur des techniques d'automatisation sont abordées dans les écrits de Blaise et cauffriez [16], [17]

- Aspects fonctionnels
- Aspects comportementaux

- Aspects structurels
- Aspects technologiques

Les connaissances liées au mauvais fonctionnement d'un système nécessitent d'être également prises en compte dans les activités de l'ingénierie système. En effet, les défaillances peuvent apparaître dans un système ou des comportements imprédictibles peuvent émerger et affecter ses performances et sa sécurité, en plus de l'effet des mésusages des utilisateurs et de l'environnement.

Dans le but de prévoir, évaluer et maîtriser ces comportements, l'ingénierie système s'appuie sur les disciplines de sûreté de fonctionnement et la maîtrise des risques.

5. *PERFORMANCE D'UN SYSTEME*

5.1. Définition générale

La performance est définie selon différents auteurs avec des caractéristiques différentes, elle est considérée comme étant une notion complexe qui qualifie et/ou quantifie le résultat de l'engagement du système. Ces caractéristiques sont construites à partir des résultats directement produits et de la manière avec laquelle ces résultats on été obtenus, elle peut revêtir plusieurs formes et concerner différents traits représentatifs du système, dont l'efficacité, l'efficience et l'effectivité, constituent trois principaux critère d'évaluation [18].

- *Efficacité* désigne le fait que l'engagement du système permet d'atteindre le résultat prévu. Les mesures quantifient le rapport entre les résultats fournis et les objectifs assignés. L'efficacité est orientée vers la qualité de la prestation fournie
- *Efficience* ajoute la notion de coût (effort, temps etc) requis pour atteindre ce résultat. Les mesures quantifient le rapport entre les résultats fournis et les moyens engagés
- *Effectivité* désigne le degré d'atteinte des objectifs fixés à moindre coût, tout en améliorant la satisfaction et la motivation des membres de l'organisme. Le concept d'effectivité est fortement lié à la satisfaction vis-à-vis des résultats obtenus

5.2. Mesure et évaluation

L'analyse systémique propose un modèle d'évaluation de la performance issu du modèle de pilotage basé sur la commande par des leviers d'action avec des consignes ou objectifs. [18]

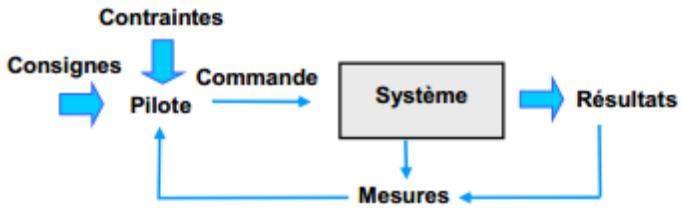


Figure 7: Mesure et pilotage de la performance

Il existe plusieurs types d'évaluation de la performance[18] :

- *Evaluation a posteriori :*elle suppose que le système ait déjà été conçu, l'objectif étant de le piloter par la performance en comparant la mesure avec l'objectif défini. La comparaison permet de définir les actions à entreprendre dans le système
- *Evaluation a priori :* elle a pour objectif de concevoir le système, puis de prévoir son comportement, en utilisant souvent des outils de simulation pour analyser la performance

La mesure de la performance nécessite la mise en place d'indicateurs convenablement sélectionnés.

Nous pouvons considérer un indicateur comme étant une donnée quantitative permettant de caractériser une situation évolutive, une action ou les conséquences d'une action, dans un but d'évaluer et de comparer leurs états à différentes dates [19].

Afin de suivre et évaluer l'efficacité du fonctionnement d'un système, de l'état d'avancement d'un programme ou d'une politique, nous pouvons faire recoure à *Un tableau de bord* qui définit un ensemble d'indicateurs adéquats à chaque cas de figure.

IV. DEFINITIONS ET TYPES DE CONCEPTION

Une méthode de conception est définie dans le domaine de l'ingénierie en tant que procédé qui vise à travers un cahier de charge bien détaillé à formaliser les étapes amonts d'un processus de développement ou d'innovation d'un système dans le but d'adapter le développement aux besoins clients.

La phase de conception permet une description détaillée, le plus fréquemment en utilisant un langage de modélisation dans lequel toutes les exigences et les spécifications fonctionnelles et non-fonctionnelles définies dans le cahier de charge pour le fonctionnement

futur du système sont bien préscrites, afin de faciliter le developpement et la réalisation [16], [20]–[22]. En fonction du niveau de conception, ces exigences prennent différentes formes jusqu'à la phase finale de conception (dans la phase de modélisation, les exigences sont décrites par des relations mathématiques, puis, elles sont traduites par des composants mécaniques et électriques en phase de simulation).

Actuellement, les systèmes les plus utilisés dans les différents usages généraux sont des systèmes techniques complexes. Plusieurs niveaux d'analyse doivent être pris en compte afin de mieux traiter la complexité de la conception. Pour réduire les coûts et le temps de calcul d'un produit à concevoir, il est important de mener un grand effort dès les premières phases du processus de conception.

1. DEFINITIONS

La conception en tant que généralisation du concevoir réfère à la construction d'une généralisation intellectuelle des objets. Il est donc nécessaire d'abstraire les objets afin de construire des concepts ; dès lors, une question se pose : « quels éléments introduire dans la généralisation ? Pourquoi prendre en compte tel constituant d'un objet dans la conceptualisation, plutôt que tel autre ? ». Nous pourrons voir dans des écrits que l'un des axiomes de la modélisation est le point de vue [23] ; dans le cas de la conception, le point de vue dépend de l'objectif de celle-ci et des connaissances existantes. Ainsi la conception est le passage d'un besoin à l'identification d'un concept, orienté par des objectifs à atteindre et limités par les connaissances disponibles et les compétences du concepteurs, afin de reconnaître, dans ce concept, une solution.

La seconde définition réfère à « la compréhension d'un objet, il faut passer d'une idée vague de comportement d'un objet à la compréhension des mécanismes et lois régissant cet objet ». Enfin, la troisième définition réfère à « la visualisation d'un concept, d'une représentation mentale, générale et abstraite d'un objet ». Ces deux dernières définitions vont de pair : il faut comprendre pour construire une bonne représentation. En conception créative de systèmes techniques, il s'agit de passer de l'idée de réalisation d'une fonction, à la compréhension des mécanismes et lois permettant, physiquement, la satisfaction de cette fonction. La conception, dans le cadre de la créativité portant sur des objets techniques.

Il existe de nombreux choix technologiques à valider, en fonction de ce que l'on souhaite réellement séparer, et des ressources à utiliser. Concevoir est donc comprendre les buts, les contraintes et les ressources utiles à la satisfaction d'un objectif. Simon, spécialiste

de l'Intelligence Artificielle, considère la conception en tant que synthèse [24] : « *Cela réfère à concevoir des objets, des processus, des idées pour atteindre des buts, et à montrer comment ces objets, processus, ou idées peuvent être réalisés. La conception est un complément de l'analyse - si l'analyse réfère à la compréhension de propriétés et implications d'un objet, processus ou idée qui a déjà été conçue.* » La norme AFNOR (NF X 50 127) [25] définit la conception comme étant *« Comme étant une activité créatrice permettant de définir un système réalisable et qui répond aux besoins client tout en partant des besoins exprimés et des données déjà existantes* ». Comme évoqué dans la littérature [26], l'activité de conception peut être définie pour désigner une grande variété d'activités. Ce processus de conception industrielle est une démarche analytique, utilisée dans le but d'améliorer la qualité du produit final, ainsi pour de réduire le temps et les ressources nécessaires pour la production finale.

Nous allons définir la conception dans une autre vision, c'est sa vision en tant que processus. En effet, si nous souhaitons formaliser la conception, il nous faut comprendre les différentes activités propres à cette démarche. Depuis les années 1950, la vision de la conception s'est orientée vers la description d'un processus [27], afin d'augmenter son efficience et de contrôler son déroulement. Lawson [28] précise qu'il est aujourd'hui populaire de considérer la conception comme une séquence d'activités, mais que, de plus en plus, il faut considérer non seulement le processus de conception, mais également la pensée créatrice qui le réalise, en s'appuyant sur des approches de conception. Garro définit le processus de conception de la façon suivante dans [23] : « *1. Le processus de conception n'est pas un processus de résolution de problèmes. La différence tient dans le fait que le problème est souvent co-défini avec la ou les solutions. Lorsque des solutions sont déjà bien connues, le problème va être peu évolué. Mais dans le cas d'innovation, la dérive est généralement importante. 2. Le processus de conception est partiellement irréversible. Ceci veut dire que plus le processus est avancé, plus les retours en arrière sont difficiles car ils sont coûteux.*

3. Le processus de conception est mal défini dans le temps. On ne sait pas précisément quand est-ce qu'il commence et où il s'arrête. »

Ces définitions nous montrent toute l'ambiguïté de la définition du processus de conception. En effet, il dépend de nombreux éléments, ainsi dans les écrits de Tate et nordlund [29], le processus de conception est-il défini comme un ensemble d'activités par lesquelles les concepteurs développent et/ou sélectionnent des moyens pour atteindre un ensemble d'objectifs, soumis à des contraintes ?. Le processus de conception se diffère en fonction des moyens disponibles et des objectifs tracés. Tate et Nordlund présentent un

modèle du processus de conception (figure 8) qui est une généralisation de différentes approches de celui-ci, proposées en Europe ou aux Etats-Unis. La terminologie utilisée par Tate et Nordlund est celle de l'approche axiomatique de la conception [30]. L'intérêt de cette modélisation est de faire la distinction entre les conceptions routinières, basées sur les améliorations de produit, et les conceptions inventives, pour lesquelles un processus de formulation de problème et de génération de concepts est essentiel.

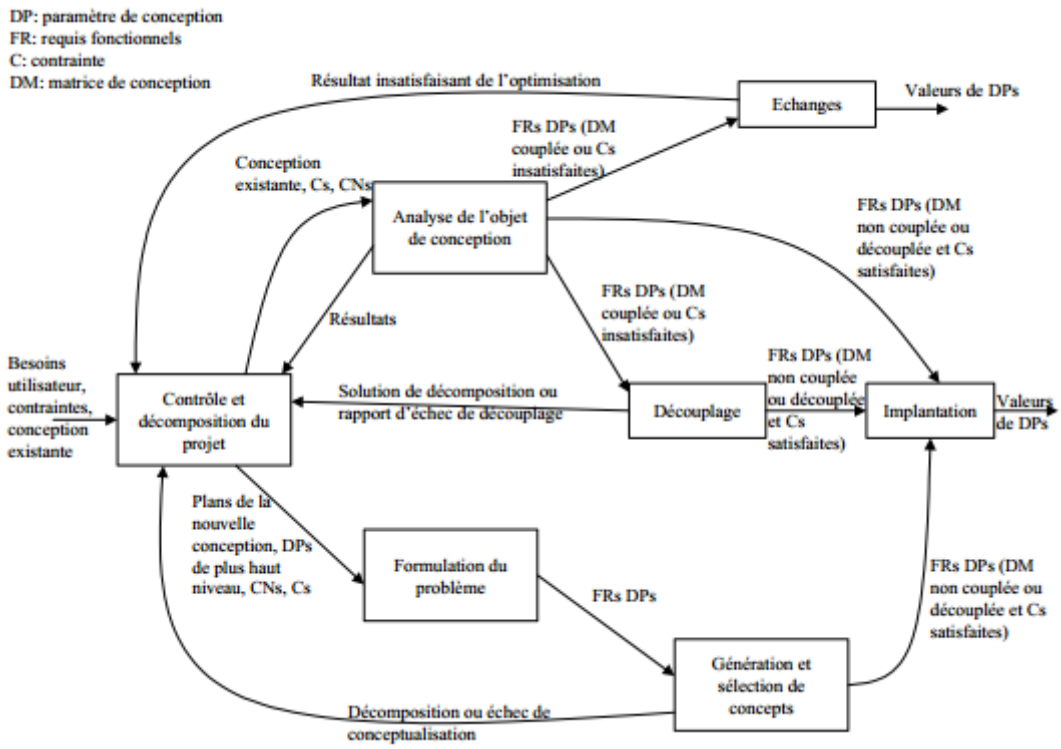


Figure 8: Modèle du processus de conception, selon Tate and Nordlund [29]

2. *TYPOLOGIES DE CONCEPTION*

Kota et Ward [31] ont retenu trois types de conception à savoir : « créative, innovative et routinière ». En effet, la conception routinière ou reconception vise la modification et l'amélioration des caractéristiques d'un système existant. Cependant, la conception créative et innovante vise à décomposer le système d'un point de vus fonctionnelle et de déterminer les principes techniques associées respectivement. [32], [33]

2.1. Conception routinière

La conception routinière concerne l'utilisation de principes de solutions possibles qui sont souvent catalogués. Dans ce type de conception même si le problème

est nouveau les sous problèmes, leurs solutions , les stratégies et les méthodes sont bien connus. La notion du « repeat design » est traitée dans les écrits de Jagodzinski et Culverhouse [34] comme étant une conception qui vise à mettre en place des changements pour réduire les coûts et simplifier une conception existante en utilisant des techniques de conception établies.[35]

2.2. Reconception

La reconception est une situation courante comme a été présenté par Dieter [33], [36]. Elle peut concerner des changements à apporter à un produit commercialisé, nécessitées par de nouvelles exigences ou une carence de performances. Avant son introduction au marché, il est possible de planifier des mises à jour durant le cycle de vie pour assurer sa compétitivité .

2.3. Conception innovante

La conception innovante peut toucher une innovation sur les éléments du produit, une innovation sur son utilisation, une innovation en appliquant de nouveaux procédés de fabrication ou finalement une innovation par la combinaison de tous ces concepts. [33], [37]

2.4. Conception créative

Pour une conception créative, nous ne connaissons ni les attributs ni la méthode [36]. L'élément clé est la transformation de l'inconscient en conscient [21].

V. APPROCHES ET METHODES DE MODELISATION EN CONCEPTION

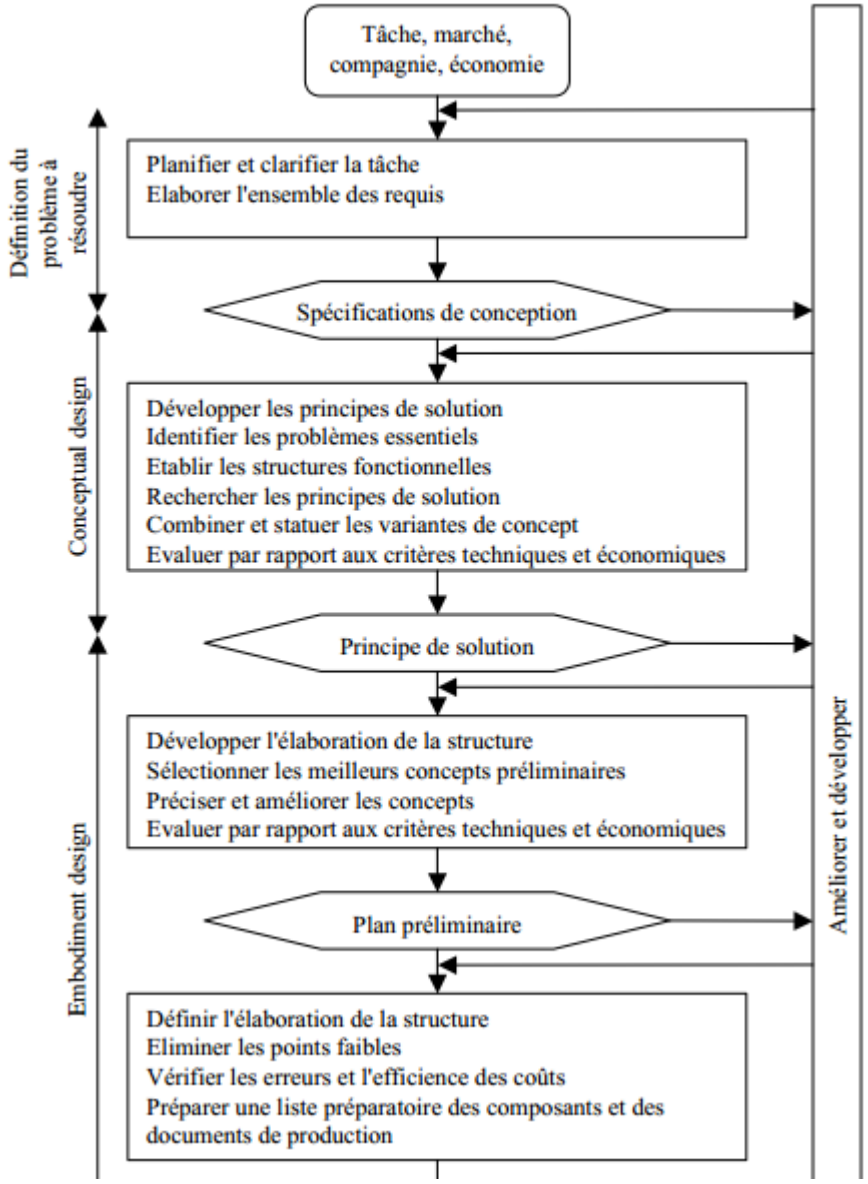
« *Les méthodes de conception sont des outils et techniques utilisés à différentes étapes de la conception. Toutes les méthodes de conception sont des tentatives pour rendre publique la pensée jusqu'alors privée des concepteurs, afin d'externaliser le processus de conception. L'un des avantages majeurs de rendre la pensée des concepteurs publique est que d'autres personnes, tels que les utilisateurs, peuvent savoir ce qui se passe et fournir des informations et points de vue en plus des connaissances et expérience des concepteurs.* » [38] . Dans cette définition des méthodes de conception, les auteurs insistent sur l'intérêt de la formalisation, en vue du transfert de connaissances et d'une lisibilité de l'activité de conception. Les méthodes permettent d'élaborer des démarches structurées, des étapes clairement identifiables et donc, de justifier les résultats obtenus durant le processus de conception, ainsi que les décisions prises aux diverses étapes du processus.

1. APPROCHES TRADITIONNELLES DE CONCEPTION

1.1. L'approche systématique de Pahl et Beitz

L'approche systématique de la conception, proposée par Gerhard Pahl et Wolfgang Beitz [39], [40], repose sur l'étude de la psychologie, de la philosophie et des sciences des facteurs humains. Elle apporte une représentation du processus de conception comme succession hiérarchique de phases. Perrin [27] décrit le modèle de Pahl et Beitz comme un modèle prescriptif, c'est à dire un modèle qui tente de prescrire un patron d'activités meilleur et plus approprié [38]. Par ailleurs au cours du processus de conception, le recueil des informations tend à réduire les alternatives de solutions, le processus est donc convergent. La décomposition du processus de conception (figure 9) repose sur les principales étapes de planification et de clarification des tâches (spécification des informations), la conception conceptuelle (définition des principes), l'expression de la conception (définition des plans) et la conception détaillée (définition de la production). La première phase, de planification et de clarification de la tâche, 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 description du produit à réaliser en termes de fonctions désirées, de coûts, de requis préliminaires. Pour clarifier la tâche, une collecte d'informations est initiée dès cette phase, afin de comprendre de quoi traite réellement le problème : « Quels objectif ou attentes non formulées doivent être pris en compte ? », « Quelles sont les exigences liées au problème ? ». Cette première phase de conception convient à l'établissement du cahier des charges contenant les spécifications techniques et économiques à atteindre. Dans la phase de conception conceptuelle, un concept de solution est formulé sur la base de l'analyse fonctionnelle et des alternatives disponibles, selon un schéma de résolution de problèmes. La conception structurelle permet de définir les formes et les dimensions de la solution. Enfin la phase de conception détaillée est nécessaire pour l'élaboration des documents de fabrication du produit. Il faut noter que le processus n'est pas forcément linéaire, mais des itérations peuvent être nécessaires durant le déroulement du processus. L'approche proposée par Pahl & Beitz est un cadre d'opérations à effectuer dans le but de concevoir avec efficience une solution technique. La modélisation repose sur une description fonctionnelle et économique du produit, par la constitution d'un cahier des charges. Schématiquement, l'approche décrit les actions à réaliser mais ne formalise pas les démarches de réalisation de ces actions. La phase de conception conceptuelle aborde la résolution de problèmes, sur laquelle elle s'appuie pour réaliser la transition entre un cahier des charges et des concepts de solutions satisfaisant

ce cahier des charges. L'un des éléments de base de ce passage est l'abstraction. Nous allons détailler la phase conceptuelle dans la partie suivante.



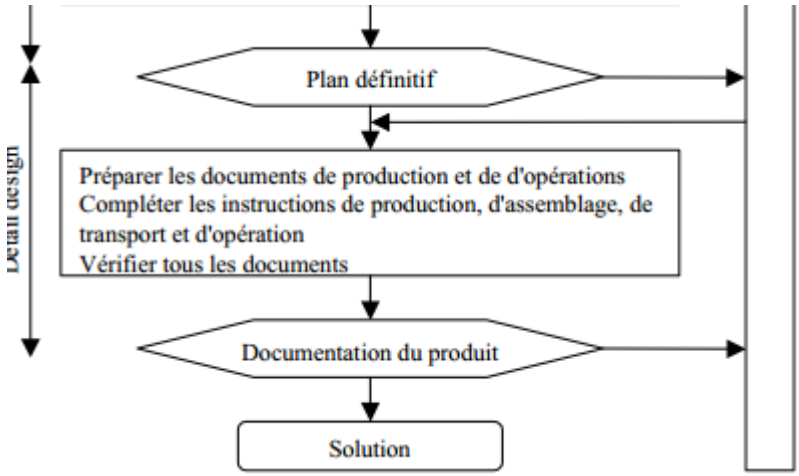


Figure 9: Les étapes du processus de conception selon Pahl and Beitz [39]

La conception conceptuelle est celle durant laquelle sont identifiés et résolus, grâce à une phase d'abstraction, les problèmes clés. L'identification des problèmes se construit sur l'établissement de la structure fonctionnelle, la recherche de solutions de principe et de leur combinaison (figure 9).

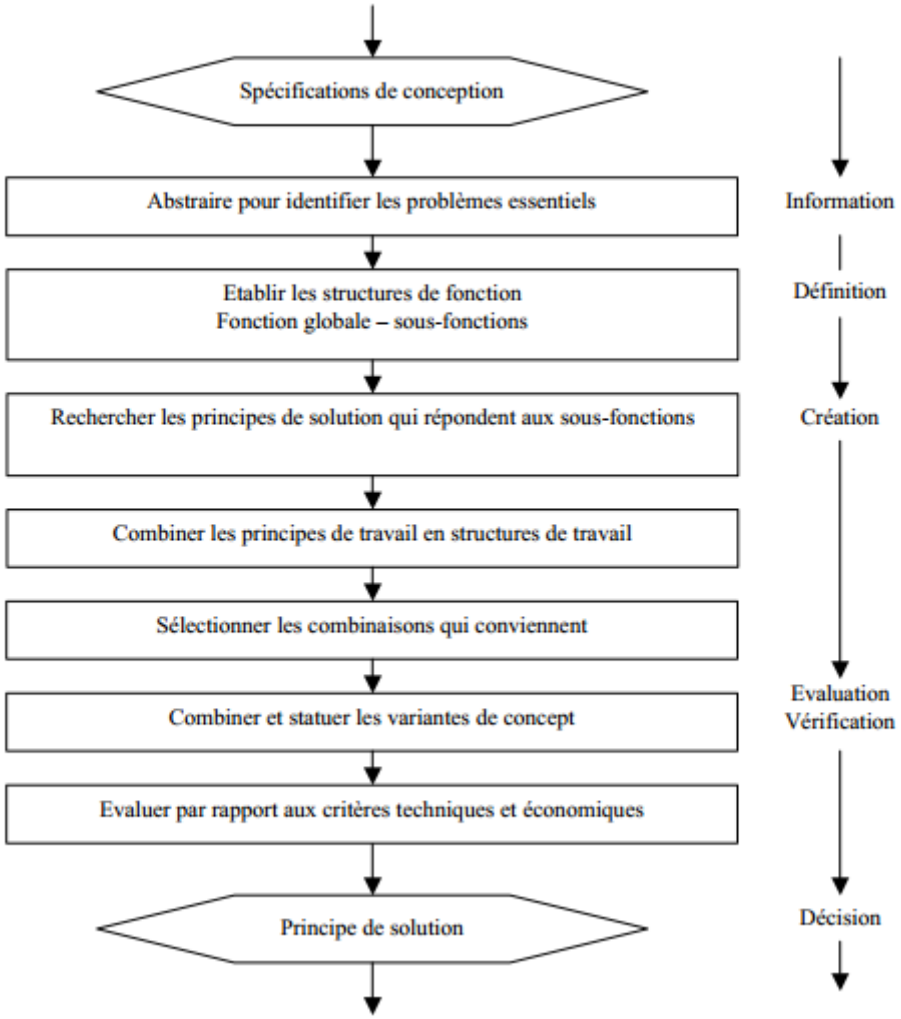


Figure 10: Les étapes de la conception conceptuelle, selon Pahl & Beitz [39]

Dans la recherche de la solution optimale, les concepteurs peuvent être influencés par des idées figées et conventionnelles. Pour dépasser cette fixation, Pahl et Beitz préconisent l'utilisation de l'abstraction ; elle permet de générer des concepts se détachant du domaine d'application, en ne s'attachant qu'à la description des caractéristiques requises pour la solution. Ceci implique de se détacher de ce qui est spécifique au problème, de relever les points génériques et essentiels du problème. Une telle généralisation conduit à l'identification du cœur de la tâche. Une formulation générique adéquate émane clairement la fonction principale et les contraintes essentielles sans pour autant nuire au choix d'une solution particulière. L'utilisation de l'abstraction, accompagné de l'établissement de la liste des requis, permet l'identification des caractéristiques principales du futur produit à concevoir. Pahl et Beitz proposent l'algorithme suivant pour la conduite de cette analyse :

1.Eliminer les préférences personnelles

2. Omettre les exigences n'ayant pas de lien direct avec la fonction et les contraintes essentielles

3. Transformer les éléments quantitatifs en données qualitatives

4. Généraliser les résultats des étapes précédentes

5. 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 pouvant se révéler totalement nouvelles pour le concepteur qui, par le biais de l'abstraction, doit explorer des voies hors de son domaine de compétences. Pahl et Beitz proposent une approche pas à pas de la conception. La méthode s'appuie fortement sur l'aptitude à l'abstraction, la systématisation des tâches et la pensée logique comme compléments aux connaissances professionnelles des concepteurs.

L'apport principal de l'approche systématique est de proposer une démarche méthodique et structurée de la conception. L'approche systématique fournit un cadre méthodologique relativement large, en tant que modèle du processus de conception [41]. Par ailleurs, la systématisation de la démarche permet la capitalisation de certains savoirs métiers afin d'élaborer des catalogues de conception, constituant ainsi une base considérable pour aider à faciliter la démarche de conception. La vision du processus de résolution de problèmes est intégrée aux phases de conception conceptuelle. Par contre, la constitution progressive des données du problème n'est pas totalement formalisée, même si les retours en arrière préconisés sont une manière d'y répondre. Nous pensons que la capitalisation des connaissances relatives au problème se fait tout au long du processus de conception, formant ainsi un processus parallèle. La formulation du problème doit donc permettre d'intégrer toute connaissance apparaissant à un moment donné du processus de conception. Ainsi le passage de la spécification des tâches et caractéristiques à la formalisation de concepts doit être un processus progressif, et itératif. Si cette vision est sous-jacente à l'approche de Pahl & Beitz, elle n'y est pas clairement explicite. Quels sont toutes les informations à recueillir au cours de ce processus ? Quel modèle de représentation des connaissances construire ? Pahl & Beitz se réfèrent à la constitution d'un cahier des charges et mettent en avant l'importance de la

description fonctionnelle des besoins, nous allons décrire l'analyse de la valeur qui est basée sur ces principes et offre une formalisation plus avancée des éléments à capitaliser.

1.2. L'analyse de la Valeur, une approche centrée sur les fonctions

« *L'analyse de la Valeur est une démarche créative et organisée qui utilise un processus de conception fonctionnel et économique, dont le but est d'augmenter la valeur d'un sujet AV.* » ([NF X 50 150-1])[42]. D'après [43], [44] « *L'analyse de la valeur est une méthode de compétitivité organisée et créative, visant la satisfaction du besoin de l'utilisateur par une démarche spécifique de conception à la fois fonctionnelle, économique et pluridisciplinaire* ».

Nous pouvons définir la valeur par le rapport entre la fonction réalisée et le coût engendré par les solutions proposées. La valeur peut donc être considérée comme le rapport de l'aptitude aux fonctions sur le coût des solutions. C'est un axiome qui sucite et organise l'innovation, dont un objectif principal est de satisfaire les besoins clientèls tout en minimisant les dépenses de l'entreprise.

L'analyse de la valeur est basée sur les notions primordiales de fonctions et de ressources. Cette méthode, mise en application par Lawrence D. Miles en 1947 [45], vise à rendre le produit conforme à ce que le client en attend (optimisation des fonctions), en réduisant au strict nécessaire les ressources employées. Les ressources sont les moyens mis en œuvre pour atteindre les objectifs, exprimés en termes de fonctions à rendre par le produit. La norme [NF X 50 152][46] définit le processus d'une étude d'analyse de la valeur en sept phases :

- ***Orientation de l'action Analyse de la Valeur*** : définition de l'objet, des données techniques et fonctionnelles existantes, des limites, contraintes, …
- ***Recherche de l'information*** : inventaire des informations nécessaires
- ***Analyse des fonctions et des coûts***, ***validation des besoins et des objectifs*** : réalisation du Cahier des Charges Fonctionnel, répartition des coûts par fonction
- ***Recherche d'idées et de voies de solution*** : utilisation des techniques de créativité
- ***Etude et évaluation des solutions*** : études techniques de faisabilité, prise en compte des coûts, risques et contraintes
- ***Bilan prévisionnel, présentation des solutions retenues, décision***
- ***Réalisation, suivi, bilan***

L'Agence Française de l'Analyse de la Valeur [47] définit l'analyse de la valeur comme une démarche : - « *fonctionnelle, ce qui impose de formuler les problèmes en termes de finalités et non en termes de solutions, pour rechercher l'essentiel et le pertinent - à caractère économique, par la référence systématique aux coûts- pluridisciplinaire, par un travail de groupe réunissant toutes les compétences requises, et mettant en présence des personnes de formation et de responsabilités différentes. Ce qui permet de trouver un consensus sur les fonctions, les performances, les principes, les solutions, les coûts. Ce travail de groupe permet de régler conjointement des problèmes qui, sinon, ne seraient abordés que successivement et isolement par les divers intervenants dans la création et la réalisation du produit*. » L'analyse de la valeur s'appuie sur l'Analyse Fonctionnelle pour exprimer fonctionnellement le besoin, c'est un outil rigoureux qui a pour mission de considérer un produit comme un ensemble de fonctions [48]. Aujourd'hui développée en tant que démarche autonome l'analyse fonctionnelle conduit à l'expression fonctionnelle du besoin et au cahier des charges fonctionnel. On peut considérer que l'analyse fonctionnelle permet la construction de l'état initial de représentation du problème par l'analyse exhaustive de la situation. Par ailleurs l'identification des finalités, des fonctionnalités à réaliser posent les caractéristiques permettant de reconnaître un état comme concept de solution. La construction du problème, la représentation de la situation problématique initiale, et la description des objectifs à atteindre (des caractéristiques de la solution), sont formalisées dans l'analyse fonctionnelle.

L'analyse fonctionnelle constitue le point fort de l'analyse de la valeur. En effet, elle permet de déterminer les fonctions qui répondent aux besoins clients. Cependant, elle ne constitue pas un support pour développer la créativité car nous ne pouvons pas l'utiliser sur un système complexe, d'où sa faiblesse.

1.3. L'approche axiomatique de la conception

La conception axiomatique « Axiomatic Design » a été proposée par Suh du MIT [30], [49]–[51]cette théorie consiste à respecter des régles (des axiomes), afin d'obtenir une conception correcte. La conception axiomatique est basée sur les concepts principaux suivants : la conception en tant que processus de mappage entre quatre domaines ; la décomposition hiérarchique, les lois de la conceptions sous forme d'axiomes et la matrice de conception représentant les dépendances fonctionnelles. Une introduction de ces quatre concepts principaux est développée ci-dessous. Elle est basée sur les travaux de Suh.

Le mappage : selon Suh, la conception suit un cheminement itératif et séquentiel entre « ce que l'on cherche à accomplir » et « comment l'accomplir ». Donc, l'AD définit quatre domaines pour décrire le processus de conception : les domaines client, fonctionnel, physique et processus. Les besoins des cleints, les exigences fonctionnelles, les paramètres de conception et les variables du processus forment les vecteurs caractéristiques de cahque domine (figure 11)

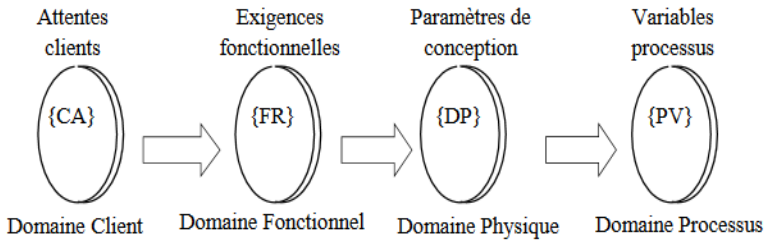


Figure 11: La conception axiomatique selon suh, 1990

Décomposition hiérarchique : le mappage est un processus itératif entre les différents domaines. Les attentes client sont exprimées sous forme de fonctionnalités dans le domaine fonctionnel par la mise en œuvre de méthodes comme le quality function deployment (QFD). Les exigences fonctionnelles, les paramètres de conception ainsi que les variables de processus doivent être décomposées hiérarchiquement jusqu'à l'obtention de tous les détails de la conception. Mais cette décomposition ne peut pas être faite tout en restant dans le même domaine. Des allers-retours, « zigzaging », entre les domaines sont nécessaires pour réaliser cette décomposition . A chaque niveau hiérarchique de la conception, les exigences fonctionnelles associées à ce niveau constituent le vecteur FR (pour Functional Requirement) dans le domaine fonctionnel. Les paramètres de la conception(ou DP pour Design Parameters) du domaine physique associées à ce niveau hiérarchqiue expriment le vecteur DP. Dans notre travail de recherche, nous nous intéressons plus particulièrement aux deuxième et troisième domaines de l'approche de la conception axiomatique (Domaine fonctionnel physique).

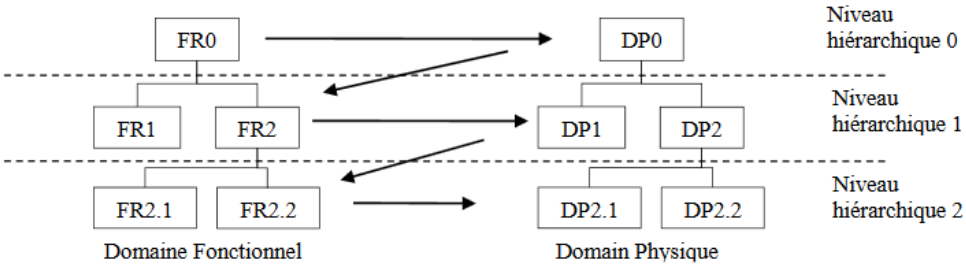


Figure 12: Décomposition hiérarchique d'une conception

Matrice de conception : le mappage entre FR et DP est exprimé sous forme mathématique, en fonction des vecteurs caractéristiques qui définissent les objectifs de la conception et les solutions de conception

Axiome de conception : les axiomes permettent la détermination de la qualité de la conception. Dans cette partie, nous décrivons les deux axiomes de transition du domaine fonctionnel au domaine physique.

L'axiome 1 (Axiome d'indépendance) propose de maintenir l'indépendance des exigences fonctionnelles (FR). Selon la forme D de la matrice de conception, on peut vérifier l'indépendance des exigences. Les trois types de conception correspondent à des matrices de conception différentes : conception non couplée, conception couplée et conception découplée

Selon cet axiome, une conception idéal comprend autant de paramètres de conception que d'éxigences.

Axiome 2 (axiome du minimum d'information) propose de minimiser l'information contenue dans une conception sachant que meilleure conception est celle contenant le minimum d'information.

Le calcul de la quantité d'informations contenues dans une conception est facilité par l'utilisation des fonctions « étendue de conception » et « étendue du système ».

L'étendue de la conception est indiquée pour chaque FR par le concepteur, alors que l'étendue du système résulte de la performance réelle de la conception. Pour parvenir à une conception robuste, Suh [49]a proposé d'éliminer les biais et de réduire la variance du système. Le terme de biais est défini comme la différence entre la moyenne d'un FR de

l'étendue du système et la valeur cible définie par le client. Le chevauchement entre l'étendue de conception et l'étendue du système est appelé l'étendue commun (Figure 13)

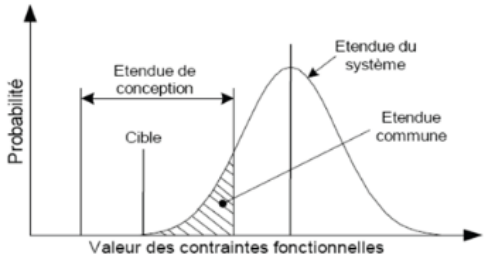


Figure 13: Axiome du minimum d'informations

Ainsi, la robustesse de la conception est améliorée en satisfaisant le second axiome de la conception axiomatique.

1.3.1. L'approche systématique vis-à-vis de nos objectifs

Dans le cadre de nos travaux l'objectif principal est d'intégrer la sûreté de fonctionnement au plutôt dans le processus de la conception. Il est donc nécessaire de détailler les caractéristiques influençant potentiellement la sécurité du système conçu à chacune des phases de conception. L'approche systématique développée par pahl et Beitz en 2007 [52] décrit les actions à réaliser à chaque phase mais ne formalise pas les démarches de réalisation de ces actions. Nous proposons d'utiliser cette approche et de répondre à la question : comment exprimer et structurer les solutions techniques à chaque phase de la conception ? Intégrer les principes de l'approche de la conception axiomatique devrait nous permettre de répondre à cette question.

Après avoir présenté les approcches de l'analyse et la structuration du probème de conception, nous revenons sur nos problèmes et objectifs. Dans nos travaux, et plus précisément dans le cadre de l'ingénierie inverse fonctionnelle pour la sécurité, notre objectif est de représenter les connaissances sur le système existant. L'idée est d'identifier les composants techniques, les composants de sécurité du système et les relations entre ces composants. Ci-dessous sont listées les questions auxquelles nous devons répondre dans ce cadre :

- Comment les composants d'un système fonctionnent t-ils ensemble ?
- Quels sont les composants du système et les relations entre eux permettant de parvenir à un bon fonctionnement du système ?
- Quelle est l'objectif de chaque composant ?

L'analyse fonctionnelle et l'approche organique détaillées dans cette partie sont des outils propices pour répondre à ces questions.

1.3.2. La conception axiomatique vis-à-vis de nos objectifs

Dans le cadre de l'ingénierie fonctionnelle inverse pour la sécurité, notre objectif est d'identifier les paramètres de la conception et leurs liens avec chaque composant et ensuite de définir l'exigence fonctionnelle associée. La question qui se pose est donc : comment formuler les FRs et DPs à partir d'un système existant ? une fois les FRs et DPs identifiés, il faut analyser la conception. La matrice de conception de l'AD semble être un outil interessant permettant d'y pervenir. Restent deux question auxquelles nous devons réponde : comment remplir la matrice de conception ? et comment lire une matrice de conception ?

Dans la section suivante, et en s'appuyant sur les conclusions présentées dans les sections précédentes, nous allons développer l'approche de conception inverse.

1.4. Le Quality Function Deployment

La méthode QFD (Déploiement de la Fonction et de la Qualité) est définit comme étant une méthode qui « *transforme les demandes des utilisateurs en qualité de conception, pour développer les fonctions formant la qualité, déployer les moyens pour atteindre la qualité de conception en sous-systèmes et composants et finalement pour spécifier les éléments du processus de fabrication.* »[53], [54]. Ainsi, La QFD a été développé au japon en 1966 par Dr Yoji Akao. Il s'est servis du développement des fonctions dans le cadre de l'ingénierie de la valeur pour combiner ses travaux dans le domaine de l'assurance qualité avec les points de contrôle.

La méthode QFD a pour objectif de donner un coup de main aux planificateurs pour déterminer les spécificités d'un nouveau produit/service ou d'un produit/service existant vis-à-vis du marché ou du besoin des sociétés à développer de nouvelles technologies. La QFD est une méthode qui utilise des graphes et des matrices pour illustrer ses analyses. la (figure 14) présente la matrice globale du QFD [55].

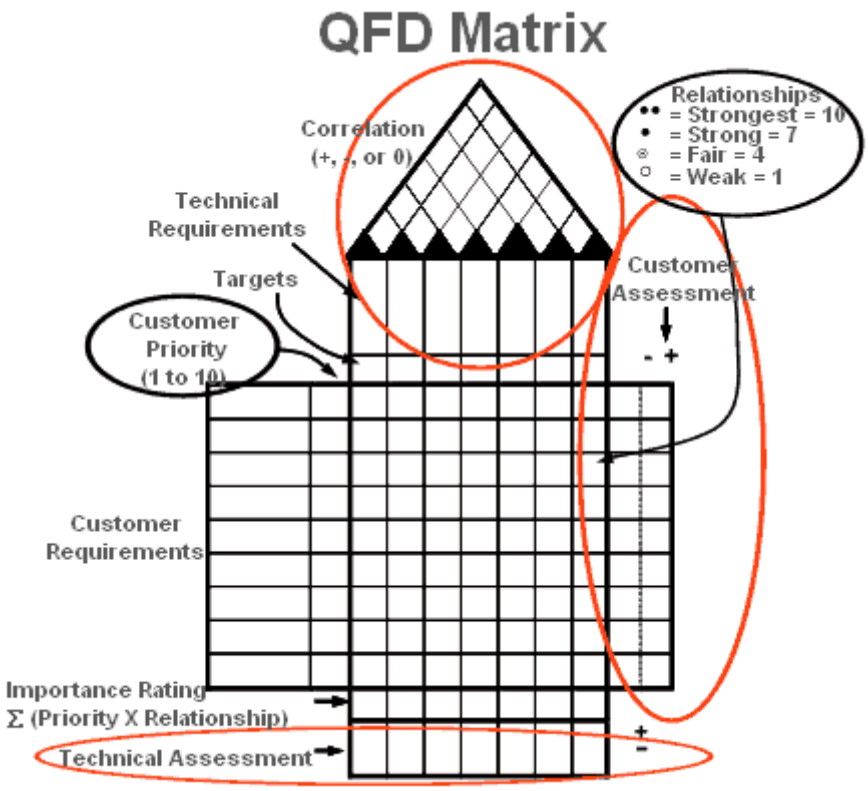


Figure 14: Exemple de matrice QFD

Le QFD est une méthodes composée de plusieurs tables et matrices représentant des activités différentes. Elle est conçue en six étapes :[56]

- Identification des clients
- Détermination des requis du client
- Détermination de l'importance relative des requis
- Benchmarking de la concurrence
- Traduction des requis du client en requis d'ingénierie mesurables
- Mise en place des objectifs de l'ingénierie pour la conception.

Généralement cette méthode s'appuie sur l'utilisation de quatre matrices. Ces matrices sont basées sur le principe du « Quoi-Comment » [57]. Ces matrices mettent en relation les données produites à une étape du processus avec les décisions devant être prises à l'étape suivante (voir figure 14). La première matrice est la matrice de planification qui permet la traduction des attentes du client (Quoi ?) en descriptions techniques (Comment ?), il s'agit de la matrice appelée « House of Quality » [58]. La seconde matrice met en relation les caractéristiques du produit à concevoir avec la description technique des performances à atteindre. Enfin les caractéristiques des procédés et les requis de production sont mis en

relation avec les caractéristiques d'ingénierie et de marketing dans les troisième et quatrième matrices.

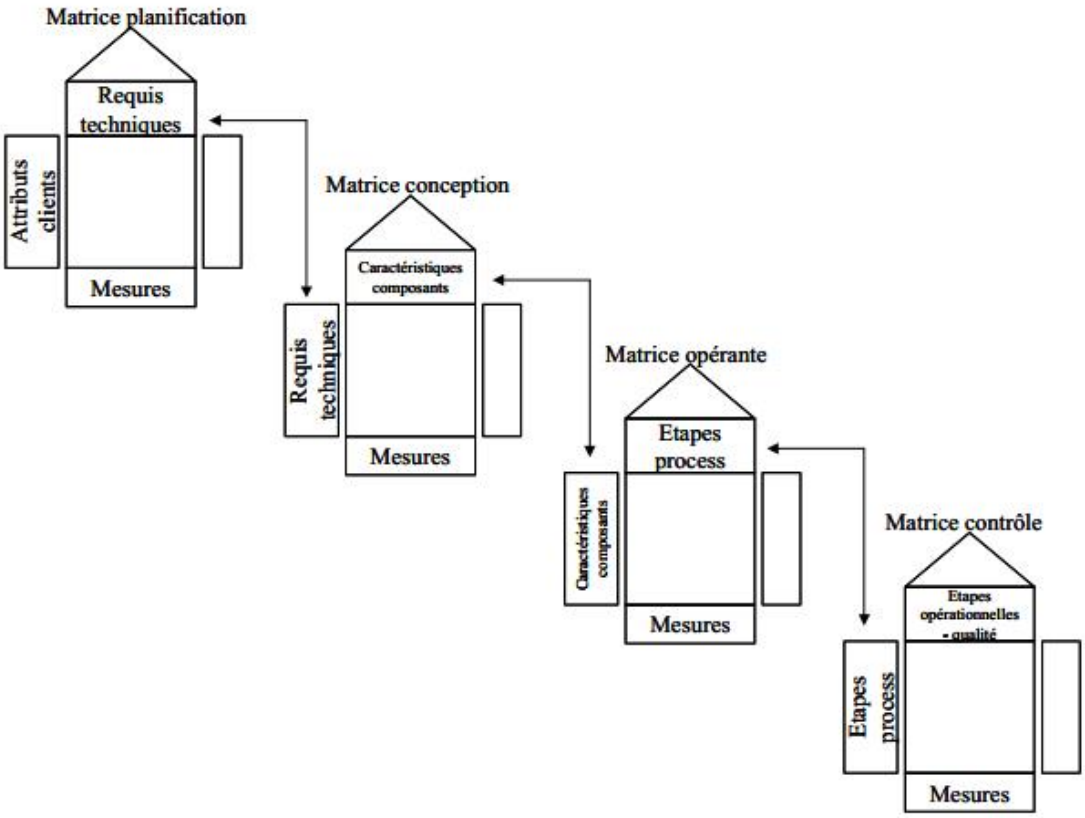


Figure 15: Le processus de déploiement du QFD, selon Hauser & Clausing [58]

L'analyse de la QFD peut être reprochable si la qualité de l'étude est mineure. Néanmoins, l'utilité remarquable de la méthode est sentie dans la gestion de la qualité totale et la chaîne de valeur [59]. Elle permet de produire des informations concises et efficientes, vis à vis des prises de décision jalonnant les processus de conception, production et vente d'un produit [60]. La construction du domaine fonctionnel, si l'on reprend le vocabulaire de Suh, est facilitée par l'approche QFD, qui établit un lien clair et optimal pour le passage du domaine client au domaine fonctionnel, notamment grâce à la matrice « House Of Quality ». L'instanciation de cette matrice est une phase de modélisation de problèmes.

En revanche le QFD n'est pas un outil de résolution de problèmes [61]. Le QFD facilite l'identification d'une hiérarchie de problèmes par la hiérarchisation des fonctions à réaliser, en regard des attentes du client. Le domaine de formulation du problème est donc diminué,

mais l'identification du cœur du problème et la manière de le résoudre ne sont pas du ressort du QFD.

1.5. La TRIZ, théorie de résolution des problèmes inventifs

Durant le cycle de developpement et de vie d'un produit les solutions aux différents problème ne sont pas disponible a priori. De ce fait, c'est le rôle de la conception de définir les solutions aux problème alors que les méthodes habituelles sont de type psychologique comme le cas du brainstorming. [62], [63]

Pour résoudre cette problématique une théorie sous forme d'algorithme a vu le jour pour définir des solutions innovantes aux problèmes détéctés. Il s'agit de la théorie TRIZ « Theory of Inventive Problem » [60], [64] . Une approche qui remonte des années 40, formalisée par Altshuller en définissant les différents outils utilisés pour le developpement et l'utilisation de cette méthodologie par une analyse exaustive de 40000 brevets [65], pour en tirer 39 critères mondiaux de la conception.

Nous présentons dans le tableau 1 les 40 principes d'innovation dégagée depuis les 400000 brevets mondiaux dans l'intervalle des années 60-70 (Tableau 1) .[66]

Tableau 1: Les 40 principes d'innovations de la méthode TRIZ

1. La segmentation	2. L'extraction
3. La qualité locale	4. L'asymétrie
5. La combinaison	6. L'univesalité
7. Les poupées gigognes	8. Le contrepoids
9. L'action contraire préalable	10. L'anticipation
11. La prévention	12. L'équipotentialité
13. L'alternative	14. La courbure
15. L'adaptabilité	16. L'action réduite ou excessive
17. Le changement de dimension	18. La vibration mécanique
19. L'action périodique	20. La continuité d'une action d'utilité
21. L'action rapide pour la sécurité	22. La transformation d'un effet nuisible en effet utile
23. L'asservissement	24. L'intermédiaire
25. Le self service	26. La copie
27. L'éphémère bon marché	28. L'évolution du système mécanique
29. Les fluides	30. Le déformable
31. Les matériaux poreux	32. Le changement de couleur
33. L'homogénéité	34. Le rejet et le régénération
35. Le changement de propriété	36. La transition de phase
37. L'expansion thermique	38. L'oxydation
39. L'environnement inerte	40. Les matériaux composites

Tableau 2: Les 39 critères de conception

01: masse d'un objet mobile	14: résistance	27: fiabilité
02: masse d'un objet statique	15: durée d'action de l'objet en mouvement	28: précision de la mesure
03: Longueur d'un objet mobile	16: durée d'action de l'objet statique	29: précision de fabrication
04:Longueur d'un objet statique	17: température	30: facteur nuisible à l'objet
05: surface d'un objet mobile	18: intensité lumineuse	31: facteurs nocifs induits
06: surface d'un objet statique	19: énergie utilisée par l'objet en mouvement	32: facilité de réalisation
07: volume d'un objet mobile	20: énergie utilisée par l'objet statique	33: facilité d'utilisation
08: volume d'un objet statique	21: puissance	34: maintenance
09: Vitesse	22: perte d'énergie	35: adaptabilité
10: Force	23: perte de substance	36: complexité du produit
11: Tension, pression	24: perte d'information	37: complexité du pilotage
12: forme	25: perte de temps	38: degré d'automatisation
13: stabilité de l'objet	26: quantité de substance	39: Productivité

À chaque intersection d'une matrice de contradictions sont énumérés les numéros des 40 principes innovants qui correspondent à la résolution de la contradiction technique considérée.

Tableau 3: Matrice de contradiction

	Paramètre dégradé															
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	...	16	17	...	37	38	39
01: masse de l'objet mobile			15,08 29,34		29,17 38,34		29,02 40,28		02,08 15,38	...		06,29 04,38	...	28,29 26,32	26,35 18,19	35,03 24,37
02: masse de l'objet statique				10,01 29,35		35,30 13,02		05,35 14,02		...	02,27 19,06	28,19 32,22	...	25,28 17,15	02,26 35	01,28 15,35
03: longueur de l'objet mobile	08,15 29,34				15,17 14		07,17 04,35		13,04 08	...	01,08 35	01,08 10,29	...	35,01 26,24	17,24 26,16	14,04 28,29
⋮	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
39: productivité	35,26 24,37	28,27 15,3	18,04 28,38	30,07 14,26	10,26 34,31	10,35 17,07	02,06 34,10	35,37 10,02		...	20,10 16,38	25,21 28,10	...	35,18 27,02	05,12 35,26	

La vision créative d'Altshuller vise à trouver des solutions aux problèmes détéctés tout en misant en écart la réalité industrielle. La figure 16 présente une formalisation générique de cette démarche.



Figure 16: Formalisation générique du processus de l'approche TRIZ [67]

Nous pouvons constaté de la figure 16 que la réalité industrielle qui présente le domaine physique contient le problème initial et la solution finale. Alors que la modélisation du problème et de sa solution appartiennent au domaine abstrait.

La démarche adoptée est la suivante : il faut tout d'abord formuler un problème « standard » puis se servir des outils TRIZ pour définir les solutions « génériques » pour en déduire des solutions spécifiques à chaque problèmatique. Il faut aussi ajouter les étapes propre à TRIZ qui ne sont pas les intégrer dans le modèle qui sont l'étape d'identification du problème et une étape d'évaluation de la solution proposée (Figure 17).

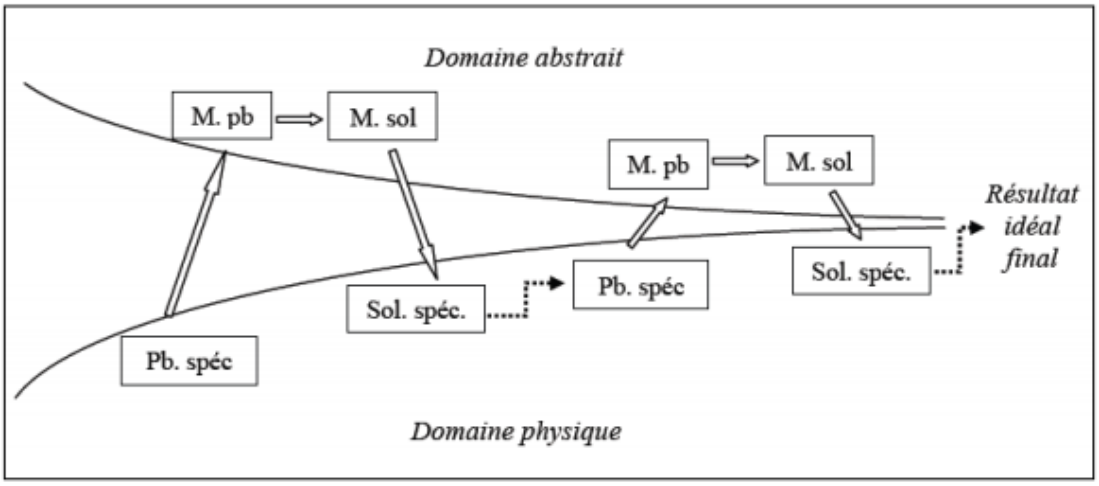


FIGURE 17: PRESENTATION DE LA DEMARCHE TRIZ [68]

Par retour d'expérience, la complexité de la démarche TRIZ la rend plus lourde et difficile pour que les petites entreprises l'adopte car le temps d'apprentissage est considérable [68].

On peut en conclure que la méthode TRIZ a pour objectif de faire émerger des solutions inventives. Les grands groupes y adhèrent discrètement mais sûrement. Elle tend à vouloir définir la créativité, comme une science exacte. Voilà qui va en heurter plus d'un, bousculer

plus d'une idée reçue. Mais c'est justement là une des ambitions de la théorie TRIZ, que de vouloir briser l'inertie psychologique qui retient tant d'inventeurs dans leurs mêmes impasses. Théorie pour les uns, méthode pour les autres, c'est dans tous les cas une idée de génie qui permet de « doper la créativité ».

Son application demande plus de rigueur et entraînement. Elle se définit comme une « science expérimentale » dont l'objectif est d'aider les inventeurs et plus généralement tous les ingénieurs à résoudre méthodiquement les problèmes technologiques.

Selon ses concepteurs, TRIZ peut s'appliquer :

- A la recherche et au développement de nouvelles générations de produits, en proposant un ensemble de lois d'évolution
- A la résolution de problèmes complexes, avec une méthodologie et des outils s'appuyant sur la résolution des conflits inhérents à tous systèmes techniques
- A l'identification et au traitement des défaillances de tous produits industriels, c'est une application qui pourrait avoir un rapport avec l'analyse des risques

Dans le processus de développement d'un produit, la TRIZ peut être située comme suit :



Figure 18: La position de TRIZ dans le processus de développement d'un produit

Cette étape de transformation du cahier des charges fonctionnel (CDCF) en cahier des charges conceptuel (CDCC) donne naissance au schéma de la solution à développer.

Dans le cadre de la théorie TRIZ nous ne trouvons pas de procédures parfaitement définies pour une formulation adéquate du problème. Les outils classiques de TRIZ nécessitent une connaissance d'un vocabulaire et procédure spécifique ainsi que une utilisation fréquente et systématique pour un meilleur entrainement. En effet, un problème spécifique sera défini par rapport à un contexte et réformé en un problème générique exprimé par un vocabulaire spécifique à TRIZ.[69]

1.6. La démarche TRIZ

Nous pouvons décomposer le processus de résolution de problème inventif par la méthode TRIZ en 3grandes étapes:[70]–[72]

- Analyse de la situation initiale, la reformulation du problème industriel sous forme de contradiction et l'utilisation des outils d'aide au déblocage de l'inertie psychologique afin d'établir une modélisation du problème non pas industrielle mais abstraite.
- Le concepteur est guidé vers des solutions/ concepts génériques établies par Altshuller à travers la génération d'un modèle de solution utilisant les outils de résolution de problèmes inventifs
- L'interprétation des modèles de solution abstraite générés afin d'en extraire un concept de solutions applicables au problème industriel

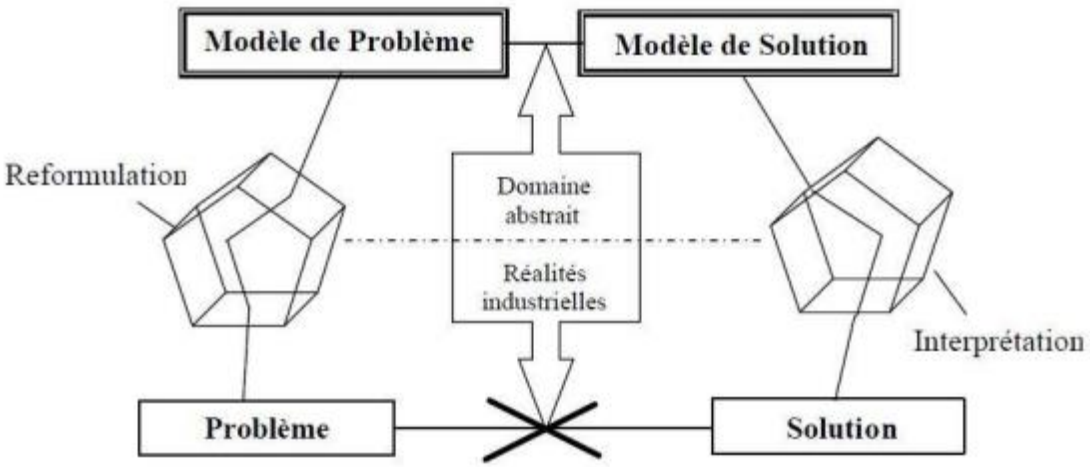


Figure 19: Résoudre un problème par TRIZ [64], [65]

1.7. Les outils de TRIZ

Selons leur utilisation les outils TRIZ sont décomposés en deux catégories. Les outils de déblocage psychologique utilisés lors de la modélisation du problème et les outils de

résolution de problèmes nécessaires pour la génération des modèles de solutions.[44], [62], [71], [73], [74]

1.7.1. Les outils de déblocage psychologique

- ***Les hommes miniatures*** :

Méthode graphique dont l'objectif est la visualisation l'origine du problème. Elle consiste à imaginer l'objet de la problématique comme s'il était constitué d'hommes miniatures et imaginer les actions que chacun des hommes devrait réaliser afin de supprimer le problème. Cette méthode permet au concepteur d'examiner le problème de l'intérieur.[75]

- ***Les opérateurs DTC :***

C'est un outil qui consiste à analyser les conséquences sur le système étudié par rapport à la variation de l'état minimum/maximum de chacun des trois caractéristiques : dimension (minuscule/gigantesque), temps (éclair/ infini) et coût (dérisoire/sans limite).[76]

Le concepteur peut mieux visualiser les caractéristiques du problème et de mieux établir ses contradictions à travers cet outil.

- ***La méthode des neufs écrans :***

Outil permettant de visualiser le développement d'un système technique en le plaçant sur une échelle temporelle (passé, présent, futur) et systémique (sous-système, système, super-système). Cet outil permet de mettre en évidence les tendances d'évolution du système et permet d'imaginer les évolutions futures.[77]–[80]

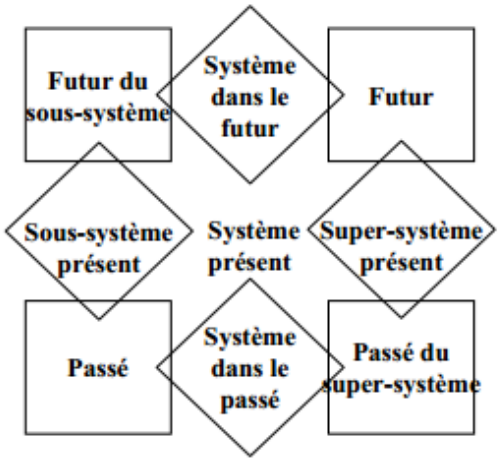


Figure 20: Modèle standard de multi-screen a neuf écrans, selon Savransky [81]

1.7.2. Les outils de résolution de problème

- ***Matrice de résolution des contradictions techniques :***

Cet outil permet au concepteur d'extraire des principes de solutions inventives pouvant résoudre les problèmes modélisés par des contradictions techniques sans compromis. Altshullera établi 39 paramètres techniques pouvant être l'objet de contradictions et une liste de 40 principes inventifs.

Les 39 paramètres techniques sont représentés sous forme d'une matrice à double entrée avec les lignes qui représentent les paramètres à améliorer et les colonnes, ceux à ne pas dégrader.[75], [78], [82] A l'intersection des lignes et des colonnes sont suggérés des principes génériques de solutions inventives, établis par Altshuller qui identifie les solutions les plus représentatives pour résoudre ses contradictions d'après son analyse des brevets inventifs.

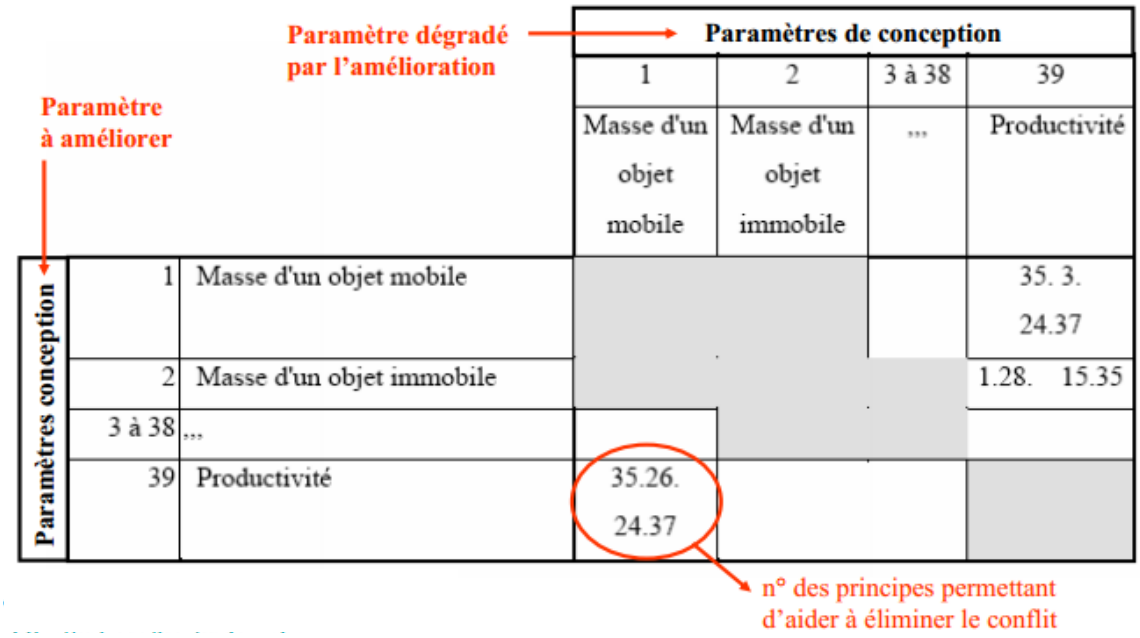


Figure 21: Matrice de contradiction

- ***Les onze principes de résolution des contradictions physiques :***

Résoudre une contradiction physique correspond à satisfaire deux conditions opposées. Les travaux d'Altshuller [83] ont permis de déterminer onze principes permettant de résoudre les contradictions physiques.

Ils sont organisés en quatre groupes:

- ***2 principes de séparation*** :
    - Séparation des propriétés contradictoires dans le temps: A un certain moment, l'objet possède la propriété A et à un autre, la propriété Non-A
    - Séparation des propriétés contradictoire dans l'espace : A un certain endroit, l'objet possède la propriété A et à un autre, la propriété Non-A
- ***4 principes de transition du système***
    - Transition du système 1a: combinaison de systèmes homogènes ou hétérogènes dans un super-système
    - Transition du système 1b: Transition d'un système vers un anti-système, ou combinaison d'un système et d'un anti-système
    - Transition du système 1c: Le système complet à la propriété A alors que ses composants ont la propriété Non-A
    - Transition du système 2: Transition vers un système opérant au niveau "micro"
- ***4 principes de transition de phase***
    - Changement de phase 1: Substitution de la phase d'une partie du système ou de l'environnement
    - Changement de phase 2: Un composant du système possède deux phases (en utilisant des substances capable de passer d'un état à l'autre en fonction des conditions de fonctionnement)
    - Changement de phase 3: Utilisation de phénomènes liés aux transitions de phase
    - Changement de phase 4: Substitution d'une substance monophasique par une substance diphasique
- ***1 principe de transition physique - chimique***
    - Transition physique-chimique: Apparition/disparition de la substance comme résultat de décomposition-combinaison, ionisation-recombinaison

- ***Les soixante-seize standards de résolution de Vépole :***

Les Vépoles sont un des travaux essentiels d'Altshuller. Par le terme « Vépoles » on entend la contradiction de deux mots russe : Substance (Vechestvo) et Champ (Pole). Mais le Vépole peut aussi être défini comme « Système Technique Minime ».

Altshuller a défini un mode de représentation graphique de ce système minime : la « substance » nous comprenons tout objet, quel que soit son degré de complexité.

Le champ physique est symbolisé par une flèche placée entre deux substances et présente l'action qui les relie. C'est l'interaction. Elle est une forme universelle du raccordement de corps ou phénomènes résultant de leur changement mutuel. C'est la première chose que nous voyons quand nous observons les choses. Nous observons une quantité de formes en mouvement (en évolution) : mécanique, thermique, lumineux, électrique, chimique, magnétique, en changement d'état…etc.

Ce champ physique, en technologie, est employé au sens large : il y a l'espace, auquel un certain vecteur ou positions scalaires de magnitude dans la relation, peuvent être affectés.

Nous emploierons le terme « champ » dans son sens très large, en allant du domaine de la physique au domaine de la technique (apport de chaleur, action mécanique, acoustique,…etc).

Les deux substances et le champ peuvent être complètement dissemblables, mais sont nécessaires et suffisants pour la formation d'un système technique minime Altshuller à nommer le Vépole.

La multiplicité des formules de Vépoles peut aussi croître en précision en tenant compte des représentations connexes suivantes.

Par analogie avec la géométrie, le triangle est la figure géométrique minime. Toute figure plus complexe, (le carré, le rectangle…etc) peut être exprimée comme une somme de triangle. Le Vépole est aussi un système à trois composants (S1, S2, et C) qui jouent le même rôle fondamental en technologie que les sommets d'un triangle en géométrie. En admettant plusieurs règles fondamentales (comme les tables de trigonométrie), il est possible de résoudre des problèmes simplement, sans calculs fastidieux. Dans ce même objectif, construire et transformer les Vépoles, rend possible la résolution de nombreux problèmes d'innovation.

L'ensemble de son œuvre donne une synthèse de standards d'innovation qui, à la manière de modèles de référence, vous aiguille vers des modèles de solution à vos problèmes et vous permettent en un temps réduit, de générer des concepts et d'en déduire des solutions potentielles.

Le modèle Vépole permet de mettre en place un modèle du problème suivant sa contradiction. Ce modèle permet de décrire les raisons d'un problème sans les définir.

Le modèle Vépole est basé sur l'analyse Substance/Champ dont il est l'acronyme russe. La Substance représente un objet et le Champ une interaction [83].

Un modèle Vépole est composé d'un produit (qui doit être modifié/transformé), d'un outil (qui permet l'action nécessaire), d'un champ (qui fournit l'énergie requise) et de liens (qui relient les différents éléments).

- ***L'algorithme ARIZ :***[70], [84]

ARIZ est l'algorithme de mise en œuvre des outils TRIZ, il donne la marche à suivre au concepteur en neuf étapes, du problème technique jusqu'à sa résolution. Cet algorithe met en œuvre la théorie TRIZ de manière classée et méthodique en se basant sur les lois d'évolution des systèmes techniques et les différents outils de la TRIZ.

ARIZ a été développé par Altshuller et son équipe et est considéré comme la technique avancée de TRIZ.

2. IMPORTANCE DES METHODES

Boly, López-Mesa and Thompson [85]–[87] dans leurs écrits, ils ont traité les méthodes de conception comme étant les bonnes habitudes adoptées par une entreprise qui vise l'innovation dans leur processus. Lors des enquêtes faites sur les industries, les chercheurs ont constaté que l'indicateur clé de la maturité du processus de conception dans une entreprise réside dans le critère de choix de la méthode de conception à utiliser. le choix de la méthode adéquate assure une compétitivité optimale d'un produit par rapport aux autres entreprises et permet l'optimisation de son processus du développement.[88].

En effet, l'utilisation des méthodes conduit à l'optimisation du processus de développement de produits et permet ainsi l'amélioration de la compétitivité des entreprises [89]. Cette optimisation est au niveau process par la croissance de son l'efficacité et de son efficience et également au niveau produit tout en prenant en compte les différentes contraintes liées à la fabrication, la maintenance, le coût et au cycle de vie du produit y compris l'utilisation en respectant les attentes clients. [90]

3. *SOUS-UTILISATION EN PRATIQUE*

Selon ce qui était présenté dans les parties précédentes, pour chaque modèle de conception possède une décomposition avec des méthodes et outils adéquates et spécifique pour chaque phase.

Tableau 4:Comparaison des methodes durant processus de developpement systeme

	Préparation	**Identification**	**Conception 1**	**Conception 2**	**Fabrication**
Approche axiomatique	Client	fonctionnel	Physique		Process
QFD	Identification		Caractérisation-Développement-Validation		
Analyse de la valeur	Traduction		Inter-dev-valid		
Conception systématique	clarification		Conceptuel	réalisation	détail
TRIZ		Restructuration- élimination-analyse			

Chaque modèle porte une vision différente sur le processus de développement d'un système. En effet, l'analyse de la valeur analyse le processus sous l'ongle de la pluridisciplinarité, QFD sous l'ongle de la qualité, TRIZ sous l'ongle de l'innovation/ créativité et ainsi de suite.

Par ailleur, il existe des resemblance entre les différentes méthodes vu que les réalisateurs de ces modèles se basent sur la nature itérative d'un processus. De ce fait, le passage par des solutions existantes passant par une analyse fonctionnelle s'impose pour toute démarche de résolution d'un problème en conception.

Cette analyse comparative nous a permis d'en tirer des avantages et des inconvénients d'adopter une approche processus basée sur des modèles. En effet, cette démarche permet aux concepteurs de définir le cadre de travail et de plannifier les activités à prévoir pour concevoir un nouveau produit. Ainsi, nous pouvons ajouter le caractère générique et transversal des modèles qui est à la fois un atout et une faiblesse au même temps. Un atout, car les modèles sont utilisé dans différents domaines mais faiblesse car c'est une approche abstraite qui manque de souplesse.

Le caratère abstrait des méthodes de conceptions pousse les chercheurs et les gens du métier à s'interesser de près. En effet, l'adoption de ces méthodes rend le processus de conception adéquat à chaque projet et plus « concrêt ».

4. GUIDES EXISTANTS POUR L'AIDE A LA SELECTION DES METHODES

Nous allons traité dans cette partie les guides existant pour l'aide au choix de sélection des méthodes de conception.

Dans un premier temps, nous allons présenté les guides existants dans la littérature puis les mécanismes sur lesquels les rédacteurs se sont basé pour rédiger ces guides.

Plusieurs recherches se sont focalisées sur la problématique du choix de la méthode de conception dans le but de fournir une sorte d'aide aux concepteurs En effet, certaine recherche justifie notre constatation à savoir « projet européen Presence développé conjointement par la Domus Academy, le Netherlands Design Institute et le Royal College of Art » [91], [92] ou encore « le projet GINA piloté par l'Université Technique de Braunschweig en Allemagne [93], [94]. Lesdits travaux s'intègrent dans plusieurs disciplines partant de l'ingénierie de la conception jusqu'à la production passant par l'information.

Il existe également plusieurs organismes mondiaux qui ce sont intéressé à cette problématique et ils ont créé leur propre guide de choix, comme l'exemple de l'AFNOR (Association Française de Normalisation) en France ou le BSI (British Standards Institute) au Royaume-Uni. C'est aussi le cas d'autres associations telles que l'AFAV (Association Française pour l'Analyse de la Valeur), le VDI (Verein Deutscher Ingenieure) en Allemagne ou le NAE [95] aux Etats-Unis [17].

Il faut aussi ajouter l'implication des industrielles dans ce processus et que les réalisateurs des guides sont de différentes nationalités pour assurer le caractère universel de ces guides.[87], [90], [96], [97]

Selon Braun, Lindemann, Frank et Deimeil la sélection est basé sur deux concept un se base sur la décomposition du processus et l'autre se base sur les attributs.[90], [94]

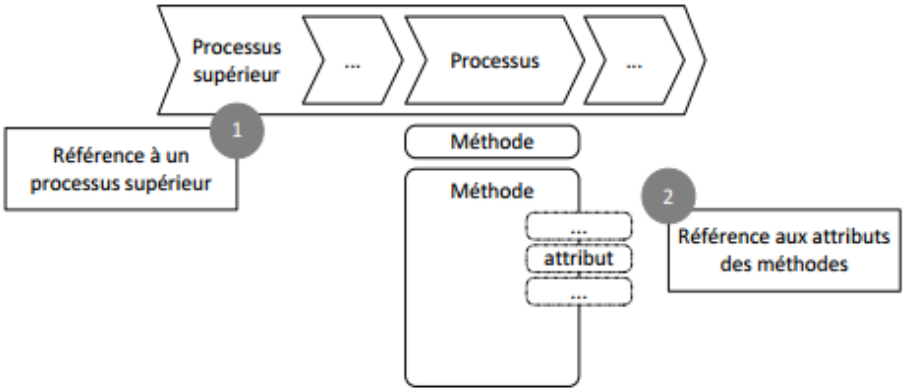


Figure 22: Mécanismes de sélection des méthodes [90]

Après consultation des deux principes de sélection, nous avons pu conclure que les outils du 1er principe traitent le processus par phase ou étapes pour faire le choix. Alors que le 2ème principe fait la sélection par rapport à l'objectif ou le cas d'utilisation de la méthode.[98],[99] ,[86].

VI. COMPARAISON ET CHOIX D'APPROCHE

Les acteurs de la conception utilisent plusieurs méthodes pour développer un nouveau produit (Tableau 5). Ces méthodes prennent en compte l'ensemble des contraintes et spécificité durant le cycle de vie d'un produit dès les phases amont du processus.

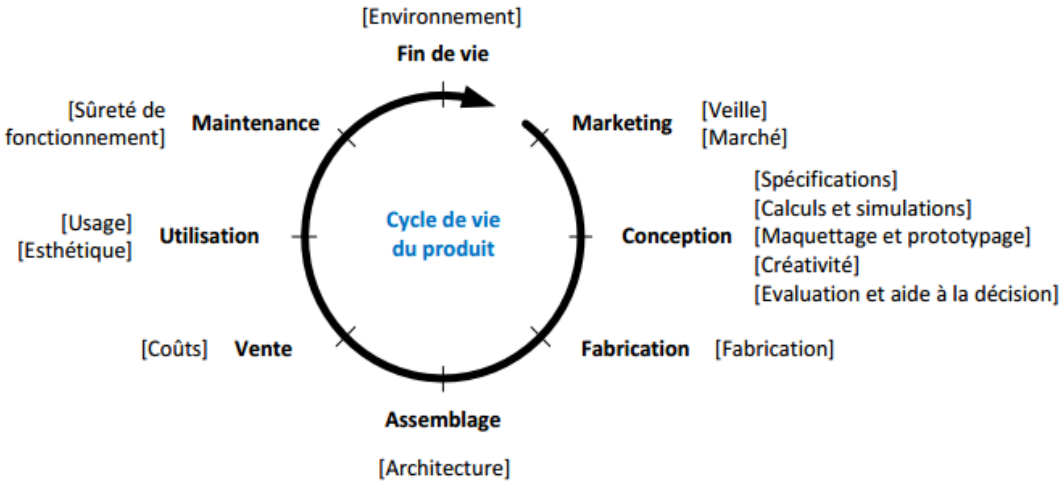


Figure 23: Phases de cycle de vie du produit

Tableau 5: Familles de méthodes de conception

Famille	Enjeux	Métier	Exemples de méthodes
Veille	Surveiller son environnement Préparer et anticiper l'avenir	Veilleur	Veille Concurrentielle Veille Technologique
Marché	Satisfaire les besoins des consommateurs Assurer le succès commercial du produit	Marqueteur	Enquêtes par sondage Opinions d'expert
Spécifications	Traduire le besoin du client et des utilisateurs dans un langage exploitable techniquement	Ingénieur	Analyse Fonctionnelle Interne et Externe
Calculs Simulation	Gain de temps et d'argent Souplesse, élargissement du champ d'intervention	Ingénieur	Résistance des Matériaux Eléments finis
Maquettage Prototypage	Communiquer les idées Réduire les risques d'itérations	Projeteur Maquetteur	Prototypage Rapide Réalité Virtuelle
Créativité	Innover et se démarquer de ses concurrents Trouver des solutions originales	Tous	Brainstorming Matrice de découverte
Evaluation Aide à la décision	Evaluer les représentations intermédiaires S'assurer du bon déroulement du processus	Tous	Vote pondéré Matrice de décision
Fabrication	Prendre en compte les contraintes de fabrication Réduire les coûts	Ingénieur	CFAO Guidelines de fabrication
Architecture	Réduction des coûts et des délais de conception Facilité de maintenance et d'assemblage	Ingénieur	Design Structure Matrix
Coûts	Assurer le succès d'une innovation Réduire les coûts	Cost estimator	Analyse de la Valeur Activity-Based Costing
Usage	Assurer l'acceptabilité du produit par l'utilisateur Concevoir selon une approche centrée-utilisateur	Ergonome	Observation Tests utilisateurs
Esthétique	Prendre en compte les qualités sensorielles, sémantiques et esthétiques du produit	Designer	Rough Planche de tendances
Sûreté de fonctionnement	Satisfaire les fonctions dans conditions données Maîtriser les risques	Ingénieur	AMDEC Soutien Logistique Intégré
Environnement	Prendre en compte l'environnement Respecter la réglementation	Ingénieur	Analyse du Cycle de Vie ESQCV

Le Tableau 5 présente un exemple de méthodes appliquées selon la famille et le métier des contributeurs.

Par la suite, nous allons présenté un processus de selection des différentes démarches selon le contexte.

1. PROCESSUS DE SELECTION

Dans le but de faciliter la compréhension d'un processus de conception, Pahl and Beitz ont proposé dans leurs écrits de décomposer le processus en phase et chaque phase en étapes. Pour aider aux choix de la méthode la question qui se pose c'est quelle est la méthode adéquate et utilisable pour chaque étape. [52], [100]

Deux types de guides ont été développés par les chercheurs en se basant sur les modèles du processus de conception cité antérieurement. L'un des guides se focalise sur la phase de conception générale et l'autre sur la phase de concrétisation. La figure 24 illustre le principe du premier guide qui traite la phase de la conception générale.

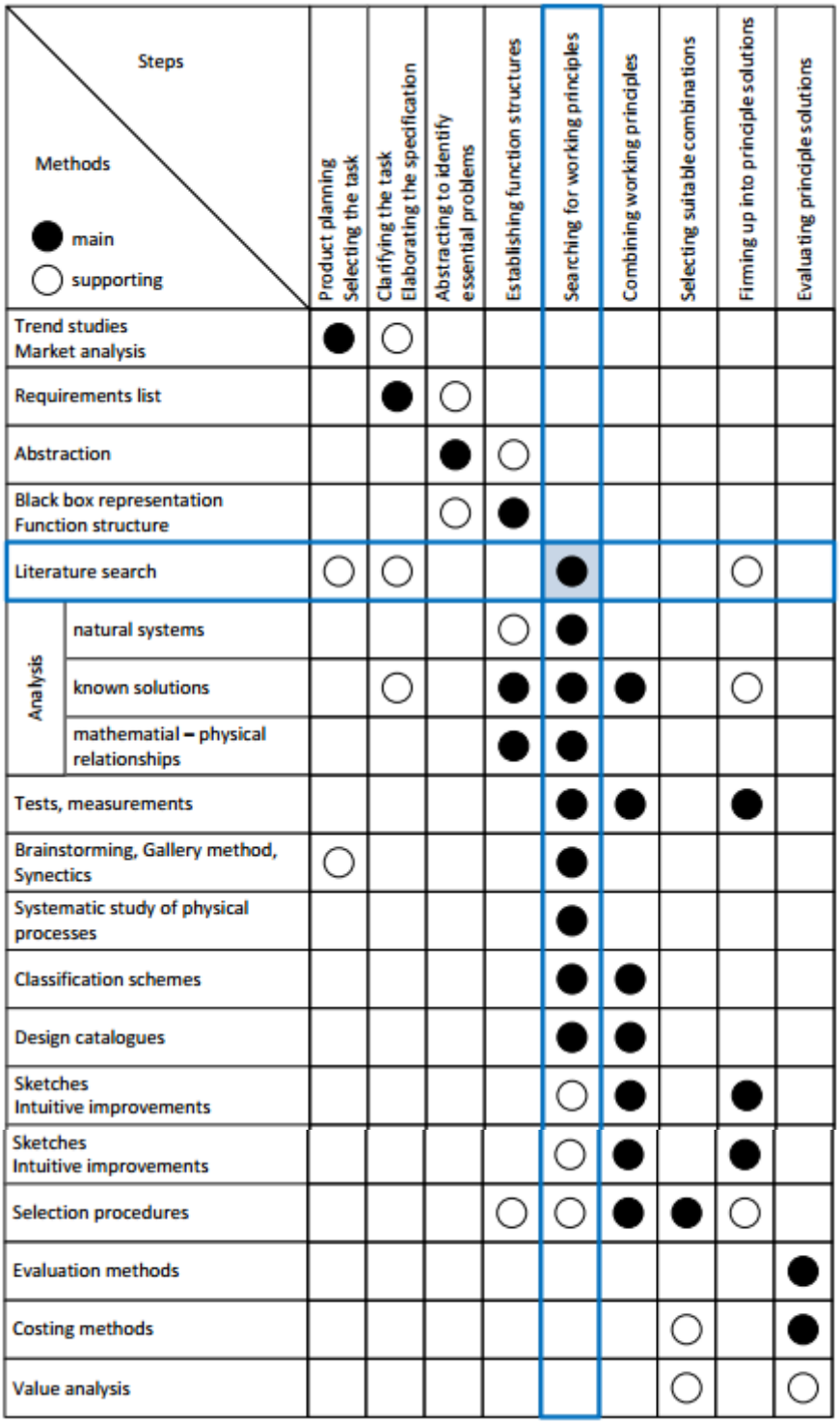


Figure 24: Aide à la sélection des méthodes pour la phase de conception générale [100]

La figue présente le guide sous forme des lignes et des colonnes. En effet, les lignes présentent les méthodes utilisées dans la phase de conception générale et en colonnes les étapes correspondantes à chaque méthode. Cependant Pahl et Beitz identifient les méthodes principales et ceux support.

Outils \ Utilisations	Analyse du besoin (exprimé, latent, potentiel)	Recherche des fonctions de service	Identification des fonctions techniques (d'une solution)
Méthodes d'inventaire systématique du milieu environnant	XX	XXX	X
Etude du cycle de vie du produit	XXX	XXX	X
Etude du comportement de l'utilisateur potentiel	XXX	XX	X
Etude des produits voisins, analogues, concurrents	XX	XXX	XX
Recherche intuitive	XX	XX	XX
Recherche des insatisfactions des produits existants	XXX	XXX	XX
Changement de point de vue systématique	XX	XXX	X
Critères d'appréciation et leurs niveaux	XXX	XX	
Diagramme FAST		XX	XXX
Tableaux achroniques		XX	XXX
Schémas de contact			XX
Graphes de produit			XX
Arbres ou graphes de fonctions		XX	XX
Schémas de flux		XX	XX

X Utilisation peu fréquente
XX Peut être utilisé
XXX Domaine traditionnel d'exploitation

Figure 25: Aide à la sélection des outils de l'analyse de la valeur [43]

La figure présente le guide comme d'habitude sous forme des lignes et des colonnes. En effet, les lignes présentent les outils utilisées et en colonnes les phases de l'analyse de la valeur.

Nous constatons plusieurs outils qui sont recommandés comme le cas du diagramme FAST. Nous ajoutons aussi que les chercheurs ne font pas de différence entre outils principales et outils support mais plutôt ils ont donné des notes sur une échelle de 3 selon la fréquence d'utilisation.

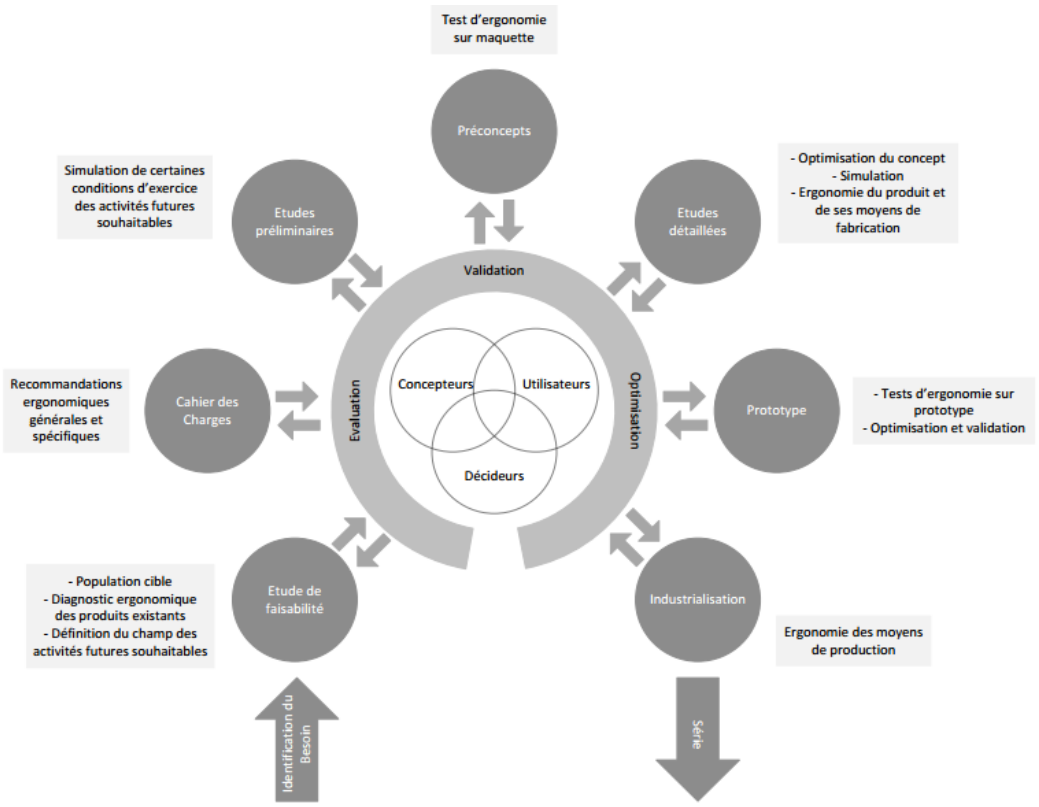


Figure 26: Représentations intermédiaires et choix des méthodes [99]

Il existe un seul guide « logiciel » qui porte une valeur ajoutée plus que ceux au format papier c'est celui développer dans le cadre d'un projet au sein de l'université de Braunschweig. Ce logiciel normalise le lien entre les méthodes utilisées avec le processus de conception et ses étapes.

Bien que distincts, tous les mécanismes mentionnés durant cette analyse se basent sur le même principe de comparaison. Ce principe consiste à comparer les caractéristiques de la conception avec les spécificités du contexte projet.

Tableau 6: Synthèse des exemples de guides de sélection des méthodes

Référence	Mécanisme	Eléments du contexte	Caractéristiques méthodes
(Pahl and Beitz, 2007)	1 – Processus	Phases du processus	Intitulé de la méthode
(AFNOR, 1985)	1 – Processus	Etapes du processus	Intitulé de la méthode
(Sagot, 1999)	1 – Processus	Représentations Intermédiaires	Intitulé de la méthode
(Franke and Deimel, 2004)	1 – Processus	Activités de base du processus	Activités de base des méthodes
(Jones, 1992)	2 – Attributs	Entrées des phases Sorties des phases	Entrées des méthodes Sorties des méthodes
(Macdonald and Lebbon, 2001)	2 – Attributs	Ressources du projet Type de qualités visées Centré utilisateur ou non	Ressources des méthodes Type de qualités Centré utilisateur ou non
(VanGundy, 2005)	2 – Attributs	Degré d'innovation	Quantité Nouveauté
(Braun and Lindemann, 2003)	2 – Attributs	Entrées disponibles Sorties désirées Ressources disponibles	Entrées requises Sorties obtenues Ressources requises

La simplicité et la facilité d'utilisation constituent l'avantage principal du mécanisme1. Par ailleurs, la nécessité d'avoir une décomposition identique est l'inconvénient identifié pour ce mécanisme 1. Ce dernier ne peut être appliqué que pour une sorte de point de départ, car il existe plusieurs critères qui entrent en jeux pour la sélection des méthodes et parmi ces critères il y a la progression du processus de conception qui n'est pas pris en compte par le mécanisme 1 qui se base essentiellement sur les étapes du processus de conception.

Par ailleurs, les académiciens ont conçu un autre type de guide basé sur le mécanisme 2 qui consiste à faire le choix en prenant en compte le rôle de chaque attribut. De ce fait, le mécanisme 1 n'est qu'un cas particulier du mécanisme 2.

2. FACTEURS INFLUENÇANT LE CHOIX DES METHODES

Le choix des méthodes de conception dépend de plusieurs facteurs. Nous pouvons diviser ces facteurs en deux, ceux liés au contexte d'utilisation et ceux liée à la nature de la méthode.

2.1. FACTEURS LIES AU CONTEXTE

Dans le tableau 7 (Tidd et al) présentent un ensemble de variables qui impactent la gestion de l'innovation et qui sont liées au contexte interne et externe au processus. [101]

Tableau 7: L'impact du contexte sur la gestion de l'innovation[101]

Variable du contexte	Exemple
Secteur	Priorités et caractéristiques différentes en fonction des secteurs
Taille	Accès aux ressources variables selon la taille des entreprises (petite entreprise vs grand groupe)
Systèmes nationaux d'innovation	Structures d'aide à l'innovation plus ou moins performantes selon le pays
Cycle de vie (technologies, industrie, etc.)	Maturité technologique différente selon les projets (Industries de technologie de pointe vs firmes matures et bien implantées)
Degré de nouveauté	Différentes approches à utiliser selon le degré de nouveauté du produit (innovation incrémentale vs innovation de rupture)
Parties prenantes	Influences des parties prenantes différentes selon les projets (réglementations, autorités, etc.)

L'unicité d'un projet est liée à son contexte dans lequel s'intègre. De ce fait, pour faire le choix d'une méthode de conception adaptée il faut bien comprendre les spécificités du contexte.

Hales et Gooch ont proposé dans leurs travaux un modèle de contexte projet en cinq couches qui les ont nommé des niveaux de résolution. On retrouve au niveau conception les étapes nécessaires au developpement d'un produit. Cela est fait en se basant sur deux étapes à savoir « traduction et interprétation du besoin et étapes de développement et de validation de la solution »[5]. Il s'agit des étapes de traduction et d'interprétation du besoin, de développement et de validation de la solution.

Dans le modèle ci-dessous (Figure 27), les deux chercheurs [3] intègrent le projet dans un système de management qui se décompose en plusieurs étapes à savoir : une traduction du besoin, interprétation du besoin, définition du produit ,validation du produit et du prototype et finalement l'industrialisation.

Le marché et ses composants constituent l'environnement extérieur pour une entreprise quand cette dernière aura un échange d'argent contre son produit développé.

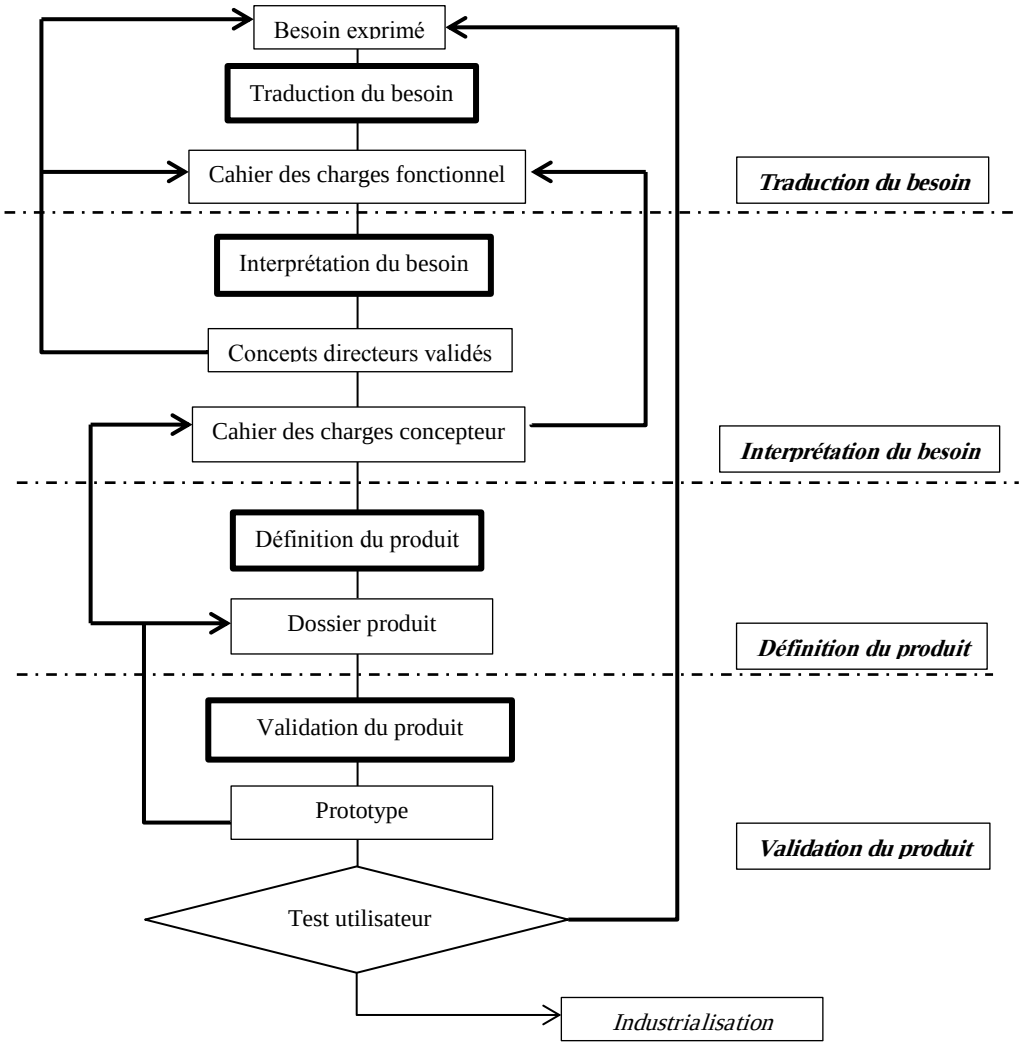


Figure 27: Etapes de traduction du besoin jusqu'à la validation de la solution

Parmi les facteurs jugés externe qui influence le développement d'un produit donné, on trouve la concurrence, la législation et la réglementation auxquelles le produit doit répondre. Le tableau 8 représente ces facteurs en plus de d'autres facteurs liés à l'entreprise (objectif) et ceux liés au concepteur (sa personnalité, sa façon de résoudre les problèmes) [101]. Il faut noter que les facteurs n'ont pas le même degré d'impact.

Tableau 8: Les facteurs du contexte qui influencent la sélection des méthodes

Référence	Facteurs du contexte influençant le choix des méthodes
(Araujo, 2001)	• Influences individuelles (motivation, personnalité, croyances, attitudes, type de prise de décision, etc.) • Influences environnementales (objectifs de l'équipe, objectifs de l'entreprise, culture, réglementations et normes, concurrence, etc.)
(Tidd et al., 2005)	• Degré de nouveauté d'un produit
(Chai and Xin, 2006)	• Support management : Ressources (humaines par exemple l'accès à des experts pour être formé, temporelles, financières + implication du personnel) • Type de stratégie selon (Porter, 1980) • Taille de l'entreprise • Formation des employés
(López-Mesa and Thompson, 2006)	• Style cognitif de résolution de problème des concepteurs

2.2. FACTEUR PROPRES AUX METHODES INFLUENÇANT LE CHOIX

Pour faire une sélection et un choix entre une méthode ou une autre, il faut faire référence aux spécificités propres à cette méthode. En effet, les données d'entrées et de sortie de chaque méthode jouent un rôle pour le choix. Ainsi que les ressources nécessaires et les coûts engagés.[102]

TABLEAU 9: FACTEURS LIES AUX METHODES INFLUENCANT LA SELECTION

Référence	Facteurs des méthodes influençant le choix des méthodes
(Jones, 1992)	Données d'entrées Données de sortie
(Bisseret et al., 1999)	Théorie
(Macdonald and Lebbon, 2001)	Expertise méthodologique Ressources humaines Ressources temporelles Ressources financières Ressources matérielles
(Chai and Xin, 2006)	Convivialité (*user-friendly*) Utilité perçue Coût d'apprentissage

A nouveau, nous pouvons conclure que de nombreux facteurs liés cette fois-ci aux caractéristiques des méthodes influencent la sélection des méthodes de conception. De la même façon que précédemment, ces facteurs n'exercent pas le même degré d'influence au moment de la sélection.

VII. SURETE DE FONCTIONNEMENT : DEFINITIONS ET PARAMETRES

Les systèmes industriels connaissent une grande évolution ces dernières années, et cela les rends plus complexe. Cette complexité et l'utilisation de ces systèmes dans la vie quotidienne fond de la réduction des coûts de conception et d'exploitation une nécessité incontournable, et cela ne peut se faire que par l'intégration de la sûreté de fonctionnement dans le développement des systèmes. En effet, c'est une discipline basée sur des

méthodologies servant à caractériser, optimiser et maitriser les risques et les effets des défaillances.

1. DEFINITIONS

Des efforts considérables ont été faits par Algirdas Avizienis et Jean-Claude Laprie [103]–[105] pour définir une taxonomie de la sûreté de fonctionnement. Ils organisent la sûreté de fonctionnement en trois concepts :

- Les attributs : propriétés quantifiables, évaluables, caractérisant les performances du système
- Les entraves : évènements qui peuvent affecter les performances du système
- Les moyens : techniques pour améliorer les valeurs des attributs

La déclinaison de ces concepts est appelée « arbre de la sûreté de fonctionnement » (Figure 28) :



Figure 28: Arbre de la sûreté de fonctionnement

La sûreté de fonctionnement est définit de plusieurs façon comme suit :[103], [106]

- La fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité et la sécurité
- La science des défaillances
- La confiance disculpée dans le service délivré
- Le maintien de la qualité dans le temps

Quand on parle de la sûreté de fonctionnement, on ne désigne pas uniquement la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la sécurité « FMDS », mais elle se construit à travers toutes ces caractéristiques.

La définition comme étant « Science des défaillances » suppose la connaissance, l'évaluation, la prévision, la mésure et la maîtrise des défaillances. La sûreté de fonctionnement est définit également comme étant « l'aptitude d'une entité à satisfaire une ou plusieurs fonctions requises dans des conditions données. »

La définition comme étant « Confiance justifié dans le service délivré » dépend essentiellement de la perception des utilisateurs. Le services délivré par un système est le comportement perçu par son ou ses utilisateurs, sachant qu'un utilisateur est aussi un système (humain ou physique) qui interagit avec tout l'ensemble.

La définition comme étant « Maintien de la qualité dans le temps » prend en compte la conformité aux egigences explicites ou non explicites.

2. APPROCHES D'ANALYSE DE SURETE DE FONCTIONNEMENT

La sûreté de fonctionnement est un domaine qui englobe plusieurs outils et technique visant l'identification, l'analyse, la gestion et l'optimisation des risques d'un système durant son cycle de vie partant de l'expression du besoin jusqu'à l'utilisation passant par la conception, l'industrialisation et la production.

Toutes les méthodologies adoptées dans la sûreté de fonctionnement ont le même objectif qui se résume en trois points d'action à savoir : l'identification et la modélisation des processus affectant les paramètres FMDS « Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité et Sécurité » dans le but de bien comprendre les mécanismes et les enjeux pour ensuite valoriser les résultats d'analyse et définir le niveau de la SdF du système considéré.

Les méthodes appliquées en sûreté de fonctionnement permettent de caractériser le comportement dysfonctionnel d'un système. Les formalismes utilisée sont spécifiques et ont été développés pour des objectifs d'études très particuliers.

Plusieurs méthodes sont utilisées pour répondre à des problématiques de la sûreté. Elles sont qualitatives lorsqu'elles caractérisent la nature des risques associés aux éléments du système. A l'inverse, elles sont quantitatives lorsqu'elles mesurent les attributs de la sûreté de fonctionnement. Généralement les méthodes qualitatives précèdent les méthodes quantitatives. Ainsi, les méthodes peuvent être caractérisées d'inductives ou de déductives.

Nous présentons dans le tableau ci-dessous un exemple de méthodes d'analyse de risque et de sûreté de fonctionnement avec leur classement :

Tableau 10: Famille de méthode et son classement

Famille de méthode	Méthodes	Inductive/déductive + Qualitative/quantitative
Retour d'expérience	Retour d'expérience	Déductive, qualitative et quantitative
Analyse fonctionnelle	MISME [57]	Déductive et qualitative
	SADT (ou IDEF0)	Déductive et qualitative
	FAST [29]	Déductive et qualitative
	MERISE[30]	Déductive et qualitative
	SA/RT [58]	Déductive et qualitative
Analyse de risques fonctionnels	PHA (Analyse préliminaire de risques) [59]	Inductive et qualitative
	SHA (Analyse de risques système)	Inductive et qualitative
	FHA (Analyse de risques fonctionnels) [21]	Inductive et qualitative
	HAZOP [60]	Inductive et qualitative
	MOSAR [61]	Inductive et qualitative
Analyse des modes de défaillances	AMDE (FMEA) [62]	Inductive et qualitative
	AMDEC (FMECA) [63]	Inductive et quantitative
	AEEL [64]	Inductive et qualitative
Analyses sur des formalismes booléens	Arbre de causes [65]	Déductive et quantitative
	Arbre d'évènement [66]	Inductive et quantitative
	Arbre de défaillance [67]	Déductive et quantitative
Analyses avec des systèmes de transition	Réseau de PETRI [68]	Inductive et quantitative
	Chaine de Markov [69]	Inductive et quantitative
	Système de transition gardée [70]	Inductive et quantitative

2.1. APPROCHE QUANTITATIVES/QUANTITATIVES

- ***Approches qualitatives*** : c'est une approche qui s'interesse aux spécificités d'un système donné à savoir ses points forts, ses points faibles, l'impact d'un constituant sur sa fiabilité, comment maitriser un risque,...etc.
- ***Approche quantitatives*** : c'est une approche qui s'interessent aux résultats de calcul comme le cas du calcul de la probabilité de défaillance, calcul de la disponibilité,..etc.

2.2. APPROCHE INDUCTIVES/DEDUCTIVES

- ***Approche inductive*** : c'est une approche descendante partante des événements redoutés cause des défaillances pour en déduire les conséquances sur le système étudié et sur son envirennement
- ***Approche déductive :*** c'est une approche assendante partante des conséquences pour trouver les causes contrairement à celle inductive

2.3. APPROCHE STATIQUE/DYNAMIQUE

- ***Approches statiques*** : c'est une approche basée sur des analyses structurelles qui ne tiennent pas en considération le volet temporel en se servant des modèle mathématiques

- ***Approches dynamiques*** : c'est une approche qui englobe à la fois les analyses comportementales et temporel dans un même modèle

Les données d'entrées ainsi que les sorties de chaque méthodes sont décomposées comme suit :

- Les entrées sont sous la forme des données du fonctionnelles combinées avec des données statistiques en état brut décrivant les fonctions
- Les sorties sont sous forme de modèles contenant des probabilité, des métriques, des quantifications ou des éléments de gestion qui décrivent le comportement du système étudié

3. ANALYSE ET MODELISATION FONCTIONNELLES

L'analyse et la modélisation du système sous l'angle technique et fonctionnel, présentent une étape essentielle dans la démarche d'évaluation avant la validation.

3.1. ACQUISITION DES INFORMATIONS

Le premier niveau d'analyse porte sur l'acquisition des informations et le recueil des connaissances pour construire une première base de connaissances sur laquelle s'appuie la modélisation et l'analyse proprement dite du système. Ces méthodes peuvent être :

- Informelles, i.e. qu'il n'existe aucune sémantique ou syntaxe guidant l'élaboration de l'information
- Semi-formelle, s'appuyant sur une amorce de syntaxe (arbres,…etc.) et / ou de sémantique (questionnaires guidés…etc.). On trouve à ce niveau une large panoplie d'outils de type :
    - Interviews
    - Questionnaires et check-lists
    - Méthodes de classification
    - Grille d'évaluation

L'étape suivante est généralement celle de la première modélisation. Le système global peut être considéré, selon la méthode retenue, sous forme d'activité, de données ou de processus.

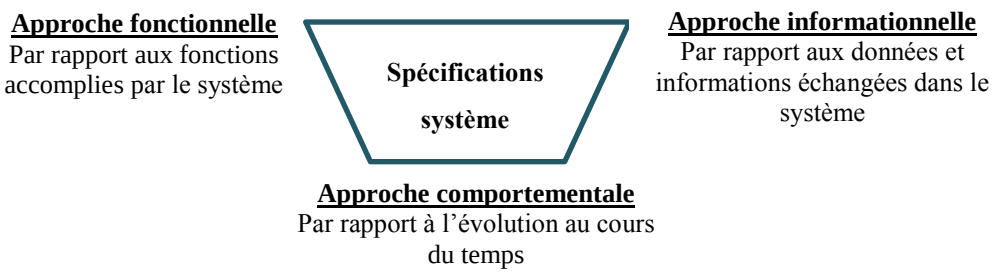


Figure 29: Description d'un système

Selon la figure 29, les méthodes d'analyses peuvent être présentées suivant trois typologies : approche fonctionnelle, approche informationnelle et approche comportementale.

3.2. METHODES FONCTIONNELLES

Ces méthodes permettent l'identification des fonctions à assurer. Elles sont basées sur une approche structurée de manière hiérarchiques, descendante et modulaire. A partie du raffinements successifs, ces méthodes, qui s'appuient très souvent sur un formalisme graphique, conduisent à des spécifications.

Chaque niveau peut ensuite être décomposé en respectant les entrées-sorties du niveau supérieur. La décomposition se poursuit jusqu'à l'obtention du niveau de détail jugé suffisant pour l'analyse.

Parmi les méthodes d'analyse figurant dans cette typologie, on peut citer les méthodes présentées dans les travaux de Bren et de Zwingmann :[107]

- APTE : Application des principes d'entreprises, c'est une méthode très simple et très utilisée dans l'industrie
- ASA : Analyse structurée d'Automate
- FAST : Function Analysis System Technique
- FBS : Function Breakdown Structure
- PBS : Product Breakdown Structure
- WBS : Work Breakdown Structure
- SADT : Structured Analysis and Design Technique
- SART : Structured Analysis and Real Time

D'autres outils, basés sur les mêmes concepts, sont présentes pour l'analyse de systèmes particulièrs. A titre d'exemple :

- Merise [108] est une approche utilisé dans le traitement des systèmes d'information et qui se base sur la séparation des données et des traitements à efféctuer en plusieurs modèles conceptuels et physiques
- Méthode Grai pour le traitement des systèmes décisionnels, s'appuyant sur un modèle conceptuel élaboré selon différents points de vue à partir des théories sur les systèmes, les systèmes hiérarchisés et les systèmes d'organisation [108]
- Méthode UML (Unified Modeling Language), permet aussi une représentation des situations ou des systèmes à base d'objectifs ou d'agents. Largement utilisée dans divers domaines même si elle est issue du développement informatique, UML est un des standars de modélisation qui permet de spécifier , visualiser, construire et documenter tout ype de processus et / ou d'organisation suivant différentes vues sans formalisme strict [109]

Le premier travail à effectuer pour l'analyse fonctionnelle est de formaliser le besoin exprimé par l'utilisateur. Pour ce faire, on utilise la connaissance des milieux extérieurs et les phases d'utilisation du produit pour ensuite définir le besoin auquel répond le système selon le diagramme de la Bête à cornes [110]

4. PARAMETRES DE LA SURETE DE FONCTIONNEMENT

La fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité, la sécurité et la durabilité sont les paramètres principaux caractérisant la sûreté de fonctionnement. Ceux-ci permettent de définir les objectifs attendus d'un système sans négliger la tâche d'évaluation de la qualité vis-à-vis du service attendu d'un système dans l'objectif de définir les points à améliorer [106].

4.1. LA FIABILITE

La fiabilité est définit comme étant « l'aptitude d'une entité à accomplir les fonctions requises dans des conditions données pendant une durée donnée. ». Elle caractérisés par la probabilité R(t) de l'entité E pour accomplir sa fonction requise dans des conditions données durant un intervalle temporel [0, t], sachant que l'entité E n'est pas en panne à l'instant 0.

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

4.2. LA MAINTENABILITE

La maintenabilité est définit comme étant « l'aptitude d'une entité à être maintenue ou rétablie dans un état dans lequel elle peut accomplir une fonction requise. La fonction M(t)

caractérise la probabilité d'une entité E d'être en état à l'instant t pour accomplir sa fonction requise avec une maintenance réalisée avec des procédures et moyens prédéfinies et dans des conditions données, sachant que l'entité était en panne à l'instant 0.

$$M(t)= Prob \{E \text{ est réparable sur } [0 ; t]\}$$

4.3. LA DISPONIBILITE

La disponibilité est l'aptitude d'une entité à être en état d'accomplir les fonctions requises dans les conditions données et à l'instant donné. Elle est caractérisée par la probabilité A(t) que l'entité E soit en état, à l'instant t, d'accomplir les fonctions requises dans des conditions données.

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

4.4. LA SECURITE

La sécurité est l'aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître, dans des conditions données, des évènements critiques ou catastrophiques. Elle est caractérisée par la probabilité S(t) que l'entité E ne laisse pas apparaître dans des conditions données, des évènements critiques ou catastrophiques.

$$S(t) = Prob \{ E \text{ évite des évènements critiques ou catastrophiques sur } [0,t]\}$$

4.5. DONNEES METRIQUES DE LA SURETE DE FONCTIONNEMENT

Les grandeurs présentées ci-dessous caractérisent des durées moyennes associées à la sûreté de fonctionnement :

MTTF (Mean Time To Failure) est la durée moyenne de fonctionnement d'une entité avant la première défaillance :

$$MTTF = \int_0^\infty R(t)dt$$

MTTR (Mean Time To Repair) est la durée moyenne de réparation :

$$MTTR = \int_0^\infty [1 - M(t)]dt$$

MUT (Mean Up Time) est la durée moyenne de fonctionnement après réparation.

MDT (Mean Down Time) est la durée moyenne d'indisponibilité après défaillance.

MTBF (Mean Time Between Failure) est la durée moyenne entre deux défaillances :**MTBF= MDT + MUT**

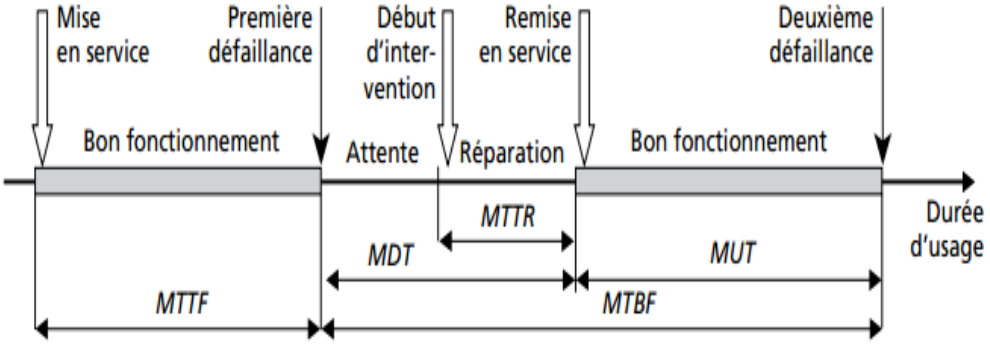


Figure 30: Les durées caractéristiques de la SDF

L'analyse de la sûreté de fonctionnement s'appuie sur la connaissance des modes de fonctionnement normal du système, résultat d'une première étape d'analyse fonctionnelle et de comportement qui engage des outils adaptés. Elle nécessite ensuite la connaissance des modes de dysfonctionnement avec l'identification des phénomènes intrinsèques et extrinsèques au système, susceptibles d'affecter son fonctionnement.

La figure 30 ci-après illustre la démarche générale d'une étude de sûreté de fonctionnement [111]. Il s'agit d'un processus itératif comportant toujours plus ou moins les mêmes différentes étapes :

- Définition précise du système à étudier
- Définition du but de l'étude à réaliser
- Analyse fonctionnelle du système : étape indispensable car, avant d'essayer de comprendre comment un système tombe en panne, il faut avoir compris comment il fonctionne
- Analyse et évaluation dysfonctionnelles : c'est une étape durant laquelle les éléments redoutés sont bien identifiés et les risques sont bien hiérarchisés. Il faut noter que les risques pris en compte sont ceux en relation directe avec le système étudié. Cependant, dans le cas d'un système complexe une modélisation et une étude qualitative ou quantitative des sous-systèmes s'impose

Les résultats obtenus théoriquement devront être vérifié par les experts du domaine qui ont une expérience sur terrain. S'il y aura des résultats contradictoires à la réalité une nouvelle itération s'impose dans le cas d'impact sécuritaire sur la conception du système étudié. Les

résultats de cette analyse sont des actions visant à maîtriser les dysfonctionnements, programmes de tests, politique de maintenance, évaluation du risque résiduel,…etc.

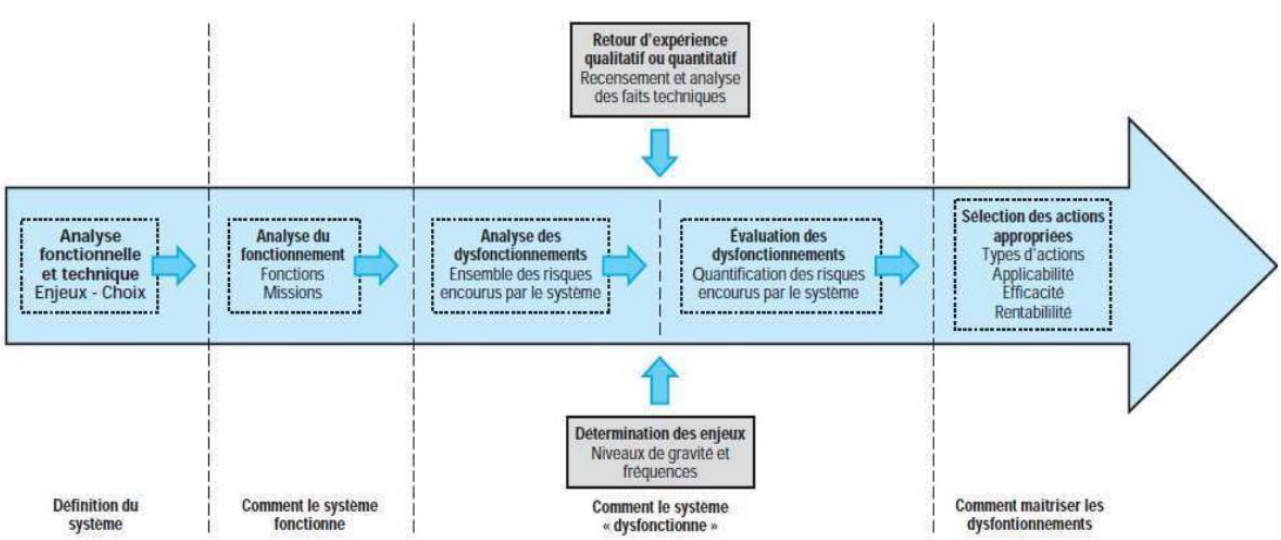


Figure 31: Analyse de la sûreté de fonctionnement

5. *METHODES D'ANALYSE DE LA SURETE DE FONCTIONNEMENT*

5.1. ANALYSE DE FONCTIONNEMENT/ DYSFONCTIONNEMENT

5.1.1. AMDEC

- ***Definition et typologies***

L'analyse des modes de défaillances de leurs effets et leur criticité (AMDEC) est une « technique d'analyse utilisée par une équipe de conception du produit comme un moyen pour identifier, définir, et éliminer, dans la mesure du possible, les défaillances potentielles d'un système (...) connue » [112]. C'est une méthode bien comprise dans l'ingénierie et décrite par de nombreux auteurs dans la littérature tels que LINDEMANN 2006, OTTO & Wood, 2001, PAHL & BEITZ 2006 et STAMATIS 2003. Les possibilités d'application de l'AMDEC sont multiples car différents systèmes peuvent être analysés tout en prenant en considération les concepts, la conception, les procédés ou les services [113].

L'analyse constitue une suite logique de l'action en réduction de risques. C'est l'analyse inductive de recherche des effets des défaillances des composants sur les sous-systèmes et le système.

En principe, la criticité ou probabilité d'occurrence des défaillances n'est pas calculée lorsque l'analyse s'effectue au niveau fonctionnel.

Dans un premier temps, les défaillances peuvent se caractériser par leur composante de sévérité, il s'agit d'AMDE, analyse des modes de défaillances et de leurs effets. Une étude AMDEC comprend en plus l'évaluation de la criticité.

Il existe trois types d'AMDEC : [114]

- *AMDEC Produit* (produit fini, sous-ensemble, composant), elle a le but des zéro défauts
- *AMDEC Process* Produit (opération de production) également appelé AMDEC Processus, elle a le but des zéro non-conformités
- *AMDEC Moyen de production* (machine), elle a le but des zéro pannes

- ***Méthodologie AMDEC***

Elle se pratique, comme l'analyse de la valeur, en groupe de travail dirigé par un animateur formé à la méthode. La méthode comprend différentes étapes : [114]

- Une revue aussi détaillée que possible, à partir de l'APR, des possibilités de défaillances du système étudié pour chaque fonction de l'équipement et de ses interfaces
- Une identification des composants ou équipements nécessitant une analyse de type AMDEC moyen
- Pour chaque défaillances identifiée, la détermination des causes effets sur les autres sous-systèmes
- L'évaluation de la criticité C= Détectabilité x Occurrence x Gravité = D x O x G
- La détermination des moyens de détection de défaillances
- Des propositions d'action pour supprimer la défaillance

Nous résumons la démarche AMDEC comme suit :

Nous pouvons définir l'AMDEC en tant que procédé systématique pour identifier les modes de défaillances potentiels. Il s'agit de traiter les défaillances avant qu'elles ne surviennent, avec l'intention de les éliminer ou de minimiser les risques associés, c'est donc une méthode préventive.

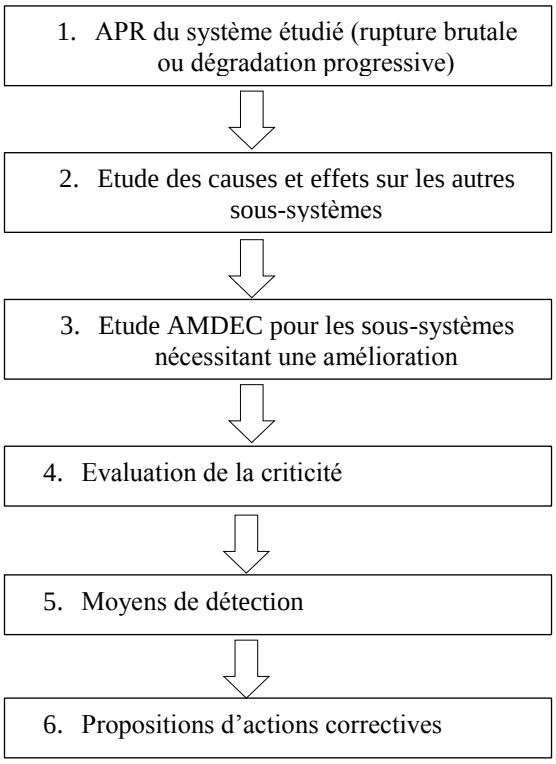


Figure 32: Démarche de l'approche AMDEC

5.1.2. AUTRES METHODES

Nous avons bien détaillé la méthode AMDEC que nous allons utiliser dans les chapitres suivants pour l'évaluation de la maintenabilité en phase de conception.

Nous avons également d'autres méthodes dysfonctionnelle/ fonctionnelle que nous pouvons consulter dans plusieurs écrits dans la littérature de Zwingmann et Lahonde [87], [115], à savoir les arbres de défaillances et les diagrammes de fiabilité.

5.2. ANALYSE DE FONCTIONNEMENT/DYSFONCTIONNEMENT PAR LES OUTILS DE LA THEORIE STOCHASTIQUE

Dans la littérature plusieurs méthodes d'analyse sont présentes avec un développement détaillé d'utilisation et de champs d'application à savoir les réseaux de pétri stochastique, les graphes de Markov et la simulation de Monte-Carlo.

Dans ledit travail nous allons nous intéresser aux réseaux bayésiens qui seront traités en détail dans la première partie du deuxième chapitre.

VIII. CONCLUSION ET SYNTHESE DE L'ETAT DE L'ART

L'état de l'art présenté dans le premier chapitre nous a permis d'enquêter sur plusieurs champs de recherche (Figure 33). Le premier concerne le contexte de l'étude, les théories et méthodologies avec la définition de la problématique au sens large. Cette partie nous a permis de stabiliser les notions fondamentales utilisées dans ce travail avec le cadrage de la problématique dans un contexte industriel. La deuxième partie s'est focalisé sur les approches de conception plus en détail. Nous avons par ailleurs soulevé les difficultés ressenties par les concepteurs durant un processus de développement d'un système. Cette partie nous a ensuite ouvert sur la comparaison et choix d'approche dans la littérature, qui nous a amené à réfléchir sur l'ouverture de ces approches de conception sur les théories et méthodologies de sûreté de fonctionnement qui est un domaine d'étude très large et très riche en taxonomie et en champs d'application et de cas d'utilisation.

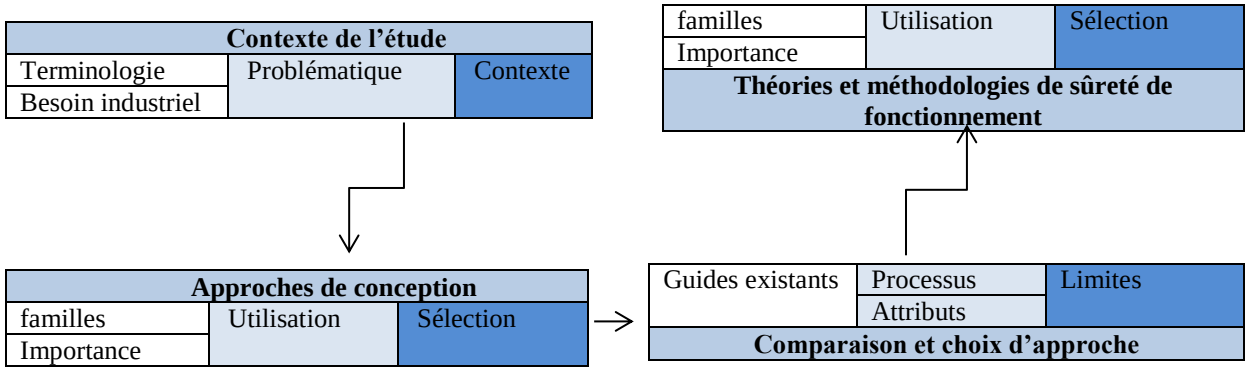


Figure 33: vue globale des thématiques abordées dans l'état de l'art

Le contexte du marché mondial actuel connait une intense compétition et une complexité croissante des produits/Système et des processus de développement associés qui ont incité les académiciens et praticiens à développer des approches et modèles. Ces représentations abstraites permettent aux concepteurs de représenter leurs activités de manière intelligente, de bien comprendre le processus et de mieux prédire son comportement pour mieux agir dans le sens des objectifs coût/Délais / qualité fixés au début de chaque projet de conception. Malgré la diversité et l'importance de chaque méthode et approche, de nombreuses critiques de la part des concepteurs à l'encontre de ces approches ont été exprimé. c'est en s'interrogeant sur la façon d'implémenter la combinaison entre les modèles de processus de conception et les approches de sûreté de fonctionnement sur terrain, de les rendre plus spécifiques et plus adéquate à supporter les activités et le besoin des concepteurs, que nous nous sommes focalisés sur l'association des méthodes de conception aux modèles de

processus de développement de produits tout en prenant en compte le volet sûreté de fonctionnement dans les phases amont de conception.

Malgré les atouts des différents méthodes de conception en terme de soutenir les concepteurs, de prendre en compte en phase amont de conception les spécifications et contraintes et aussi de remédier à la complexité des systèmes. Ces méthodes ont des faiblesses en pratique à souligner et surtout en combinant conception et sûreté de fonctionnement. Ce constat est unanime quel que soit la famille de méthodes considérée et quel que soit la zone géographique et le domaine auquel la méthode est appliquée.

Finalement, l'état de l'art présenté dans ce travail nous a permis de mettre en cause la pertinence et se poser la question sur le choix d'une méthode vis-à-vis d'un projet de conception et l'approche de sûreté de fonctionnement adéquate pour l'intégration de la maintenabilité dans les phases amont de conception que ce soit une conception routinière ou innovante. Pour en conclure, nous ne pouvons pas qualifier une méthode de bonne ou de mauvaise mais plutôt se demander si la méthode est adéquate avec nos objectifs et avec le contexte de l'étude, dans le but de proposer des formalismes et des approches qui permettent de combiner conception et sûreté de fonctionnement. Cette vision nous mène au choix du concept Pahl & Beitz en combinaison avec l'approche TRIZ pour les sujets innovants.

Deuxième chapitre

Contribution à l'intégration de la maintenabilité en phase de conception préliminaire

CHAPITRE 2 : CONTRIBUTION A L'INTEGRATION DE LA MAINTENABILITE EN PHASE DE CONCEPTION PRELIMINAIRE

I. INTEGRATION DE LA MAINTENABILITE EN CONCEPTION PRELIMINAIRE DANS LE CAS D'UNE CONCEPTION ROUTINIERE PAR UNE MODELISATION BAYESIENNE

1. INTRODUCTION

L'incertitude est un problème couramment rencontrés dans les applications du monde réel. Elle peut être décrite comme une quantité insuffisante de l'information. Néanmoins, l'incertitude peut aussi exister dans des situations qui ont une quantité suffisante d'information. En outre, l'incertitude peut être réduite ou supprimée par l'ajout de nouvelles informations. Ajout de plus d'informations dans des processus complexes peut conduire à l'exploitation minière des connaissances limitées. L'incertitude peut être calculée mathématiquement avec la théorie des probabilités. Par conséquent, les modèles établis sur des inférences probabilistes ont la capacité d'attribuer une valeur probabiliste selon un principe défini.

En conséquence, la prédiction avec un grand nombre d'états dans un modèle est complexe. La question qui se pose c'est "la façon dont la prévision est réalisée en présence d'un grand nombre d'états dans un modèle?" Une réponse à cette question est l'emploi du réseau bayésien (RB) avec plusieurs variables [116] . Les réseaux Bayésiens aussi connu comme les réseaux de croyance, appartiennent à la famille des modèles graphiques probabilistes. Ces structures graphiques correspondent à des connaissances sur un domaine incertain. Plus précisément, chaque nœud de la structure graphique représente une variable aléatoire, tandis que les arêtes / arcs entre les nœuds représentent des dépendances conditionnelles entre les nœuds. Ces dépendances conditionnelles sont estimées en utilisant des méthodes statistiques et informatiques reconnus.

L'application des RB à la sûreté de fonctionnement est un développement relativement récent, leur popularité a grandi dans le domaine des analyses de fiabilité des systèmes depuis la fin des années 90 [116], [117] .Un ensemble de 200 articles d'applications des RB en sûreté de fonctionnement sont référencé dans un article de synthèse de Weber et al [118]. Cette partie illustre l'intérêt porté à la modélisation par RB dans le domaine de la sûreté de fonctionnement, de l'analyse des risques et de la maintenance durant ces dix dernières années et donne une synthèse de verrous scientifiques restant à résoudre.

Les articles marquants relevés dans cette synthèse se sont attachés à démontrer l'équivalence avec les méthodes d'évaluations probabilistes classiquement utilisées en sûreté de fonctionnement. Nous trouvons dans les travaux de Torres Toledano [116] une analyse des avantages des RB par rapport au formalisme des Diagrammes de Fiabilité (DF). Les travaux de Bobbio [119], [120] expliquent comment un Arbre de Défaillance peut être modélisé par un RB. Les travaux de Boudali [120]–[122] décrivent la représentation des Arbres de Défaillances Dynamiques par des Réseaux Bayésiens Dynamiques. Ainsi, [123]–[125] expliquent également comment les RBD peuvent être utilisé pour montrer les techniques de modélisation de la fiabilité des systèmes par Chaînes de Markov. Ces articles présentés dans la littérature ont comme objectif de montrer l'équivalence des RB avec les outils classiques, cependant ils ne développent pas toujours les nombreux avantages des RB.

Parallèlement à ces articles focalisés sur la comparaison de méthodes, de nouvelles méthodes de modélisation utilisant les réelles capacités de modélisation des RB sont apparues. L'un des premiers articles [126] propose une méthodologie exploitant la modélisation par RB dans le cadre de l'évaluation de la fiabilité d'une infrastructure. Le travail publié de Bensi et al en 2013 [127] propose une méthode de construction de la structure du modèle RB défini en fonction de liens minimaux ou des coupes minimales, pour la modélisation de la performance des systèmes multi-états. Cet article montre bien quelques véritables intérêts de l'utilisation des RB en sûreté de fonctionnement par rapport aux méthodes de modélisation classiques.

Nous avons aujourd'hui à notre disposition un certain nombre d'articles de synthèse [118], [128], [128], [129] qui donnent une bonne vue de la maturité de l'applicabilité des RB à la sûreté de fonctionnement au sens large. L'Institut de la Maîtrise des Risques (IMdR) a soutenu plusieurs projets permettant de promouvoir la modélisation par RB : le projet IMdR P04-7 a permis d'évaluer la pertinence de l'approche de modélisation par RB par rapport aux problèmes de la sûreté de fonctionnement posés par des industriels. Malheureusement, ce formalisme de modélisation n'est pas encore totalement accepté dans le milieu industriel. Ce manque d'acceptation vient du fait de la nouveauté relative de l'outil, du manque possible de lisibilité au niveau du modèle, du fort pouvoir de modélisation qu'il faut dominer et de la connotation du mot 'Bayésien' dans l'esprit d'un fiabiliste.

Les Réseaux Bayésiens peuvent apporter une aide efficace dans la modélisation en sûreté de fonctionnement. En effet, ils ont un pouvoir de modélisation et d'analyse important.

Ils fournissent un cadre formel permettant de manipuler ou traiter des événements probabilistes en les représentants par des variables aléatoires discrètes, ainsi que les relations qui les lient en les représentants par des probabilités conditionnelles. La modélisation par cette méthode est appréciée pour être fondée sur un puissant formalisme d'expression des dépendances et indépendances complexes entre des variables aléatoires. Ce formalisme est donc bien adapté à la représentation et à l'étude des systèmes complexes qui est notre cas d'étude.

De ce fait, définir complétement les réseaux bayésiens requiert donc en premier lieu d'introduire des notions de théorie des graphes d'une part et des notions probabilistes d'autre part. En plus, comprendre d'où viennent les réseaux bayésiens implique de faire retour d'abord sur la question du traitement de l'incertitude.

2. APPROCHE BAYESIENNE : DEFINITIONS ET HISTORIQUE

Le terme «bayésien» fait référence à Thomas Bayes et est censé être mis en place pour la première fois dans les années 1950. Une version généralisée du théorème de Bayes a été démontrée de façon indépendante par Pierre-Simon et marquis de Laplace. Ainsi, les réseaux Bayésiens (RB) ont été présentés dans les écrits de Torres et al [117] en mettant l'accent sur trois notions. Les deux premiers concernant la nature subjective de l'information d'entrée et la deuxième sur la mise à jour de l'information. Le dernier trait est la distinction entre le mode de connexion et la preuve qui a été prise en compte par Thomas Bayes mentionnée dans [118]. Plus tard dans [119] , les auteurs ont mis le point sur les avantages des RB comme un champ d'apprentissage. Par conséquent, nous pouvons remarquer plusieurs champs de recherche qui utilise les RB telles que le traitement de l'image, la prise de décision, l'analyse de la sûreté de fonctionnement des systèmes, la médecine et l'analyse des données, et d'autres domaines de connaissances supplémentaires.

Les réseaux bayésiens s'appuient sur un théorème de Bayes qui est un résultat de base en théorie des probabilités, issu des travaux de Thomas Bayes (1702-1761), présenté à titre posthume en 1763. Ce théorème définit les probabilités comme suit : [120]

$$\mathbf{P(A\backslash B)\,P(B) = P(A \cap B) = P(B\backslash A)\,P(A)}$$

$$\mathbf{P(A\backslash B) = \frac{P(B\backslash A)P(A)}{P(B)}}$$

Avec :

- **P(A)** : la probabilité a priori de A ou la probabilité marginale de A, elle est dit « antérieure », au sens qu'elle précède toute information sur B
- **P (A| B)** : la probabilité a posteriori de A sachant B, elle dépend directement de B. elle est aussi appelée la fonction de vraisemblance de A
- **P(B)** : la probabilité a priori de B ou la probabilité marginale de B

Les réseaux bayésiens sont apparus dans la première moitié des années 1980 et en intelligence artificielle. Plus précisément, ils ont été introduits dans ce champ comme des outils de traitement de l'incertitude. Ils sont des couples composés d'un graphe orienté acyclique et d'une distribution de probabilités, définis sur un même ensemble de variables, et qui entretiennent un certain rapport. [120]

Un réseau bayésien est un système représentant la connaissance et permettant de calculer des probabilités conditionnelles apportant des solutions à différentes sortes de problématiques.

La structure de ce type de réseau est simple : un graphe dans lequel les nœuds représentent des variables aléatoires, et les arcs (le graphe est donc orienté) reliant ces dernières sont rattachées à des probabilités conditionnelles (figure 34).

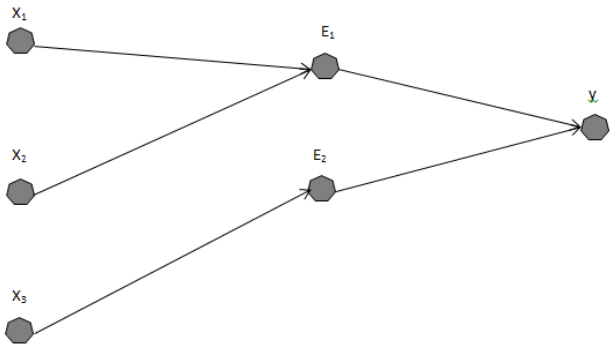


Figure 34: exemple de modélisation par un RB

Notons que le graphe est acyclique : il ne contient pas de cycle. Les arcs représentent des relations entre variables qui sont soit déterministes, soit probabilistes.[130]

La force de la modélisation par RB réside dans sa capacité de calcul. Un RB permet de calculer la distribution marginale de chaque variable en fonction de :

- L’observation des variables connues ou de la vraisemblance sur l’état de ces variables
- La connaissance a priori des lois de probabilités des variables non observées
- Lois de probabilités conditionnelles entre les variables

Nous constatons que l'observation d'une ou plusieurs causes n'entraîne pas systématiquement l'effet ou les effets qui en dépendent, mais modifie seulement la probabilité de les observer.

Les réseaux bayésiens comportent des graphes sur lesquels on peut lire ce qui peut être ignoré et, positivement, ce qui doit être pris en compte à l’occasion de la révision de la probabilité d’un état du monde donné. Il apparaît alors que la composante graphique des réseaux bayésiens est essentielle au traitement sémantique de l’incertitude qu’ils véhiculent. A l’inverse, les graphes qui sont mobilisés dans le contexte syntaxique sont toujours des auxiliaires et jamais porteurs d’informations indispensables pour mener l’inférence.

Selon le type d’application, le choix d’une méthode parmi d’autre se base sur différents critères à savoir : la facilité, le coût, le délai et la mise en œuvre de la solution. De ce fait, choisir un Réseau bayésien ou d’autres modèles [131] tel que réseau neurones, arbres de décision ou autre modèle en pratique est la même chose.

3. CALCUL DES INDICATEURS DE SURETE DE FONCTIONNEMENT

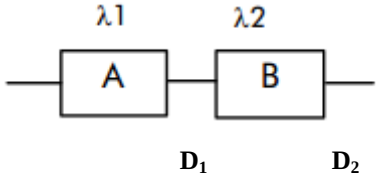
Nous présentons un rappelle sur le calcul des paramètres de sûreté de fonctionnement selon la disposition en série ou en parallèle. [122]

▪ ***Système en série*** :

R= R(A) x R(B)

D= D_1 x D_2

I= 1- D = $\frac{\lambda}{\lambda+\mu}$



Avec :

R : Représente la probabilité de bon fonctionnement du système

R(A) : Probabilité de bon fonctionnement de l’équipement A

R(B) : Probabilité du bon fonctionnement de l’équipement B

D : La disponibilité du système

D1 : La disponibilité de l’équipement A

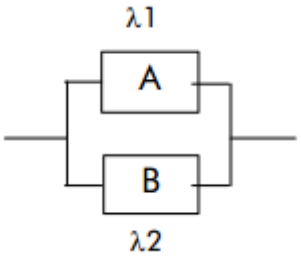
D2 : La disponibilité de l'équipement B

I : Représente l'indisponibilité du système

▪ ***Système en parallèle :***

R= R(A) + R(B) - R(A) x R(B)

D= 1- ((1-D1) x (1-D2))



D_1

D_2

4. *MODELISATION D'UN SYSTEME MULTI-ETATS PAR UN RESEAU BAYESIEN*

4.1. Définition des variables

Les variables d'états xi des composants d'un système de variables y sont définis comme suit :

- Le composant i est en fonctionnement pour xi=0
- Le composant i est dans un état de fonctionnement dégradé pour xi = {1, …..,(li-1)}
- Le composant i est en état de panne pour xi= {li,……, ni}
- Le système en état de fonctionnement pour y=0
- Le système en état de fonctionnement dégradé pour y= {1,……, (l-1)}
- Le système en état de dysfonctionnement pour y= {l,….., n}

Avec :

{1,…, (li-1)} : forme les états de fonctionnement dégradés du composant {li,…, ni) : forme les états de panne du composants qui conduit à une panne du système.

Un tel système est très difficile de le présenter par un arbre de défaillance ou par une méthode classique connue en analyse de sûreté. Cependant, les notions de coupes minimales et de chemins de succès minimaux permettent de définir totalement les relations entre les états du système et les états des composants d'où l'intérêt d'une structuration en réseau Bayésien.

4.2. Modèle réseau Bayésien pour les scénarios de fonctionnement

Dans le but d'illustrer le principe sur lequel un réseau Bayésien se base, nous avons pris l'exemple d'un système à trois vannes (V1, V2, V3) en deux étages (figure 35): [129]

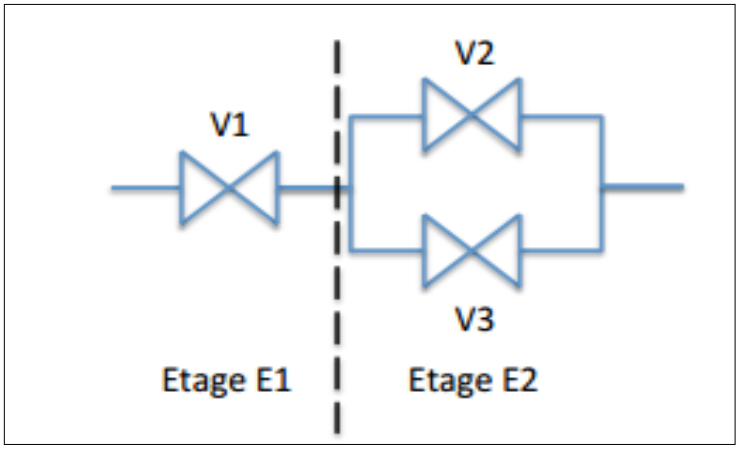


Figure 35: Système a trois vannes en étages

Les trois états du système sont définit comme suit :

- « 0 » : un état de fonctionnement normal
- « 1 » : un état de blocage en position fermée
- « 2 » : un état de blocage en position ouverte

Pour l'état du fonctionnement du système i.e (y=0), il existe sept scénarios li comme suit :

- L1 = {x1 = 0, x2 = 0}
- L2 = {x1 = 0, x3 = 0}
- L3 = {x1 = 0, x2 = 2}
- L4 = {x1 = 0, x3 = 2}
- L5 = {x1 = 2, x2 = 0, x3 = 0}
- L6 = {x1 = 2, x2 = 1, x3 = 0}
- L7 = {x1 = 2, x2 = 0, x3 = 1}

En générant les liens entre les variables les états des composants et la réponse de sortie tel que y=0, nous allons avoir la structure du RB suivante (figure 36) :

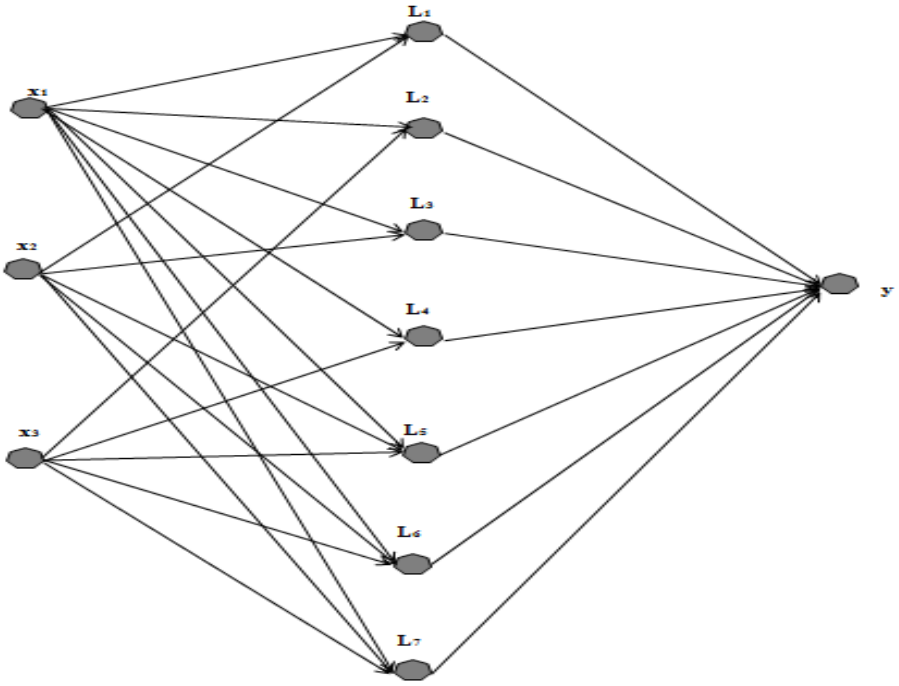


Figure 36: réseau bayésien par les liens minimaux pour le système des vannes

Pour déterminer une structure mieux lisible, nous pourrons de la figure 37, pour le cas {L1, L3} définir : L13 = {L1 ∪L3}, L13 = 0 pour les deux scénarios : L1 = {x1 = 0, x2 = 0} et L3 = {x1 = 0, x2 = 2} ; dans tous les autres cas L13 = 1. Pour L24 aussi définie de la même manière. Enfin pour L567 la variable est dans l'état 0 pour les trois scénarios : L5 = {x1 = 2, x2 = 0, x3 = 0}, L6 = {x1 = 2, x2 = 1, x3 = 0}, L7 = {x1 = 2, x2 = 0, x3 = 1}. La structure plus compacte du RB est présentée comme suit (Figure 37).

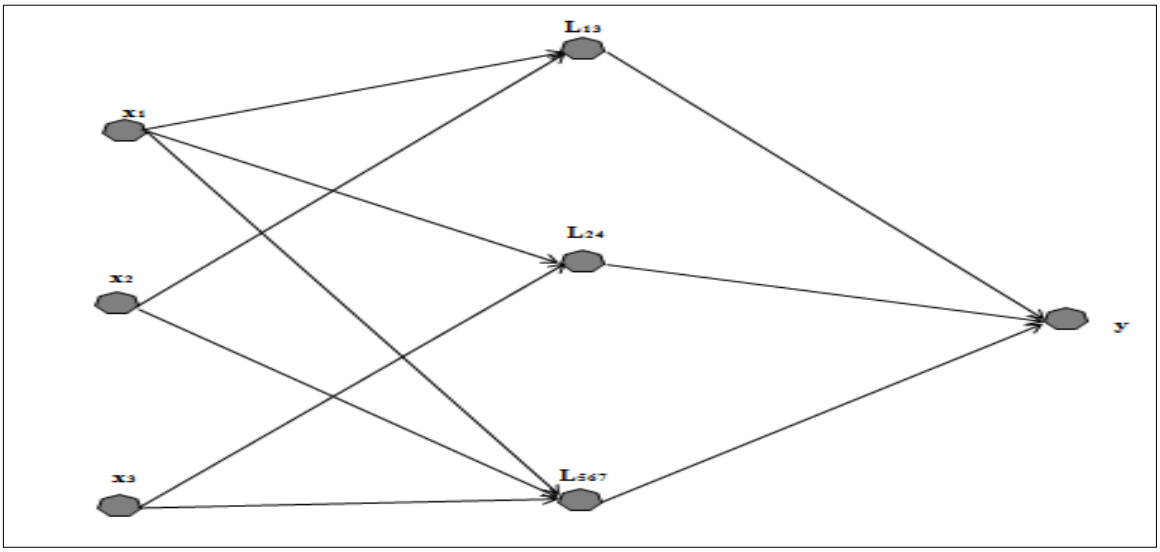


Figure 37 : Structure d'un RB compact

La réalisation d'un réseau Bayésien après une analyse fonctionnelle, AMDEC ou HAZOP permet de décomposer le système en faisant apparaître les fonctions du système, de spécifier les états des variables représentant ainsi que la sortie des fonctions avec ses modes de fonctionnement et de dysfonctionnement en spécifiant les variables structurant le modèle selon des niveaux d'abstraction décrits par une architecture fonctionnelle. [129]

5. CONCLUSION ET SYNTHESE

Les modèles que nous avons présentés dans cette partie sont des modèles statiques, ils ne prennent pas en compte la dimension temporelle. La démarche de construction du RB que nous avons proposé généralise les autres méthodes de modélisation au cas multi-état. Nous avons illustré dans cet exemple comment les RB peuvent être utilisés pour résoudre les problèmes de la modélisation de systèmes complexes en sûreté de fonctionnement. Ce formalisme de modélisation est très bien adapté à la modélisation de systèmes complexes multi- états dans lesquels les dépendances entre les variables ne sont pas toujours déterministes. Le formalisme de modélisation par RB généralise les formalismes classiques tels que les arbres de défaillances ou diagrammes de fiabilité préconisés par les normes. La modélisation par RB est donc une solution efficace et flexible pour la représentation des systèmes complexes et multi-états.

Il existe plusieurs structures de RB pour un problème donné. La validation du modèle repose principalement sur la méthodologie de construction du modèle qui doit être confrontée à l'expérience, à l'expertise et à des scénarios de test pour valider le fonctionnement du modèle sur des cas connus.

Bien que la modélisation par RB soit très compacte et permette de manipuler plusieurs variables, alors que nous aurons besoin de modéliser des milliers de variables dans le cas de grands systèmes industriels. Dans cette situation, les RB arrivent à leurs limites. Quand le nombre de fonctions et de variables devient trop important, c'est-à-dire que les modèles ne peuvent plus être représentés dans la mémoire des systèmes informatiques qui les manipulent, il est alors nécessaire d'utiliser un formalisme de modélisation plus adapté.

Une illustration de l'utilisation de tels modèles pour la prise en considération de la maintenabilité et la disponibilité en phase de conception préliminaire dans le cas d'une conception routinière pour un système éolien sera présentée dans la troisième partie du chapitre 3.

II. INTEGRATION DE LA MAINTENABILITE EN CONCEPTION PRELIMINAIRE DANS LE CAS D'UNE CONCEPTION INNOVANTE EN SE BASANT SUR L'APPROCHE TRIZ

1. INTRODUCTION

Dans cette partie du chapitre, nous allons présenter dans un premier temps le concept de la théorie TRIZ. Dans un second temps, nous donnerons une vue sur le développement du processus de conception. Enfin, nous allons définir les étapes de notre proposition de démarche pour l'intégration de maintenabilité en phase de conception et puis l'intégrer dans le modèle globale basé sur TRIZ.

2. APPROCHE D'EVALUATION ET DE VALIDATION DE LA MAINTENABILITE EN CONCEPTION PRELIMINAIRE

1.1. Evaluation de la maintenabilité

1.1.1. Définition

La Maintenabilité est définit par Kapur et Lamberson comme étant « la probabilité d'un dispositif à être maintenu ou rétabli dans des conditions données, pendant un intervalle de temps donné ». Ainsi, selon l'Afnor X 60-500 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 ».

Dans l'ouvrage « Military HandBook », 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 prescrite ». En d'autre terme, elle représente la facilité et la rapidité avec lesquelles un système peut être remis en état de fonctionnement après une défaillance. Nous trouverons dans la littérature plusieurs références [35], [132]–[134] qui présentent les critères qui confèrent à un système un bon niveau de maintenabilité.

Un équipement est maintenable s'il peut être réparé rapidement. La réparation est l'ensemble des opérations élémentaires de rétablissement incluant les délais logistiques. La maintenabilité fait allusion à la rapidité des tâches de réparation alors que la fiabilité s'intéresse à la réduction du nombre de défaillances.

1.1.2. Indicateurs de maintenabilité

Selon plusieurs écrits, nous pouvons classer les indicateurs de maintenabilité comme suit :

Tableau 11:Classifications des indicateurs de maintenabilité

Familles d'indicateurs	Indicateurs	Maintenance corrective	Maintenance préventive
Les indicateurs de durées des activités de maintenance	Moyenne de temps actifs	**MTTR**=$\frac{\sum_{i=1}^{N}(\lambda i \, x \, MTTRi)}{\sum_{i=1}^{N}\lambda i}$	**M**pt=$\frac{\sum_{j=1}^{M}(fj \, x \, Mptj)}{\sum_{j=1}^{M} fj}$
		M$_{moy}$ = $\frac{(\lambda \, x \, MTTR)+(f \, x \, Mpt)}{\lambda+f}$	
Les indicateurs de fréquences des activités de maintenance	Temps moyen entre activités	**MTBF** =$\frac{1}{\lambda}$	**MTPM**= $\frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{f}}$
		MTBM = $\frac{1}{\lambda+f}$	
Les indicateurs de temps de main d'œuvre	Temps moyen de main d'œuvre par heure de fonctionnement	**MLH$_c$/OH=** $\sum_{i=1}^{N} \boldsymbol{\lambda i \, x \, Mcti \, x \, Nci}$	**MLHp/OH=**$\sum_{j=1}^{M}$ **fj** $\boldsymbol{x}$ **M**ptj $\boldsymbol{x}$ **N**pj
		MLH/OH=$\frac{(\boldsymbol{\lambda \, x} \, \mathbf{MLHc}) + (\boldsymbol{f \, x \, MLHp})}{\boldsymbol{\lambda+f}}$	
les indicateurs de coûts des activités de maintenance	Coût des activités par heure de fonctionnement	**MC**c= $\sum_{i=1}^{N} \lambda i \, x \, MCci$	**MC**p= $\sum_{j=1}^{M} fj \, x \, MCpj$
		Mc/OH= $\frac{\lambda \, x \, MCc + \, f \, x \, MCp}{\lambda+f}$	

Les différents indicateurs sont définis comme suit:

MCc : Coût moyen par activité corrective

MCp : Coût moyen des activités préventives par heure de fonctionnement

Mc : Coût moyen des activités par heure de fonctionnement

$MCci$: Coût de l'activité corrective sur le composant i

$MCpj$: Coût de l'activité préventive j

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

MLHc : Temps moyen de main d'œuvre par activité corrective

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

$Mcti$: Temps de maintenance corrective du composant i

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

M**ptj** : Temps d'exécution de l'activité préventive j

N**pj** : Nombre d'opérateurs affectés à l'activité préventive j

MTBM : Temps moyen entre les actions de maintenance

MTPM : Temps moyen entre les actions de maintenance préventive

MTBF : Le temps moyen entre pannes

Mpt : Moyenne des temps de maintenance préventive

$\mathbf{M_{moy}}$: Moyenne des temps actifs de maintenance

MTTR : Temps moyen de réparation

f_i : Fréquence de l'activité préventive j

λ : Taux de panne du système

f : Taux d'activités de maintenance préventive du système

On peut conclure que les indicateurs que nous allons évaluer en conception sont le temps moyens de réparation **MTTR** ainsi que la fréquence des activités de maintenance préventive **f** tout en prenant en considération les taux de défaillance et les avis d'experts comme sources de données.

1.1.3. Modélisation des avis d'experts

Dans le cadre de notre travail, nous considérons un équipement neuf semblables à l'équipement à évaluer en phase de conception mis en exploitation à t = 0. Nous supposons que les durées de bon fonctionnement de cet équipement suivent une loi exponentielle de paramètre λ. Le fournisseur de cet équipement fournit un taux de défaillance de base noté λ_0. L'équipement sera exploité pendant plusieurs périodes et les durées de bon fonctionnement ainsi que le nombre de défaillances sera enregistré pour chacune des périodes. Ainsi, à chaque période, une vraisemblance sera constituée pour l'équipement.

Au début de chaque étape de conception d'un équipement, plusieurs experts en domaine seront consultés pour donner leurs avis sur le taux de défaillance.

Nous allons déterminer la fonction de vraisemblance à partir des données de bon fonctionnement dans le but d'avoir un taux de défaillance maximal à estimer.

Pour une période k donnée (k ∈ {1, ..., K}), nous disposons des durées de bon fonctionnement de l'équipement $x_{i,k}$ (i ∈ {1, ..., n_k}). Nous supposons que pour chaque période k nous avons n_k défaillances enregistrées. Nous supposons également que les durées de bon fonctionnement de l'équipement suivent une loi exponentielle de paramètre λ de densité

$f(t, \lambda) = \lambda \exp^{(-\lambda t)}$. Nous pouvons donc écrire la fonction de vraisemblance comme suit : [132], [135], [136]

$$\mathbf{L_k(X, \lambda)} = \prod_{i=0}^{nk} f(xik, \lambda)$$

$$= \prod_{i=0}^{nk} \lambda exp^{(-\lambda \mathrm{xik})} \qquad \forall k \epsilon \{1, \ldots\ldots, K\}$$

$$= \lambda^{n_k} exp^{(-\lambda \sum_{i=0}^{nk} xik)} \quad (3.1)$$

Avec X désigne l'ensemble de toutes les durées de bon fonctionnement de l'équipement estimé pour la période k. Cette fonction de vraisemblance sera combinée avec la distribution a priori sur le paramètre λ.

Après un calcul mathématique qui détermine le maximum global de la fonction L_k, l'estimateur du maximum de vraisemblance du paramètre λ pour la période k est donné par l'équation :

$$\lambda_{k\max} = \frac{nk}{\sum_{i=0}^{nk} xik} \qquad \forall k \epsilon \{1, \ldots\ldots, K\} \qquad (3.2)$$

En conclusion, nous allons prendre en considération en phase de conception à partir des avis des experts qui ont une expérience sur terrain, le taux de défaillance $\lambda_{k\max}$.

1.1.4. Approche d'évaluation

Le processus générique d'évaluation et de validation d'une performance comportementale se fait en aval du processus de conception. En effet, au cours de la phase de conception le concepteur conçoit une ou plusieurs solutions qui seront stocké dans une base de données des solutions à évaluer d'un CAO (conception assistée par ordinateur), puis le déclanchement du processus d'évaluation se fait par le concepteur au moment où il fait le choix d'une solution à valider pour tester que la solution envisagée répond aux exigences prédéfinis.

Ce processus générique peut être appliqué à n'importe quelle performance mesurée par un indicateur quantifiable, ce processus se compose de trois étapes principales : la collecte des données, l'évaluation des solutions et l'analyse des résultats.

Dans cette optique, nous allons appliquer ce processus qui comporte trois sous-processus à savoir: la collecte des données, l'évaluation de l'indicateur et l'analyse des résultats. Une décomposition de chacun des trois sous-processus et la description détaillée de chaque sous-processus jusqu'aux étapes élémentaires est nécessaire. Les données d'entrées, leurs sources d'obtention, les données de sorties et les outils à mettre en œuvre dans chaque étape élémentaire sont indispensables à définir au préalable.

Nous supposons que le cahier de charge définie un seuil $MTTR^*_s$ que le système doit satisfaire.

D'autre part, en supposant que la solution à évaluer à une structure série le MTTRs est calculée comme suit :

$$MTTR_s = \frac{\sum_i \lambda i \; MTTRi}{\sum_i \lambda i} \qquad (3.3)$$

Avec :

- $MTTR_i = \sum_i Tik$: la moyenne des temps de réparation d'un composant i

- $T_{i,k}$: la durée de l'étape k du processus actif de maintenance corrective du composant i
- $MTTR_s$: la moyenne des temps de réparation de la solution proposée

Après avoir déterminer les indicateurs de maintenabilité, de déterminer les sources de données et de modéliser la fonction de vraisemblance des avis d'experts sur le taux de défaillance, l'approche est comme suit :

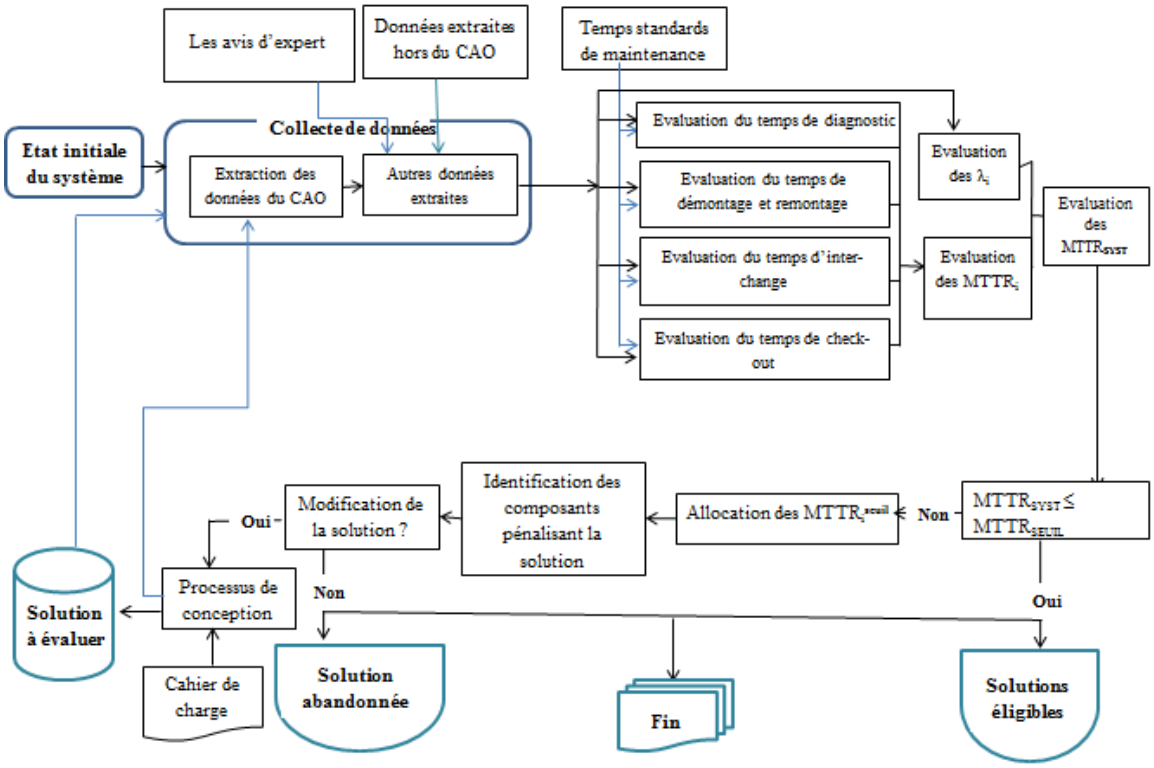


Figure 38: Approche d'évaluation des MTTR en phase de conception avec la prise en compte des avis d'experts [135]

L'évaluation d'un composant passe par l'évaluation de la durée de chaque étape de la phase active de la maintenance à savoir : diagnostic, démontage, remplacement, remontage et vérification du bon fonctionnement.

L'approche d'évaluation se compose de plusieurs étapes :

- ***Etat initiale du système et collecte données*** : dans un premier temps le concepteur propose une solution conçue à évaluer avec comme source de données un outil de la conception assistée par ordinateur (CAO) (tel que CATIA), ainsi les avis d'expert modéliser dans 3.3 et d'autres sources. Ensuite ces données passent à la phase d'évaluation selon le processus de la phase active mentionné ci-avant

- ***Phase d'évaluation*** :
    - *Temps de diagnostic* : la première étape de cette phase est le diagnostic dont le but est de localiser et isoler la panne. La durée de cette étape peut être évaluée en conception à partir des informations d'entrées telles que la fiabilité des composants, le profil d'utilisation, les conditions d'exploitation du système, etc., et à l'aide d'un outil d'analyse comme l'arbre de défaillances, le temps de diagnostic peut être estimé en suivant les étapes suivantes : identification des modes de défaillances, identification des causes de chaque mode, identification des composants responsables de chaque cause, définition des moyens et méthodes de diagnostic, estimation du temps de mise en œuvre de chaque méthode de diagnostic. De ce fait, il est possible d'estimer, pour chaque composant, le temps moyen de diagnostic des pannes dont il est la cause. Ce temps peut être considéré comme le temps de diagnostic de la panne du composant
    - *Temps de démontage et remontage :* comme les étapes de démontage et remontage sont similaire, on les regroupe dans la même étape. En effet, pour évaluer le temps de démontage d'un composant, il faut connaître sa séquence de démontage qui indique les composants à démonter au préalable, leur ordre de démontage et toutes les liaisons à défaire. Connaissant les types de liaisons à défaire et à l'aide des temps standards des actions élémentaires de maintenance, on peut estimer la durée requise pour détacher chacune de ces liaisons. La durée totale de démontage du composant est la somme des durées requises pour démonter toutes les liaisons de la séquence de démontage. En fait, on parle plutôt de séquence de transitions. Une transition est une action de démontage qui sépare un assemblage parent en deux sous-assemblages héritiers. Cette action nécessite évidemment la suppression de toutes les liaisons permettant de réaliser les connexions entre les deux sous-assemblages héritiers. L'évaluation peut se faire en plusieurs étapes à savoir : Génération des transitions réalisables, génération des séquences de transitions possibles pour le démontage de chaque composant et l'identification de la séquence optimale, ces étapes sont traités dans la littérature par plusieurs écrits [115], [135], [137]. Dans le but de faciliter le démontage et le remontage en exploitation le concepteur doit tenir compte dans sa solution du respect de la gamme qui fait apparaître l'ordre chronologique des opérations de démontage et remontage ainsi que les outillages nécessaires. A la fin de cette étape, on dispose de la séquence optimale de démontage et d'une estimation du temps de démontage correspondant, pour chaque composant du système. On ajoute que le processus de remontage est généralement l'inverse du processus de démontage en ce qui concerne les étapes à suivre. Ainsi, l'estimation du temps de remontage peut être

effectuée à partir du temps de démontage en le multipliant par un certain coefficient proche ou égal à 1

- *Temps d'inter-change ou de remplacement* : c'est une étape qui consiste à remplacer le composant défaillant ou de le réparer. De ce fait, le temps de remplacement du composant dépend des paramètres du composant tels que son poids, son volume, sa maniabilité, l'outillage utilisé, l'espace de dégagement disponible, etc, et si c'est le cas de réparation, il faut tenir compte aussi du temps de réparation. Ces temps peuvent être estimés à partir, par exemples, de l'expérience, des bases de données ou des avis des experts

- *Temps de check-out ou de contrôle du bon fonctionnement* : après avoir remplacé ou réparé le composant défaillant, il faut s'assurer du bon fonctionnement de ce dernier. La vérification dépend essentiellement de la fonction que doit remplir le composant ou le système. Le contrôle de bon fonctionnement a pour données d'entrées : le mode de défaillance, la fonction affectée, le profil d'utilisation, etc. L'évaluation du temps de cette phase peut se faire en deux étapes : Définition de la procédure et des moyens de contrôle et l'estimation de la durée des étapes de la procédure de contrôle.

- *Evaluation des MTTRi :* après avoir évalué les durées ci-dessus, ces durées constituent les données d'entrée du processus d'évaluation des MTTRi des composants. En effet, pour chaque composant i, le $MTTR_i$ se calcule facilement en faisant la somme des durées des étapes du processus actif de maintenance du composant.

- *Evaluation du taux de défaillance* : à cette étape nous avons deux cas de figure : le concepteur peut évaluer une solution d'un composant déjà existant par la consultation des bases de données spécifiques pour chaque domaine [138]. Si, c'est une solution innovante conçue spécialement pour ce composant, le concepteur doit faire appel à d'autres moyens d'estimation du taux de pannes comme la similarité avec un autre composant, des essais virtuels ou bien les avis d'experts .

- *Evaluation de* $MTTR_{syst}$: après avoir évalué tous les composants l'évaluation du $MTTR_{syst}$ se fait sans difficulté. Une valeur seuil de cet indicateur, $MTTR_s$, est définie dans le cahier de charge. Il faut donc comparer par la suite le $MTTR_{syst}$ évalué et le seuil $MTTR_s$ pour savoir si la solution est acceptable (éligible pour les essais physiques) ou rejetée et par la suite on passe à la phase suivante qui permet l'identification des pistes d'amélioration.

- ***Amélioration de la solution rejetée :***

  - *Allocation des* $MTTR_S$ *pour chaque composant i :* cette étape introductrice à l'étape de définition des composants pénalisants la solution. Elle consiste à exprimer les exigences de maintenabilité du système à un niveau fonctionnel au niveau de chaque

composant. Il existe plusieurs méthodes pour l'allocation à savoir : allocation équitable, méthode ARINC, méthode Boyd et d'autres méthodes peuvent être consulté dans [115].

- *Identification des composants pénalisants la solution :* après avoir déterminer les $MTTR_s$ pour chaque composant, nous passons à l'identification des composants qui pénalisent la solution, il existe plusieurs méthodes dans la littérature qui présente le processus d'identification. Puis si nous pouvons changer la solution on recommence depuis la conception et le cahier de charge, sinon la solution sera abandonnée.

Le processus proposé permet au concepteur de faire une évaluation du MTTR de la solution conçue. Dans la littérature, nous trouvons plusieurs outils indispensables tels que les modèles de calculs et les algorithmes. Par contre, d'autres sont encore à développer.

1.2. Synthèse

Cette démarche intègre la variabilité industrielle, comme la variabilité individuelle, et cherche à anticiper la dégradation et l'évolution de la défaillance du système dans sa globalité et durant son cycle de vie tout en prenant en considération les avis d'experts de domaine qui ont une expérience sur terrain pour les systèmes proches ou similaire à la solution conçue.

Nous retenons donc qu'agir sur les indicateurs de la maintenabilité en phase de conception est une démarche qui permet d'améliorer les conditions d'exploitation d'un équipement par la facilité et la réduction de la durée de détection de panne et de son entretient avec un coût minimal tout en lui assurant une disponibilité maximale. De plus, la tendance actuelle est de faire plus avec de moins de moyens car les budgets alloués à la maintenance sont en régression en coût d'une année à l'autre, ce qui est contradictoire avec les objectifs de sécurité globale. D'où l'importance du concept d'évaluer ces paramètres en phase de conception.

3. CONTRIBUTION A L'INTEGRATION DE LA MAINTENABILITE EN CONCEPTION PRELIMINAIRE EN SE BASANT SUR TRIZ

La conception pose de nombreuses questions et son étude est loin d'être achevée. Acte de l'homme depuis le commencement de l'humanité, elle participe à améliorer son quotidien et à le pousser vers une évolution continue. Pourtant, la conception n'a pas été, pendant très longtemps, un objet de recherche, comme le rappelle Garro [23] ; le besoin d'expliciter, de transmettre les connaissances, n'était pas ressenti par des concepteurs désireux d'être les seuls garants de leur processus créatif. De ce fait, l'étude de la conception est récente et son

approche peut être confuse, considérée comme un acte inné, un processus, des méthodes, une théorie ; tout a été dit sur la conception, mais aucun consensus n'en est ressorti. Et comme le processus de conception est considéré ainsi la colonne vertébrale du processus d'innovation (Figure 39) [139], l'intégration des paramètres de la sûreté de fonctionnement se retrouve également dans la définition des processus de conception.

Dans cette optique, nous allons faire le point sur les différentes notions liées à la conception et de définir notre cadre d'intégration de la maintenabilité en phase de conception préliminaire en se basant sur la théorie TRIZ.

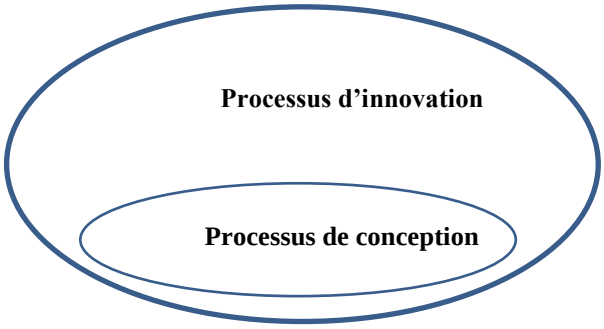


Figure 39: processus de conception en tant que colonne vertébrale de l'innovation

3.1. La démarche proposée

Le processus de conceptualisation de la démarche est souvent présenté selon la figure 40.

Il faut tout d'abord formuler un problème « standard » à partir du problème spécifique puis se servir des outils TRIZ pour définir les solutions « génériques » pour en déduire des solutions spécifiques à chaque problématique.

Il faut aussi ajouter les étapes propre à TRIZ à savoir l'étape d'identification du problème et une étape d'évaluation de la solution proposée

Les étapes de la démarche proposée sont comme suit :

- ***Identification / documentation du problème***

Nous avons comme problématique d'étude, l'intégration de la maintenabilité en phase de conception préliminaire pour les systèmes réparables.

Cette phase importante n'est pas à proprement parlé une étape de TRIZ, mais elle est systématiquement présente car elle est indispensable. Elle pourra prendre des formes

différentes : une présentation du produit, de ses fonctionnalités, du contexte général etc. à l'aide de différents outils tels que l'établissement des tendances, des techniques de planification stratégique, des éléments de QFD, une analyse de l'état de l'art, du benchmarking, … etc.

Dans cette optique, nous avons fait recours aux méthodes d'analyses de la sûreté de fonctionnement et plus précisément à « l'analyse fonctionnelle » et à « l'analyse des modes de défaillances de leurs effets et de leur criticité AMDEC ».

Deux types d'outils TRIZ peuvent également être utilisés en plus de ces outils utilisés à savoir : « les lois d'évolution et la technique des 9 écrans ».

Par ailleurs, c'est aussi le bon moment pour déterminer la stratégie à adopter par la suite : affronter le problème de face avec TRIZ, ou contourner le problème. Dix pour-cent des problèmes seraient ainsi résolus par contournement. ("Les problèmes insolubles sont résolus par contournement [77] .

- ***Formulation du problème***

Dans un premier temps, le problème général sera modélisé, et puis les problèmes spécifiques seront extraits pour la suite. Là aussi, les formes sont différentes, mais les pratiques se recoupent.

Lors d'interventions d'experts TRIZ, nous avons vu une modélisation du problème complet sous forme d'un diagramme de type fonctionnel. Il exprime les interactions entre des entités physiques (les substances). Cet outil construit avec les experts techniques porteurs du problème est certainement un moyen rapide pour l'expert TRIZ de localiser (focaliser) les problèmes élémentaires à traiter, qui deviendront autant de problèmes spécifiques.

En général, avant d'utiliser les outils TRIZ, il faut définir les sous problèmes à partir du problème global. C'est en effet un découpage du problème assez nécessaire pour la suite.

De ce fait, pour aider les concepteurs à prendre en considération les paramètres de la maintenabilité en conception préliminaire, nous aurons comme problème élémentaire résultant du découpage c'est de déterminer les paramètres à intégrer en conception préliminaire.

Dans un deuxième temps, en vue d'appliquer les outils de résolution, il est nécessaire d'exprimer le problème spécifique considéré sous une forme adaptée au problème général.

Cette étape d'interprétation est probablement ce qui fait à la fois l'originalité, et une des difficultés de TRIZ. Il s'agit bien de regarder le problème sous un angle nouveau, non conventionnel, et de le "mouler" dans un cadre déjà défini. Outre la pertinence des outils, l'efficacité de la méthode tient probablement beaucoup au regard nouveau porté sur le problème, et au haut degré d'abstraction ainsi imposé.

- ***Développement de concepts génériques par l'utilisation des outils TRIZ***

Dans cette phase nous avons le concept de déterminer les paramètres qui influencent TTR et le taux de défaillances comme résultant des étapes précédentes.

De ce fait, et à partir des "modèles de problèmes", l'application des outils de TRIZ va conduire à des "modèles de solutions" d'une façon presque mécanique : l'application d'une procédure. Chaque outil peut apporter des idées nouvelles pouvant déboucher sur des concepts innovants concernant le concept générique résultant. Tout en générant des solutions génériques pour résoudre les contradictions résultantes.

- ***Interprétation des solutions génériques***

Les "modèles de solutions" sont génériques, et elles doivent être interprétées pour chaque problème particulier. Deux types d'interprétations de nature différente sont à mentionner :

a) Le premier type est l'interprétation presque "naturelle" d'un concept générique, qui agit souvent comme "inducteur" d'une idée. Il semble qu'un concept, même générique, est plus à même d'orienter vers une solution pertinente. Un mini-brainstorming sur chaque concept générique est alors la règle. L'intérêt de TRIZ par rapport aux autres techniques de créativité à ce stade provient d'une part du caractère "quasi exhaustif" des concepts possibles (ils sont effectivement très nombreux), d'autre part du fait que la démarche est orientée vers les concepts à priori les plus adaptés au type de problème considéré.

Potentiellement, la méthode peut procurer un gain de temps énorme : dans le cas extrême, quelques heures face à des années de réflexion, de doute, d'espoir déçu, d'atermoiements, d'essais infructueux etc.

b) Le deuxième type d'interprétation a été développé par Altshuller et son équipe dans ce but : lorsque le nœud du problème devient la réponse à une question du type "je sais ce qu'il faudrait faire, mais je ne sais pas comment le faire", il est fait appel à des bases de données rassemblant non pas le savoir de l'humanité, mais orientant vers la connaissance des

"effets physiques" susceptibles de fournir une réponse au problème posé. Ce type d'outils est à même d'évoluer encore par l'utilisation de moteurs de recherche utilisant des techniques d'analyse sémantique, dont une première version est disponible [62] .

Une sous-étape supplémentaire peut être ajoutée ensuite : la combinaison des concepts. Elle peut intervenir naturellement par association d'idées, mais elle peut aussi être rendue systématique.

- ***Evaluation des solutions***

TRIZ n'offre pas pour cette phase d'outil formalisé. De ce fait, nous allons opter pour l'approche d'évaluation de la maintenabilité en phase de conception, une approche proposée et développée dans nos antécédents travaux.[135]

En plus de l'approche nous considérons la notion de "Résultat Ultime Idéal" qui peut être reprise à ce stade comme critère d'évaluation, mais nous pensons qu'elle exprime plus l'"élégance" de la solution que sa pertinence pour un cas industriel donné. Il conviendrait plutôt à ce stade de s'interroger sur tout ce que cette nouvelle solution peut induire vis à vis du client, de l'entreprise….

3.2. Modèle pour la résolution de la problématique de l'intégration et l'évaluation de la maintenabilité en phase de conception préliminaire [140]

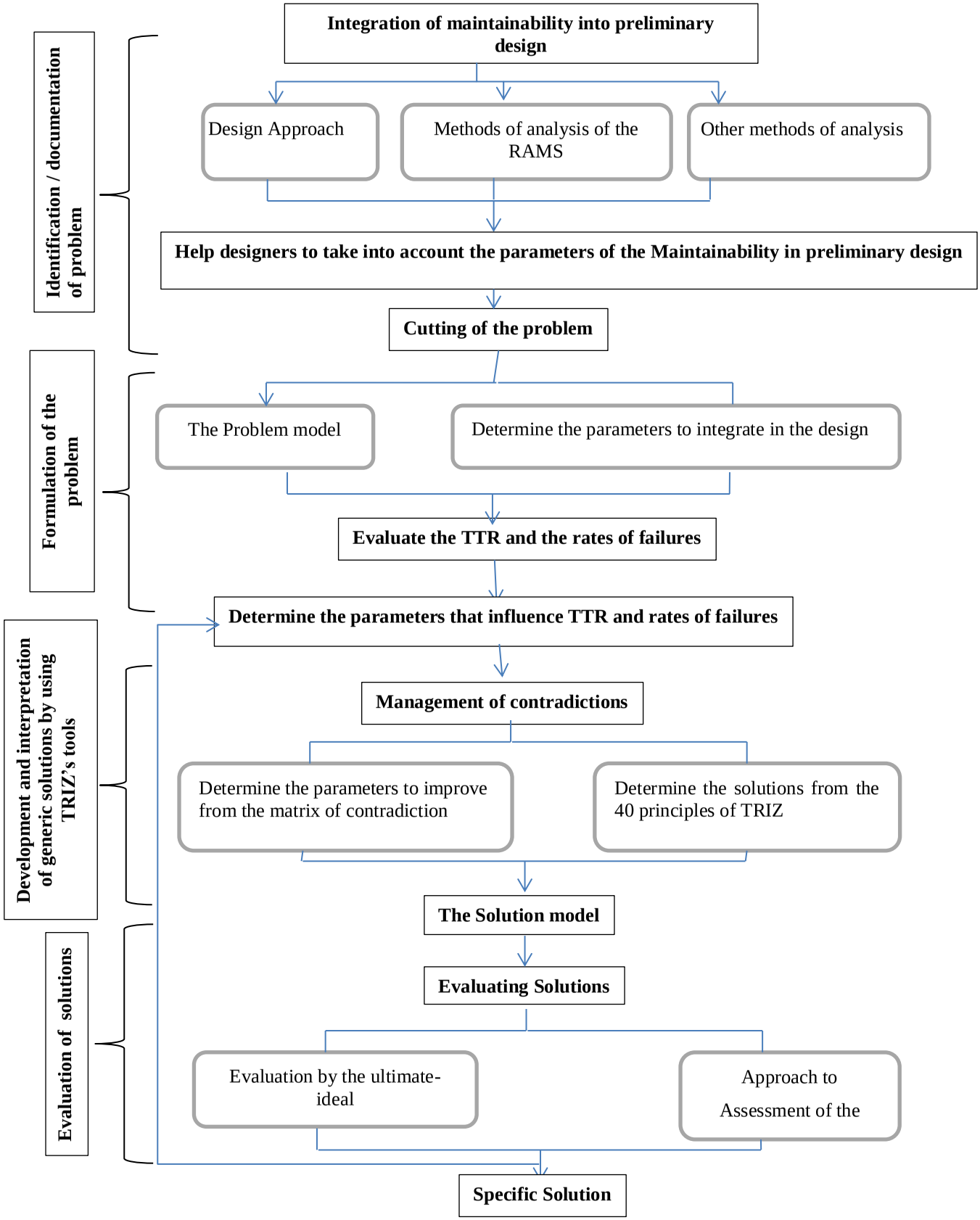


Figure 40: modele pour la resolution de la problematique de l'integration et l'evaluation de la maintenabilite en phase de conception preliminaire .

III. CONCLUSION ET SYNTHESE

On peut conclure que la méthode TRIZ a pour ambition de faire émerger des solutions inventives. Les grands groupes y adhèrent discrètement mais sûrement. Elle tend à vouloir définir la créativité, comme une science exacte. Voilà qui va en heurter plus d'un, bousculer plus d'une idée reçue. Mais c'est justement là une des ambitions de la théorie TRIZ, que de vouloir briser l'inertie psychologique qui retient tant d'inventeurs dans leurs mêmes impasses.

Théorie pour les uns, méthode pour les autres, c'est dans tous les cas une idée de génie qui permet de « doper la créativité ».

Son application demande plus de rigueur et entraînement. Elle se définit comme une « science expérimentale » dont l'objectif est d'aider les inventeurs et plus généralement tous les ingénieurs à résoudre méthodiquement les problèmes technologiques.

Selon ses concepteurs, TRIZ peut s'appliquer :

- A la recherche et au développement de nouvelles générations de produits, en proposant un ensemble de lois d'évolution
- A la résolution de problèmes complexes, avec une méthodologie et des outils s'appuyant sur la résolution des conflits inhérents à tous systèmes techniques
- A l'identification et au traitement des défaillances de tous produits industriels, c'est une application qui pourrait avoir un rapport avec l'analyse des risques

Dans cette optique, nous avons présenté dans cette partie un modèle conceptuel pour l'intégration de la maintenabilité en phase de conception préliminaire dans le cas d'une conception innovante en se basant sur la démarche TRIZ. En effet, le départ de la démarche est la problématique de prendre en considération la maintenabilité en phase préliminaire de conception, et puis à l'aide d'une analyse fonctionnelle et une étude AMDEC nous pourrons déterminer le problème générique afin d'aider les concepteurs à modéliser le problème et à déterminer les paramètres qui serons intégrer en conception préliminaire, dans un but d'évaluer ces paramètres et se servir des outils de TRIZ qui nous ont permis de gérer les contradictions et de générer des solutions innovantes pour chaque situation. Pour en finir par l'évaluation de la solution générée par deux outils proposés : par l'ultime-idéal pour évaluer l'idéalité de la solution, et par l'approche d'évaluation de la maintenabilité qui était présentée dans la partie précédente pour déterminer les composants qui pénalise la solution en combinant les avis d'experts et l'historique des défaillances.

Troisième chapitre

Modélisation et intégration de la maintenabilité en phase de conception préliminaire pour un système éolien

CHAPITRE 3 : MODELISATION ET INTEGRATION DE LA MAINTENABILITE EN PHASE DE CONCEPTION PRELIMINAIRE POUR UN SYSTEME EOLIEN

I. POSITION DU PROBLEME

En 1997, le protocole de Kyoto vise la réduction des émissions de gaz à effet de serre vient de s'ajouter à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. Depuis, et notamment au cours de la dernière décennie, l'industrie de l'énergie renouvelable a reconnu une forte croissance. Particulièrement, l'énergie éolienne est aujourd'hui à la pointe des sources d'énergie renouvelable utilisées dans le monde entier.

Aux Etats-Unis, par exemple, la contribution de l'énergie éolienne dans la production de l'électricité doit atteindre, en 2030, une proportion de 20% de la totalité de consommation d'énergie [141] . En Europe, et d'après le rapport de l'association européenne de l'énergie éolienne (European Wind Energy Association), l'énergie éolienne représentait 6,3% de l'électricité produite en 2012, et 21,4% de la capacité de production installée en 2011. L'objectif de l'association est d'atteindre 230 GW de puissance éolienne installée en Europe à la fin de 2020, dont 40 GW produite par des parcs éoliens offshore (en mer). Grâce aux ressources éoliennes plus élevées, à la disponibilité de l'espace et à leur faible impact visuel et sonore, les parcs éoliens offshores trouvent de plus en plus leur place dans la production d'énergie éolienne en Europe.

Cependant, les parcs éoliens, onshore et offshore, font face à de nombreux défis qui pourraient entraver leur compétitivité dans le marché de la production d'énergie. Les turbines éoliennes sont exposées à des conditions climatiques très variables et difficiles, y compris des vents violents, la chaleur tropicale, la foudre, le froid arctique, la grêle et la neige. A cause de ces variations externes les turbines subissent en permanence une évolution des charges, qui se traduisent par des conditions de fonctionnement très variables entrainant des contraintes mécaniques intenses et des risques de panne élevés [142]. La gestion de la disponibilité des turbines, en fonction de la fiabilité et de la maintenabilité, est une question sérieuse à aborder. La disponibilité des turbines ainsi que le coût d'entretien et de maintenance des parcs éoliens, ont un impact direct sur la rentabilité économique des parcs éoliens et par suite sur la tendance d'investissements dans ce domaine.

Même si la disponibilité est typiquement de l'ordre de 95% pour une centrale éolienne terrestre (onshore), elle peut être aussi faible que 60% pour des parcs éoliens offshore en raison de défaillances en série et des conditions météorologiques difficiles [143]

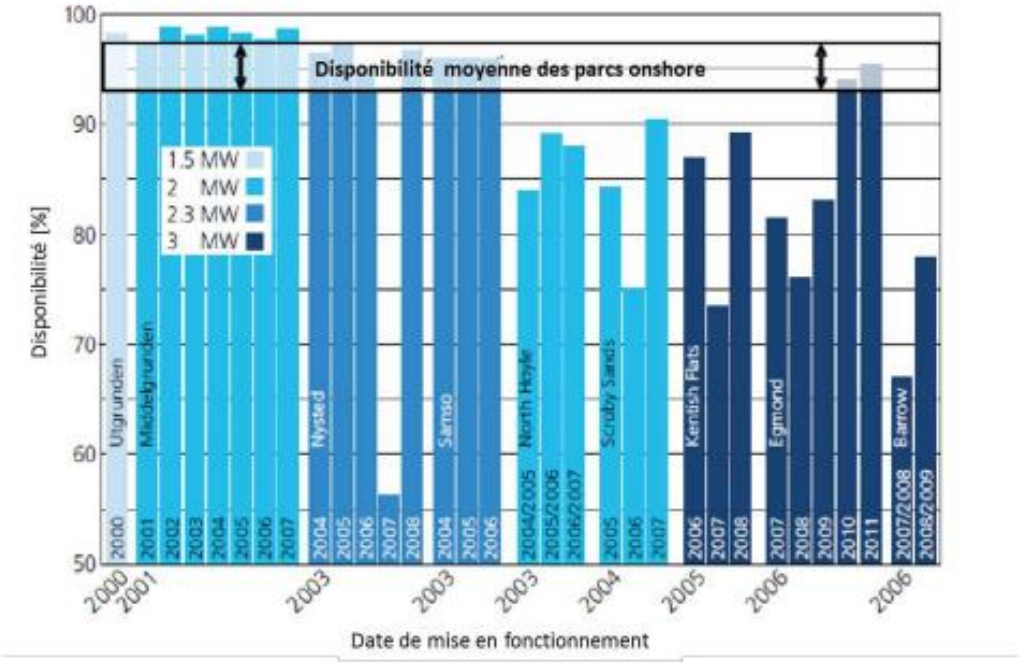


Figure 41: pourcentage de disponibilité par an de certains parcs éoliens offshore

Ceci peut être également remarqué par le diagramme de disponibilité pour les centrales éoliennes offshore présenté dans la Figure 41. En outre, le coût d'exploitation et de maintenance des parcs éoliens présente généralement une somme importante et forme une partie non négligeable du coût moyen de la production. Pour les parcs offshore, ce coût peut atteindre jusqu'à 30% du coût de la production de l'énergie [144]. Un exemple de l'estimation des coûts de maintenance, pour le parc éolien offshore de Horns Rev au Danemark, est donné par [145]. Pour ce parc, et à cause de certaines séries de défaillances précoces, le coût de maintenance s'élève à presque 40% du coût du cycle de vie des turbines (life-cycle cost). La répartition du coût de maintenance du parc est présentée par les auteurs dans le diagramme de la Figure 41.

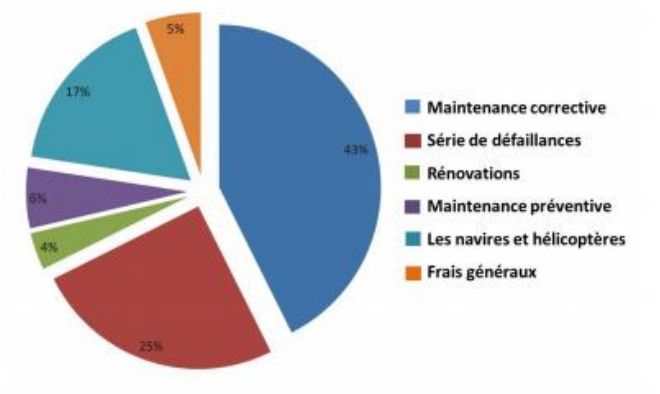


Figure 42: Répartition du cout d'entretien d'un parc éolien entre les différentes taches

Ce coût est effectivement réparti entre les différentes tâches indispensables pour un fonctionnement correct du système. Nous remarquons que parmi ces tâches, les opérations de maintenance corrective, de remplacement des composants et de rénovations majeures sont les principaux facteurs contribuant à l'augmentation du coût de maintenance. En plus du coût de maintenance corrective, la défaillance précoce d'une turbine éolienne, due à une panne dans l'un ou plusieurs de ses sous-systèmes principaux (systèmes d'électroniques et de puissance, boîte de vitesses, système hydraulique et système de contrôle...), entraine généralement une période d'indisponibilité non négligeable et d'éventuelles pénalités financières. Ces pénalités peuvent être sous forme de frais supplémentaires dus à l'obligation d'acheter ou produire par d'autres moyens, l'énergie nécessaire pour compléter la puissance exigée par la charge de la centrale éolienne [146]. La durée d'arrêt de la turbine suite à une défaillance correspond principalement au temps nécessaire pour la détection du défaut, la planification de la maintenance, la commande des pièces pour le remplacement etc. Cette durée peut être encore plus importante pour les centrales offshores, pour lesquelles la logistique présente des contraintes additionnelles. Pour ces parcs, la logistique doit être planifiée en fonction de la distance du rivage et des conditions météorologiques sur le site. Le transport des techniciens et des matériels doit être effectué par des navires spécifiques. Les contraintes liées à la hauteur des vagues peuvent conduire à une mauvaise accessibilité et par la suite à un temps d'arrêt plus élevé. Le cas échéant le transport sera fait pas des hélicoptères.

Les deux alternatives sont coûteuses. L'organisation du soutien logistique et de la maintenance pour les parcs éoliens offshore deviendra encore plus critique pour les nouveaux

projets en cours d'installation, à des distances plus éloignées des côtes, avec une profondeur d'eau plus importante et des conditions environnementales plus sévères [147].

La stratégie de maintenance est donc l'un des facteurs qui a le plus d'impact sur la performance des turbines et des parcs éoliens (disponibilité, temps d'arrêt, productivité, coût de production et du cycle de vie...). Ainsi, l'amélioration de la productivité des parcs éoliens et du retour sur investissement dans ces derniers, nécessitent la mise en place d'une stratégie de maintenance bien appropriée, techniquement réalisable et économiquement viable. A signaler que "le revenu net d'un parc éolien est calculé comme étant le chiffre d'affaires généré par la vente de l'électricité produite par ce parc, moins les dépenses sur toutes les actions d'exploitation et de maintenance" [148].

On note qu'une estimation du coût d'énergie (COE) produite par une turbine éolienne peut être donnée par la formule (4.1) de Oliveira and Fernandes [149], où CII est le coût initial de l'investissement, TAC le taux annuel de remboursement du coût d'investissement (fixe), EN la production annuelle d'énergie en kWh et OM le coût annuel des opérations d'exploitation et de maintenance :

$$\mathbf{COE = CII.TAC + OM/EN} \quad (4.1)$$

Sachant que CII et TAC sont fixes, la valeur de « OM » constitue le seul facteur variable dans le coût de production. La valeur de ce facteur dépend à son tour de la stratégie de maintenance adoptée.

II. EOLIENNES : ETAT DE L'ART ET ANALYSE FONCTIONNELLE

1. DEFINITION ET TYPES D'EOLIENNES

L'énergie éolienne est présentement la source d'énergie renouvelable la plus connue.

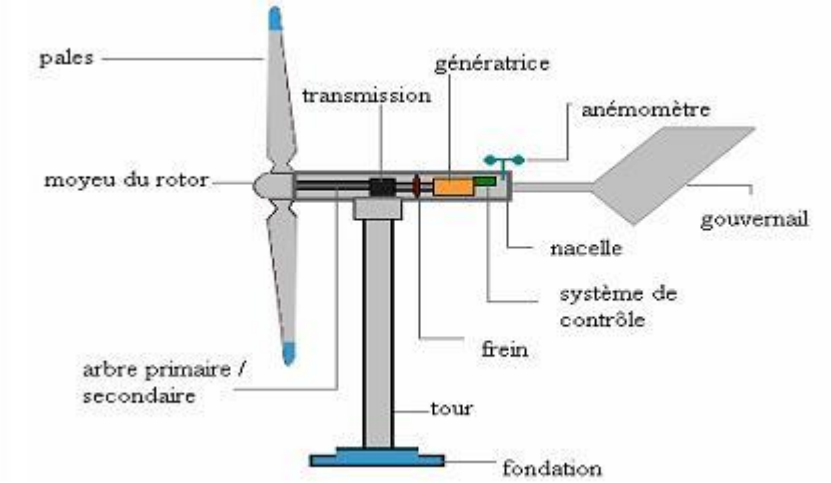


Figure 43: Les composants d'une éolienne

Le concept technologique à axe horizontal, à trois pales constitue l'éolienne moderne d'aujourd'hui. Ce concept ne semble pas devoir changer dans les années à venir et ce, même si des concepteurs mettent à jour des maquettes de conception diverses.

L'évolution de la technologie des éoliennes a été motivée par des paramètres de fiabilité et de performance qui sont directement liés aux composantes éoliennes énumérées ci-dessus.

De manière générale, les aérogénérateurs modernes sont conçus pour atteindre leur puissance nominale à une vitesse de vent de 12 à 15 m/s et sont arrêtés automatiquement vers 25 m/s. Pour limiter la puissance transmise par le vent, des systèmes de régulation et de contrôle sont intégrés à l'éolienne.

Parmi les éoliennes commercialisées actuellement, on retrouve les concepts suivants :

2.2.1. Éoliennes à pas fixe

Pour ce type d'éolienne, les pales sont montées de manière rigide et conçues afin de faire chuter le rendement aérodynamique et de maintenir la vitesse des pales quasi-constante alors que la vitesse du vent est élevée (« passive stall by aerodynamic control »).

2.2.2. Éoliennes à pas variable

Ce type d'éoliennes utilise des pales mobiles autour de leur axe longitudinal. Lorsque la vitesse du vent augmente, les pales pivotent sur elles-mêmes de manière à réduire la portée du vent qui les entraîne. Un système de contrôle avancé permet de déterminer la meilleure position des pales en fonction de la vitesse du vent et commande le système d'orientation des pales pour ajuster l'angle d'attaque (« blade pitch control »).

2. CONTEXTE GENERAL : AMDE ET DECOMPOSITION FONCTIONNELLE

La fiabilité du système éolien est un facteur critique pour le succès d'un projet de production d'énergie. Un manque de fiabilité affecte directement tant les revenus du projet que les coûts de maintenance, tout en réduisant la disponibilité de la turbine.

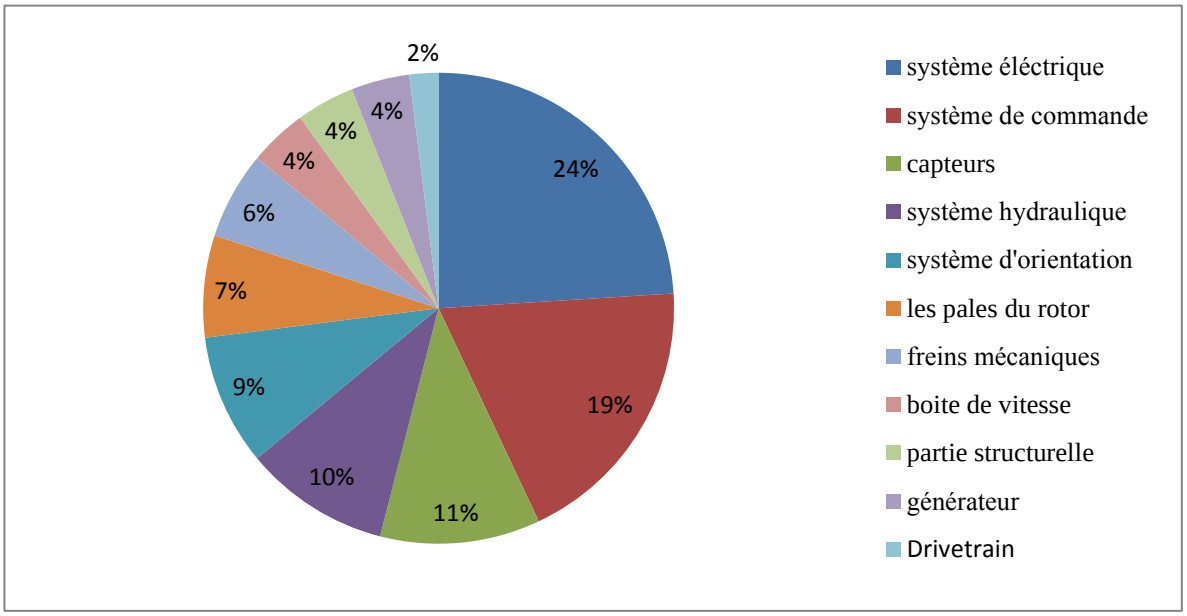


Figure 44: la distribution des défaillances des principaux composants, par rapport au nombre totale de défaillances

Selon Băjenescu TITU, les coûts peuvent être séparés dans de larges catégories: opération, maintenance programmée (maintenance préventive) et maintenance non-programmée (liée aux défaillances). On constate que les coûts associés à la maintenance non-programmée sont les plus difficiles à prédire; ils se situent entre 30% et 60% des coûts totaux et augmentent, en général, au fur et à mesure que le projet arrive à maturation et les taux de défaillance de l'équipement augmentent. Nous présentons ci-dessus la distribution des défaillances des principaux composants.

En partant de ces résultats, il faudrait opter pour une décomposition fonctionnelle du système pour déterminer ses défaillances et leurs modes et causes afin de mettre en place un plan de maintenance adéquat dans une approche fiabiliste d'optimisation

2.1. Décompositions par unités et sous unités

Nous avons effectué une décomposition fonctionnelle de chaque partie de l'éolienne en sous partie comme suit :

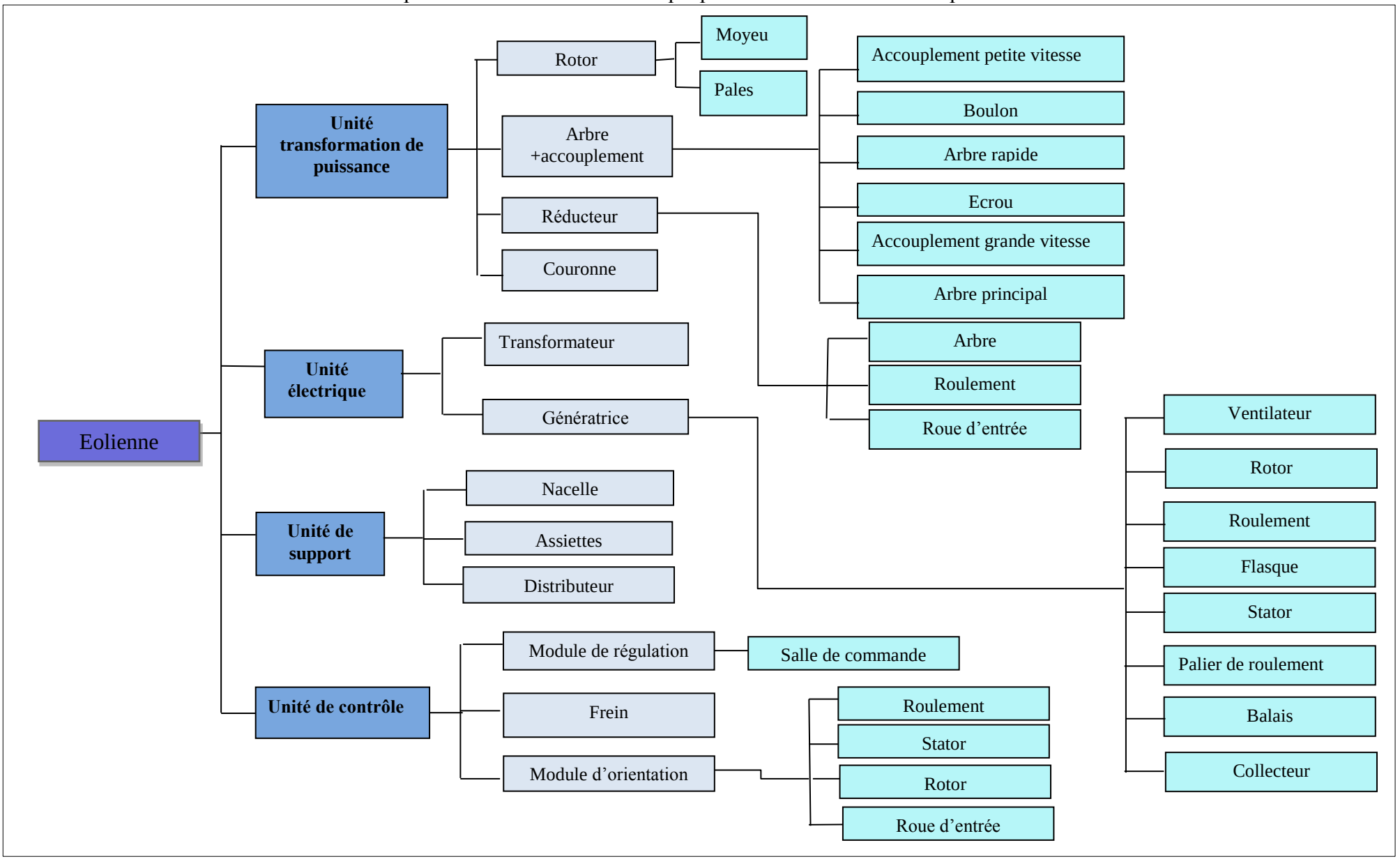


Figure 45: la décomposition par unité et sous unité d'une éolienne

2.2. Etude AMDE des composantes d'une éolienne

D'après la figure 45, le système électrique, le système de commande et les capteurs sont ceux qui posent plus de défaillances dans un parc éolien, de ce fait, on s'intéresse à l'étude de leurs défaillances et on les résume comme suit : [111]

Tableau 12: Analyse AMDE d'un système éolien

Organe /Elément	Fonction	Mode de défaillance	Mode de détection	Cause	Effet	Intervention
Transformateur	Transformation de la tension pour l'utilisation	-Echauffement du transformateur -Court-circuit	-Après action d'operateur	- Surcharge du transformateur -Température trop élevée dans le local des transformateurs	-Echauffement du transformateur -Risque de griller le transformateur - Perte d'énergie diminution du rendement, surtension…	- Changer le transformateur, refroidir le transformateur -Changer ou augmenter le lubrifiant
roulement	-Guidage en rotation de l'arbre	-Détérioration des billes -Usures -Jeux - Abrasion - Corrosion	- Auditif - Après action de l'operateur (contrôle non destructif)	-Surcharge -Manque du lubrifiant -Mauvais montage -Contraintes thermiques -Contrainte physico-chimique	-Détérioration ou torsion de l'arbre principale -Blocage multiplicateur -Echauffement	-Changer les roulements -Assurer une bonne lubrification et une vidange au bon moment - Montage adopté
Rotor	-Tourne à une grande vitesse	-Défaillance de la cage	-Auditif -après action	-Fatigue -Surcharge	-Mauvaise production de l'électricité	-Changement de la cage

	pour produire de l'électricité		d'operateur	-Usure	-Arrêt de la génératrice - Détériorer le stator	
Stator	Créer un champ tournant pour entrainer le rotor	-L'enroulement peut griller -Défaillance de phase -Défaillance d'isolement	-Après action d'operateur	-Surcharge -Fatigue -Surchauffe -Mauvaise rotation du rotor	-Arrêt de compresseur	-Changer l'ensemble -Faire rembobinage
Paliers de roulement	-Guidage en rotation et positionnement du rotor -supporter le rotor lié à la nacelle	-Usure -Cassure -Jeux - Abrasion - Corrosion	-Contrôle non Destructif - Auditif	-Fatigue -Vibration -Manque de lubrification -Intempéries -Surcharge (sollicitation)	-Echauffement -Blocage de rotor -Usure ou détérioration	-Changement des roulements -Lubrification et contrôle du lubrifiant -Vidange au bon moment - Faire un bon montage du roulement
Rotor	Assurer une bonne rotation de la nacelle autour du mat	Défaillance de la cage	-Auditif -Après action de l'operateur	-Fatigue -Surcharge	-Détérioration de la nacelle	-Changement de la cage
Stator	Lié au mat et support le rotor	- Fissures -Usure	-Après action de l'operateur	-Surcharge -Manque du lubrifiant -Mauvais montage (des roulements) -Contraintes thermiques	-Surchauffe -Mauvaise rotation (transmission) -Détérioration de la nacelle	-Changer le système d'orientation -Changer la nacelle
Frein	-Immobiliser le rotor au cours des opérations de la maintenance.	-Usure des disques de friction -Bobine est endommagé	-Visuel (non freinage) -Après action d'operateur	-Usure -Surcharge de la tension	-Vibration et non -Stabilisation du rotor Non capacité d'arrêt de l'éolienne	-Changement des disques de friction ou la bobine

	-Arrête l'éolienne lorsque le vent dépasse 90Km/h		(contrôle du bobinage)		-Détérioration des pales	
Anémomètre	-Mesure la vitesse du vent	-Le frein automatique ne peut pas être enclenché	-Après action d'operateur	-Anémomètre casser ou coince	-Incapacité de mesurer la vitesse de vent	-Vérifier systématiques la variation du vent
Girouette	-Donner des informations sur la direction du vent et ainsi orienté l'éolienne face au vent	-L'éolienne ne peut pas être orientée	-Visuel	-Girouette coincer ou casser	-Non orientation de l'éolienne -Risque de détérioration des pales	-Graissage et nettoyage de la girouette et son support

2.3. Conclusion et synthèse

Lors de la réalisation de l'AMDE, le niveau de détail n'est pas optimal mais nous a permet de déterminer sur quelle étape et sur quel composant agir. En effet, c'est une méthode de prévention des interventions dans le but d'optimiser le plus en amont possible les causes de l'indisponibilité potentielle. Notre analyse nous a permis de déterminer et classifier les défaillances potentielles dans un système éolien selon la décomposition fonctionnelle (Tableau 12). En effet, les résultats de cette analyse sont les actions prioritaires propres à diminuer significativement les risques de défaillances potentielles et de définir les composants critiques à traiter par notre approche basée sur TRIZ pour générer des solutions innovantes. Une difficulté à signaler c'est dans l'optimisation de l'effort entre coût de l'analyse et le coût de l'amélioration à apporter car c'est une analyse qui n'est pas adaptée aux projets en temps réel.

Dans cette logique, nous avons pu extraire du tableau 12 que les parties critiques sont sollicitées plus à l'usure, l'abrasion et à la corrosion à cause d'un problème de lubrification ou de surcharge. De ce fait, et afin de remédier à ces anomalies et augmenter la disponibilité par la diminution du nombre des interventions nous proposons deux solutions testées dans le secteur automobile et extraite à partir de mon expérience sur terrain à savoir : de concevoir des roulements avec un revêtement anti-corrosion qui leur permet une résistance thermique, et de programmer une maintenance préventive pour assurer une lubrification et une vidange permanente.

3. *POSITIONNEMENT DU MAROC PAR RAPPORT AU MARCHE EOLIEN MONDIAL*

3.1. Le vent au Maroc

Le Maroc se caractérise par sa position géographique valorisant ses ressources du vent. En effet, notre pays étant sous l'influence des systèmes de pression différents au cours des saisons. La cartographie du vent au Maroc est présentée comme suit :[150]

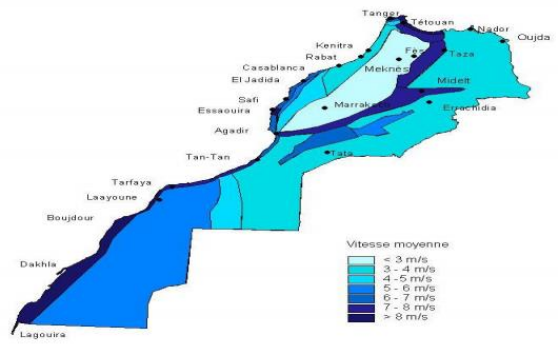


Figure 46: Cartographie du vent au Maroc

Nous constatons de la figure 46 que le Maroc dispose d'une puissance du vent assez importante vu son emplacement au détroit de Gibraltar et la mer méditerranée et de sa côte très importante s'étendant sur 3500Km. De ce fait, le Maroc a l'avantage de jouir d'un potentiel spécialement riche en énergie éolienne par rapport à d'autre pays du voisinage, il occupe la 31ème place à l'échelle mondiale. Le pays dispose d'un fort potentiel éolien avec un gisement important dans ses zones côtières, qui portent sur 3500km avec des vitesses de vent supérieur à 6,5m/s et allant jusqu'à 11m/s.

Il est à noter que le Maroc dispose d'une puissance technique évalué à plus de 10000 MW. Alors que ce potentiel est limité essentiellement par la capacité d'intégration au réseau électrique. Cette limite peut être réduite par de nouveaux investissements visant à consolider le réseau électrique, cependant les contraintes de maintien de la stabilité du réseau, surtout en période de faible charge, sont une réalité inévitable ce qui donne une ressource exploitable de 6000MW [151] . Les régions avec le plus de vent se trouvent au niveau des zones côtières du nord et du sud.

- Tanger et Tétouan avec des vitesses moyennes annuelles de l'ordre de 8 à 11m/s
- Dakhla, Laâyoune, Tarfaya, Taza et Essaouira avec des vitesses moyennes annuelles de l'ordre de 7 à 8,5m/s

3.2. Le potentiel éolien au Maroc

Le Maroc est le 29ème pays le plus attrayant au monde dans les énergies renouvelables et plus particulièrement en énergie éolienne. Il est classé premier dans la région Mena et deuxième en Afrique, selon la nouvelle édition du baromètre des énergies renouvelables «Renewable Energy Country Attractiveness Index» établi par le cabinet Ernst&Young en

2014 [152]. Ces performances montrent que les efforts du Maroc pour le développement des énergies renouvelables ont porté leurs fruits. Le gouvernement marocain lance des programmes pour la promotion de la filiale éolienne. En effet, le pays dispose de plusieurs sites dédié à la production de l'énergie électrique à partir de l'énergie renouvelables (figure 46) et en particulier éolienne, nous avons résumé ses sites dans la figure 47. [150]

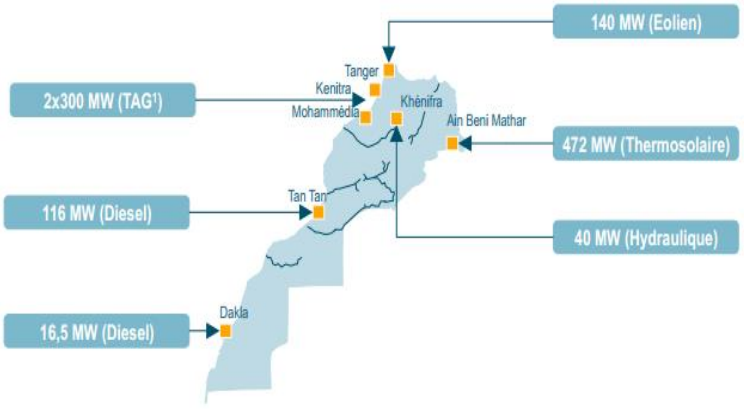


Figure 47: Projets d'énergie renouvelables réalises 2009-2012

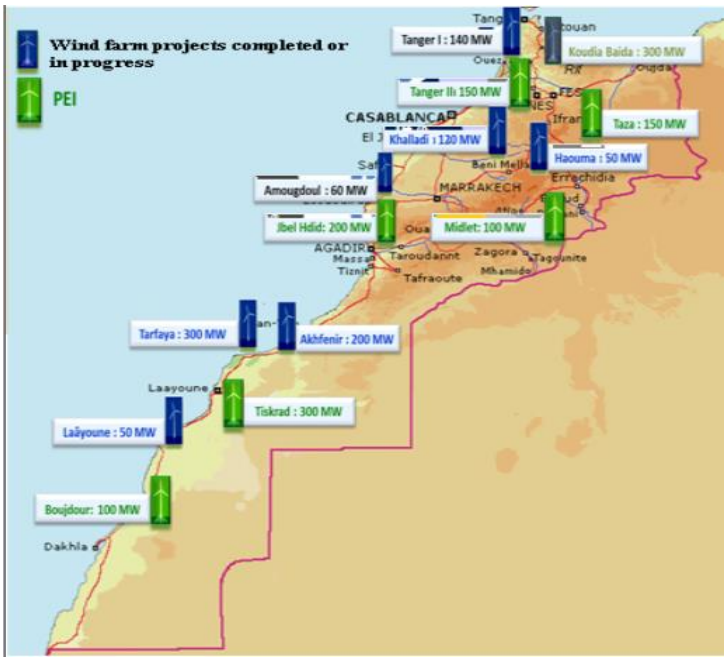


Figure 48: Parc éolien réalise et en cour de développement

Les figures ci-dessus, nous présentent les différents projets réalisé dans le territoire marocain, à noter : un projet Tanger I d'une capacité de 140 MW installé et une prévision d'un autre site Tanger II d'une puissance de 150 MW, suivi d'un site de Tarfaya avec une

capacité de 300 MW et celui de Laâyoun de 50MW. Ces projets montre l'implication sérieuse du gouvernement marocain dans l'adoption du renouvelable à long terme.

3.3. Stratégie et problématique à l'horizon 2020

Le Maroc a déployé ses efforts dans des initiatives politiques qui illustrent à merveille le poids des énergies renouvelables. Pour réduire sa dépendance aux importations d'énergie, il a commencé à exploiter les ressources en énergies renouvelable comme mentionné auparavant. Parmi les efforts déployés, nous trouverons le projet délégué à l'entreprise énergétique locale Nareva Holding. Il s'est mis en service en fin 2014, suivi du parc Tarfaya qui constitue un projet crucial permettant au Maroc d'atteindre les objectifs du programme éolien intégré avec une puissance à générer de 1000 MW d'énergie éolienne fin 2015 et de 2000 MW à l'horizon 2020 (figure 49) : [153]

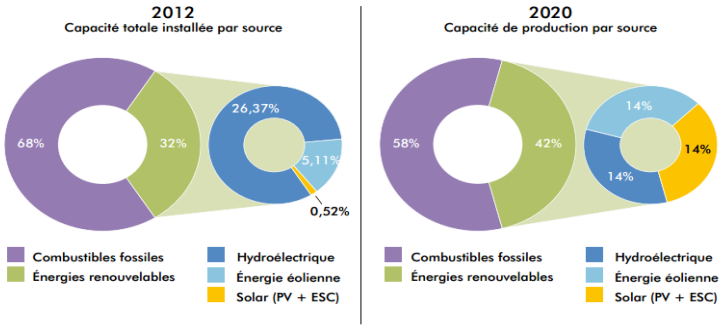


Figure 49: Capacité totale installe en 2012 et installations des énergies renouvelables prévues en 2020 [152]

Il est à noter que la stratégie du pays est d'atteindre un objectif de 42% d'énergie renouvelable avec une part de 14% pour l'éolien. En effet, une augmentation importante a été enregistrée dans le Maroc en particulier au cours des dernières années, et il est prévu que cette augmentation se poursuivra. Nous devons affirmer que l'exploitation d'énergie éolienne à l'heure actuelle n'est pas au niveau souhaité vu les problématiques d'investissement et celles d'exploitation. De ce fait, une planification à long terme est obligatoire pour assurer de l'énergie nécessaire avec des quantités suffisantes en vertu d'un système sûr et stable. Toutefois, les données de base doivent être détectées avec précision pour faire une telle planification à long terme. Nous ajoutons qu'une étude détaillée d'impact et de sûreté de fonctionnement des équipements éoliens demeure primordiale pour assurer de meilleures conditions d'exploitation et de maintien.

4. *CONCLUSION ET SYNTHESE*

Les exigences mondiales en termes d'énergie sont encore recouvertes en grande partie par des énergies fossiles. Alors que ces ressources seront éteintes à l'avenir et la prévention de tel problème environnementale causée par la sur consommation de combustibles fossiles exige au pays d'évaluer leurs ressources d'énergie et d'exploiter celles existantes de manière plus efficace.

Dans cette optique, le travail présenté dans cette partie est une contribution à l'évaluation du potentiel énergétique au Maroc et plus précisément celui éolien. En conclusion du travail, Le système de transmission doit être améliorée et les études doivent être coordonné dans la mesure d'encourager l'utilisation de sources d'énergie éolienne en particulier dans l'énergie électrique. Et afin d'augmenter la production, certains matériels éoliens doivent être amélioré en phase de la conception pour une exploitation efficace et efficiente.

On peut affirmer que les parcs éoliens existants et ceux qui sont actuellement en cours de construction au Maroc sont apprécié par les utilisateurs en raison de leur contribution potentielle à la solution du problème de l'énergie. Toutefois, le potentiel éolien que le Maroc dispose n'est pas pleinement exploiter à cause des problèmes d'exploitation et du rendement par rapport à l'investissement. De ce fait, et comme suite de ce travail, nous allons élaborer une démarche d'évaluation de la sûreté de fonctionnement en phase de la conception pour les éoliens afin d'avoir des systèmes avec une maintenabilité optimale et une disponibilité maximale.

III. MODELISATION ET EVALUATION DE LA MAINTENABILITE D'UN SYSTEME EOLIEN DANS LE CAS D'UNE CONCEPTION ROUTINIERE

1. *MODELISATION D'UN SYSTEME EOLIEN EN PHASE DE CONCEPTION PRELIMINAIRE PAR UNE APPROCHE BAYESIENNE*

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique et, d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristique couple/vitesse de la turbine et de la génératrice énergique est indispensable. Pour parvenir à cet objectif, idéalement, une éolienne doit comporter :

- Un système qui permet de la contrôler mécaniquement à savoir : système d'orientation des pâles, et orientation de la nacelle
- Un système qui permet de la contrôler électriquement à savoir : machine électrique associée à l'électronique de commande (un convertisseur et une génératrice)

1.1. Le cas d'une éolienne indirecte

Dans ce type d'éolienne, la vitesse de rotation de la turbine est relativement faible, et le couple mécanique est élevé en sortie d'arbre de la turbine. Les machines électrique sont dimensionnées en couple, et on cherche à les faire tourner rapidement pour atteindre des puissances massiques satisfaisantes.

C'est pourquoi on intercale un multiplicateur mécanique à engrenages entre la turbine et la génératrice ; cette dernière est souvent une machine asynchrone à cage ou alors une machine à double alimentation pour un fonctionnement à vitesse variable économique. [154]

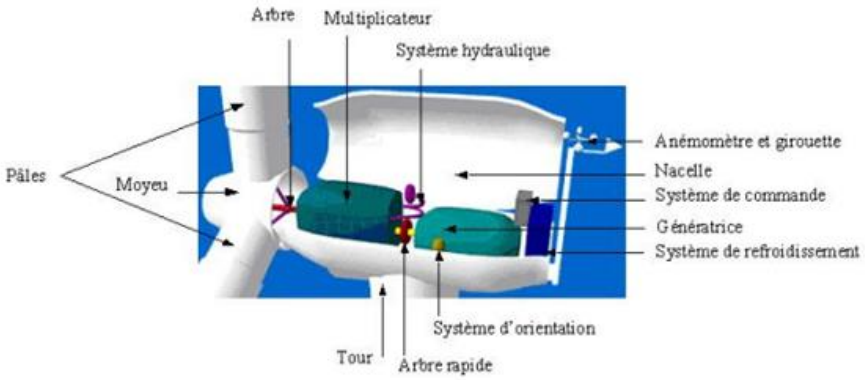


Figure 50: Les éléments constitutifs d'une éolienne indirecte

La présentation d'une éolienne indirecte est comme suit :

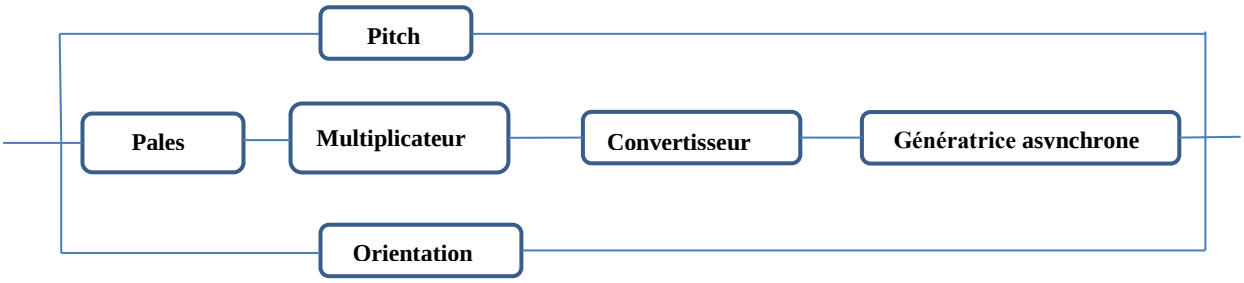


Figure 51: Représentation d'une éolienne indirecte

1.2. Le cas d'une éolienne directe

Le principe de l'attaque directe consiste à accoupler la génératrice directement sur l'hélice. Cette dernière fonctionne à la vitesse basse du rotor, ce qui permet de supprimer le multiplicateur, qui est le siège de perte de puissance et source de bruit. Ce type de génératrice doit tourner à des vitesses comprises entre 18 et 15 tr/min. pour produire de l'électricité avec ce type de machine, il faut que la génératrice possède un grand nombre de pôles permettant d'obtenir une fréquence de l'ordre de 50 Hz. [155]

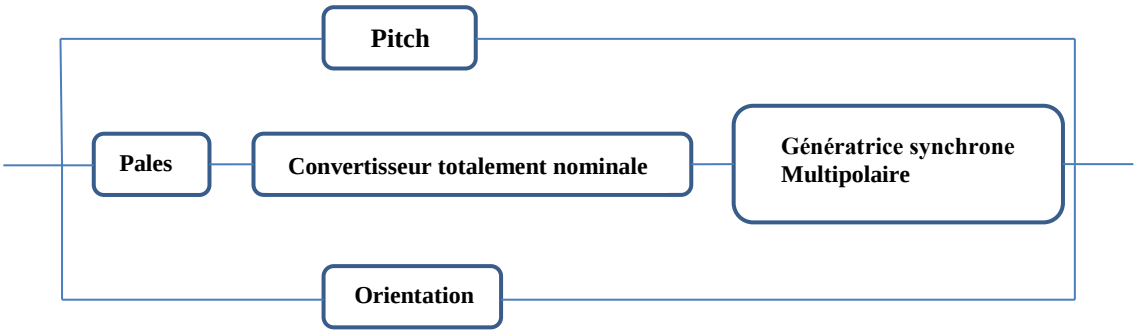


Figure 52: Représentation d'une éolienne directe

1.3. Le réseau bayésien des scénarios de défaillance

Soit les variables d'état suivantes :

- **Eolienne indirecte** : x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6 : les variables d'état respectivement du Pitch, Pales, Multiplicateur, Convertisseur, Génératrice et de l'orientation
- **Eolienne directe** : x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 : les variables d'état respectivement du Pitch, Pales, Convertisseur totalement nominale, Génératrice synchrone multipolaire et de l'orientation
- x_i=0 : le composant est en état de fonctionnement normal
- x_i=1 : le composant est en état dégradé
- x_i=2 : le composant est en état de panne

Les trois états du système sont définit comme suit :

- « 0 » : un état de fonctionnement normal

- « 1 » : un état dégradé
- « 2 » : un état de panne

Pour l'état du fonctionnement du système i.e (y=0 et y=1), il existe quatre scénarios li comme suit :

Pour l'éolienne indirecte:

- L1={x_i=0}
- L2={x_1=2, $x_{2,3,4,5}$=0, x_6=0}
- L3={ x_1=2, $x_{2,3,4,5}$=0, x_6=2}
- L4={ x_1=0, $x_{2,3,4,5}$=0, x_6=2}

Pour l'éolienne directe :

- L1={x_i=0}
- L2={x_1=2, $x_{2,3,4}$=0, x_5=0}
- L3={x_1=2, $x_{2,3,4}$=0, x_5=2}
- L4={x_1=0, $x_{2,3,4}$=0, x_5=2}

Le réseau bayésien par les liens minimums est comme suit, avec $x_{2,3,4,5} \sim x_{unité}$ dans le cas d'une éolienne indirecte, et $x_{2,3,4} \sim x_{unité}$ dans le cas d'éolienne directe :

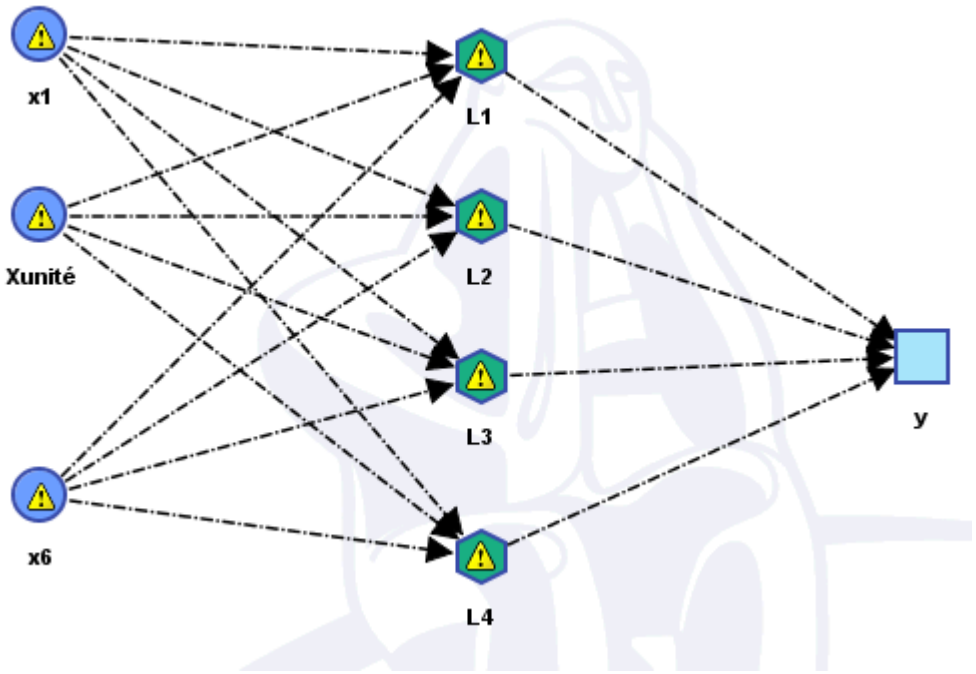


Figure 53: Réseau bayésien de fonctionnement d'une éolienne indirecte/ directe [156]

2. *EVALUATION DE LA MAINTENABILITE ET LA DISPONIBILITE DE L'EOLIENNE*

2.1. Calcul de probabilité d'état pour l'éolienne indirecte/ directe

2.1.1. Données à priori et calcul de probabilité à postériori pour les deux types d'éolienne

Notre étude s'est basée sur des enquêtes européennes sur les taux de pannes et de réparations faites dans un parc éolien contenant des éoliennes directes et des éoliennes indirectes. [157], [158]

Le tableau 13 rassemble les données collectées comme suit :

Tableau 13: Les taux de pannes et de réparations des systèmes considérés

	Vestas 39/500		**Enercon E40**	
	λ_V (défaillance/an)	μ_V (réparation/an)	λ_E (défaillance/an)	μ_E (réparation/an)
Pales	0,162	265,3	0,24	135
Multiplicateur	0,168	269,2	--	--
Génératrice	0,085	170,7	0,354	143,7
Convertisseur	0,254	508,1	0,317	430,7
Pitch	0,095	559,9	0,292	512

Orientation	0,097	436,7	0,116	348,3

Tableau 14: Spécifications techniques des systèmes considérés

	Vestas V39/500	**Enercon E40**
Technologie	Indirecte	Directe
Puissance (Kw)	500	500
Diamètre du rotor (m)	39	40
Vitesse de rotation (tr/mn)	30	12 à 34
Technologie de contrôle	Pitch décrochage actif	Pitch vitesse variable
Les éoliennes considérées	804	900

Le calcul de probabilité d'état du système et de ses composants pour les deux concepts en se basant sur le théorème de Bayes est comme suit :

P (Système en état de marche\ pitch en panne)=

$$\frac{P(\textit{pitch en panne}\backslash \textit{système en marche})\,x\,P(\textit{système en marche})}{P(\textit{Pitch en panne})} = \frac{P(\textit{système en marche et pitch en panne})}{P(\textit{pitch en panne})}$$

Selon les scénarios de fonctionnement présentés ci-dessus, nous avons les deux scénarios L2 et L3 qui seront pris en compte dans le calcul de cette probabilité, ces deux situations représentent l'état dégradé du système :

- L2={x_1=2, $x_{2,3,4,5}$=0, x_6=0}
- L3={x_1=2, $x_{2,3,4,5}$=0, x_6=2}

De ce fait, nous pouvons calculer toutes les probabilités d'état conditionnelles du système et composants en exploitants les données du tableau 13.

Avec :

- **P (A en marche) =** $\mathbf{e^{-\lambda * t}}$
- **P (A en panne) =** $\frac{\lambda}{\lambda+\mu}$
- λ : taux de panne du composant A
- μ : taux de réparation du composant A

2.1.2. Calcul de probabilité d'états des composants

Nous présentons ci-dessous les résultats du calcul de probabilité à t= 1ans et à t=10ans dans le tableau 15 et 16 comme suit :

Tableau 15: Calcul de probabilité de fonctionnement et de panne des composants du système Vestas 39/500

	Vestas 39/500		Indisponibilité	$R_v(t)$ à t=1ans	$R_v(t)$ à t=10ans	$M_v(t)$ à t=1ans	$M_v(t)$ à t=10ans
	λ_v (défaillance/an)	μ_v (réparation/an)					
Pales	0,162	265,3	0,000610	0,850	0,198	0,150	0,802
Multiplicateur	0,168	269,2	0,000624	0,845	0,186	0,155	0,814
Génératrice	0,085	170,7	0,000498	0,918	0,427	0,081	0,573
Convertisseur	0,254	508,1	0,000500	0,775	0,079	0,224	0,921
Pitch	0,095	559,9	0,000170	0,909	0,387	0,091	0,613
Orientation	0,097	436,7	0,000222	0,907	0,379	0,092	0,621

Tableau 16: Calcul de probabilité de fonctionnement et de panne des composants du système Enercon E40

	Enercon E40		Indisponibilité	$R_E(t)$ à t=1 ans	$R_E(t)$ à t=10ans	$M_E(t)$ à t=1 ans	$M_E(t)$ à t=10ans
	λ_E (défaillance/an)	μ_E (réparation/an)					
Pales	0,24	135	0,569562	0,786	0,091	0,213	0,909
Multiplicateur	--	--	--	--	--	--	--
Génératrice	0,354	143,7	0,839875	0,701	0,029	0,298	0,971
Convertisseur	0,317	430,7	0,260135	0,728	0,042	0,272	0,958
Pitch	0,292	512	0,810152	0,746	0,054	0,253	0,946
Orientation	0,116	348,3	0,803947	0,890475	0,313	0,110	0,687

2.2. Calcul des probabilités conditionnelles

Nous présentons dans le tableau 17, la table de probabilité conditionnelle du système sachant les probabilité d'état des composants en prenant en considération la représentation du réseau bayésien de la figure 53 et les différents scénarios.

Tableau 17: Table de probabilité conditionnelle des deux systèmes considérés

Nœuds		Parametres
X_I, L_I	**Parents**	**Y=0**
X_I	AUCUN	$P_1 = (X_I=0)$
L_1	X_I	$P_{L1} = (Y=0 \backslash X_I=0)$
		Y=1
X_{UNITE}	AUCUN	$P_2 = (X_{UNITE}=1)$
L_2	X_1, X_{UNITE}, X_6	$P_{L2} = (Y=1 \backslash X_1=2, X_{UNITE}=0, X_6=0)$
L_3	X_1, X_{UNITE}, X_6	$P_{L3} = (Y=1 \backslash X_1= 2, X_{UNITE}=0, X_6=2)$
L_4	X_1, X_{UNITE}, X_6	$P_{L4} = (Y=1 \backslash X_1= 0, X_{UNITE}=0, X_6=2)$
		Y=2
X_{UNITE}	AUCUN	$P_3 = (X_{UNITE}= 2)$
L_5	X_1, X_{UNITE}, X_6	$P_{L5} = (Y=2 \backslash X_1= 2, X_{UNITE}=2, X_6=0)$
L_6	X_1, X_{UNITE}, X_6	$P_{L6} = (Y=2 \backslash X_1= 2, X_{UNITE}=2, X_6=2)$
L_7	X_1, X_{UNITE}, X_6	$P_{L7} = (Y=2 \backslash X_1= 0, X_{UNITE}=2, X_6=2)$
L_8	X_1, X_{UNITE}, X_6	$P_{L8} = (Y=2 \backslash X_1= 0, X_{UNITE}=2, X_6=0)$

Tableau 18: Table de probabilité des deux systèmes considérés

	P_{sys} marche à t=1ans	**P_{sys} panne à t=1 ans**	**P_{sys} dégradé à t=1ans**	**P_{sys} marche à t=10 ans**	**P_{sys} panne à t=10 ans**	**P_{sys} dégradé à t=10ans**
Vestas 39/500	0,95	0,044	0,006	0,62	0,341	0,039
Enercon E40	0,98	0,019	0,001	0,35	0,53	0,12

3. DETERMINER LES COMPOSANTS PENALISANTS LA DISPONIBILITE

Le but de notre étude est d'appliquer l'approche bayésienne sur un système éolien dans le but de déterminer les états du système et le calcul de probabilité conditionnelle afin d'aider les concepteurs à faire le choix entre les deux concepts.

Comme interprétation des différents résultats, nous allons présenter les constatations comme suit :

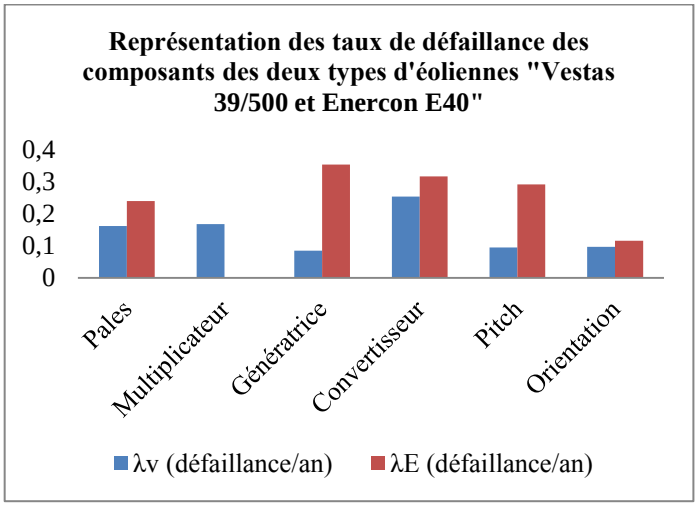


Figure 54: Représentation des taux de défaillance des composants des deux systèmes considérés[156]

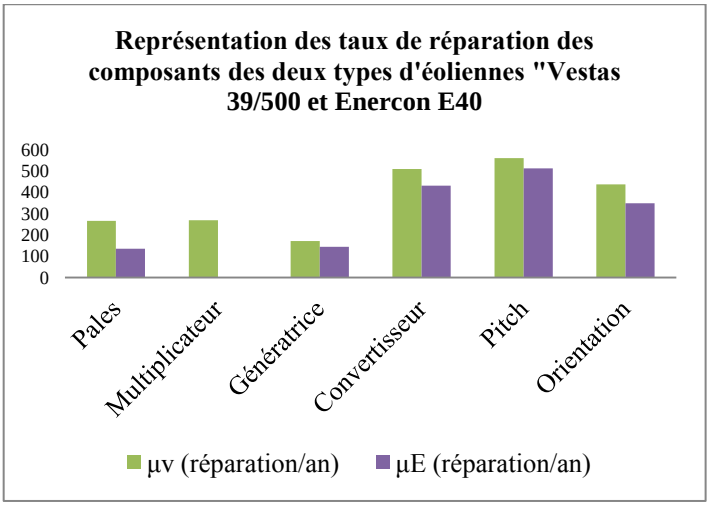


Figure 55: Représentation des taux de réparation des composants de Vestas 39/500 et Enercon e40 [156]

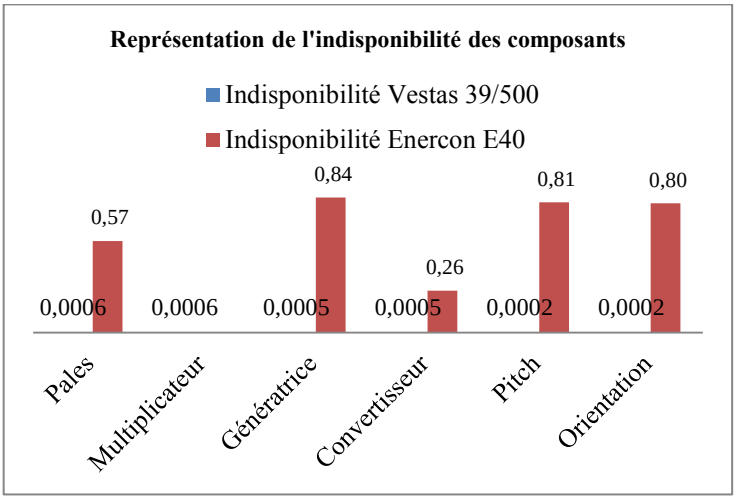


Figure 56: L'indisponibilité des composants de Vestas 39/500 et Enercon e40 [156]

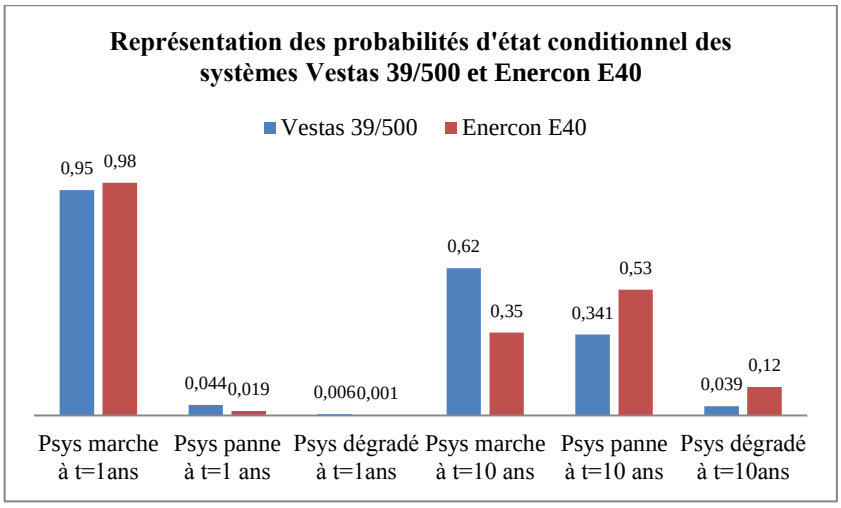


Figure 57: Les probabilités d'état conditionnel des systèmes considérés [156]

D'après les (figures 55, 56 et 57), les composants de l'éolienne Enercon E40 sont les plus assujettis aux défaillances que les composants de l'éolienne Vestas 39/500, ainsi que les composants du système Enercon E40 est moins disponible que le système Vestas 39/500 (Figure 57).

On ajoute ainsi que la disponibilité du système Vestas 39/500 est meilleurs à travers le temps que celle de Enercon E40 (Figure 57) malgré qu'il dispose de plus de composants, et cela est expliqué par l'indisponibilité remarquable de la génératrice (Figure 56).

4. *CONCLUSION ET SYNTHESE*

Nous avons présenté dans ce chapitre dans un premier lieu, un positionnement de notre problématique par rapport à l'environnement mondial et le choix d'un système éolien pour étude de cas de notre approche proposée, et dans une deuxième partie nous avons présenté un état de l'art des éoliennes existantes dans le marché ainsi qu' une modélisation par réseaux bayésiens de deux systèmes éoliens, le premier à entrainement directe et le deuxième est à entrainement indirecte, dans le but d'aider le concepteur à faire le choix entre ces deux concepts et afin de déterminer les anomalies de chaque concept pour les améliorer en phase amont de conception.

Comme conclusion du chapitre, la modélisation nous a permis de déterminer les états du système et les scénarios de fonctionnement afin de calculer les probabilités d'états conditionnel du système en dépendance des composants et du temps. De ce fait, les résultats de l'étude nous a montré que le système éolien à entrainement indirect est plus disponible qu'un système à entrainement directe et c'est le plus convenable pour un choix basé sur la disponibilité.

Comme perspective du travail, c'est de qualifier ce choix tout en prenant en considération d'autres critères de choix et de proposer des améliorations pour l'optimisation de l'autre système à entrainement directe avec des approches d'innovation.

CONCLUSION GENERALE

Cette thèse de doctorat, élaboré au sein du laboratoire des techniques industrielles à la faculté des sciences et technique université sidi Mohamed ben Abdellah, avait pour objectif initial d'améliorer les paramètres de la sûreté de fonctionnement en phase de conception préliminaire et de prendre comme étude de cas un système éolien. Progressivement l'état de l'art nous a mené à s'interroger sur la nature des approches de conception et méthodes de conception et comment faire un choix entre eux pour assurer une intégration et une prise en compte des paramètres de la sûreté de fonctionnement en phase amont de la conception et plus précisément la maintenabilité pour les systèmes réparables dans une optique d'optimisation du processus et d'assurer une disponibilité maximale des systèmes. C'est dans ce cadre-là que nous avons développé des démarches et processus pour aider les concepteurs à prendre en compte en phase préliminaire de conception les indicateurs de maintenabilité pour une disponibilité optimale.

Ce chapitre présente succinctement la démarche choisie dans le cadre de cette recherche. Ainsi, il ouvre sur de nombreuses perspectives de développement et de recherche pour le futur.

Approche et démarche

L'incertitude est un problème couramment rencontrés dans les applications du monde réel. Elle peut être décrite comme une quantité insuffisante de l'information. Néanmoins, l'incertitude peut aussi exister dans des situations qui ont une quantité suffisante d'information. En outre, l'incertitude peut être réduite ou supprimée par l'ajout de nouvelles informations. Ajout de plus d'informations dans des processus complexes peut conduire à l'exploitation minière des connaissances limitées. L'incertitude peut être calculée mathématiquement avec la théorie des probabilités. Par conséquent, les modèles établis sur des inférences probabilistes ont la capacité d'attribuer une valeur probabiliste selon un principe défini.

En conséquence, la prédiction avec un grand nombre d'états dans un modèle est compliquée. La question qui se pose c'est « quelle est la façon dont la prévision est réalisée en présence d'un grand nombre d'états dans un modèle? » Une réponse à cette question est la combinaison entre les méthodes de conception qui offrent plusieurs avantages et les approches de sûreté de fonctionnement pour une intégration optimal de la maintenabilité en conception. En effet, au niveau projet cette combinaison permet un support au concepteur

pour spécifier les processus de conception et d'innovation et plus encore à maitriser la complexité. Ainsi, au niveau du produit / système la combinaison offrent la possibilité de concevoir des systèmes innovants ajustés au besoin des clients tout en prenant en considération les contraintes économiques, environnementales et également législatives du projet dans le but de concevoir et mettre en réalité un système maintenables, exploitables et disponible durant sa durée de vie. Dans une autre perspective, la combinaison entre une méthode de conception donnée avec une approche de sûreté de fonctionnement adéquate permet aux concepteurs d'avoir un dialogue fluide avec les autres parties prenantes du projet, de pouvoir renforcer les résultats et de garantir la réalisation du projet tout en respectant les objectifs.

En somme, le choix de prendre en compte la sûreté de fonctionnement en phase amont de la conception et avoir cette combinaison optimale est indispensable au bon déroulement des projets de conception de nouveaux produits ou d'améliorer un produit existant.

Par ailleurs, faire une combinaison entre sûreté de fonctionnement et conception n'est pas simple à réaliser. En effet, pour un projet donné, certaines méthodes seront adéquates à prendre comme choix pour répondre aux spécificités du projet, mais d'autre non adaptées. Ainsi, aucune méthodes de conception ni de sûreté de fonctionnement ne pourra être prise et utilisés aveuglément pour tous les projets. De ce fait, aucune combinaison n'est systématique. Pour remédier à cette problématique, nous proposons dans ce travail deux apports. Le premier, concerne la proposition d'une démarche de la prise en compte de la maintenabilité en phase préliminaire de conception pour une conception routinière pour l'innovation d'un système existant en se basant sur une approche statistique de prédiction de défaillance qui est les réseaux bayésiens. Le deuxième apport, est la proposition d'une démarche de la prise en compte de la maintenabilité en phase de conception préliminaire pour une conception innovante d'un nouveau produit en se basant sur l'approche TRIZ. Pour clore notre recherche par l'application de l'approche Bayésienne sur une étude de cas d'un système éolien.

Pour la construction de nos approches, nous nous sommes basés sur une méthodologie en quatre étapes à savoir la traduction du besoin, l'interprétation de ce besoin qui mène à la création du modèle et puis en fin le développement et l'évaluation de la solution.

Apports de recherche

Les contributions de cette recherche sont multiples : d'une part, nous avons proposé une approche d'intégration et d'évaluation de la maintenabilité en phase de conception

préliminaire pour une conception routinière en se basant sur les réseaux Bayésiens pour la prédiction de la probabilité de défaillance. Ensuite nous avons appliqué ce modèle pour l'évaluation de la maintenabilité de deux systèmes éolien direct et indirect afin de prédire la maintenabilité et la disponibilité des deux systèmes dans 10ans de travail d'une part. Et d'autre part, pour aider les concepteurs à faire le choix entre les deux systèmes et définir les composants pénalisants de chaque système dans le but de développer une solution pour remédier à ce manque. De ce fait, nous affirmons que pour pouvoir définir une solution optimale, il faudra toujours se référer aux avis des experts du domaine en combinaison avec l'approche statistique adéquate qui est les réseaux Bayésiens dans notre cas de recherche.

Ensuite, pour évaluer la maintenabilité en phase amont de conception dans le cas d'une conception innovante nous avons proposé un modèle d'évaluation basée sur l'approche TRIZ en combinaison avec les méthodes de sûreté de fonctionnement à savoir l'AMDE et l'analyse fonctionnelle tout en intégrant les avis des experts qui ont une expérience sur terrain comme donnée d'entrée

Perspectives de recherche

A l'issue de cette thèse de doctorat de nouvelles perspectives de recherches s'ouvrent et qui ont pu émerger du travail réalisé. En effet, l'étude statistique basée sur les réseaux bayésiens a montré que la génératrice des éoliennes à entrainements direct est le composant pénalisant la disponibilité de ces derniers. En effet, l'étude a présenté les probabilités de disponibilité dans moyen et long terme des deux concepts à entrainement direct et celui à entrainement indirect, qui donne comme résultat que les éoliennes à entrainement indirect sont plus disponibles que ceux à entrainement direct. Ainsi, en analysant les différents composants nous avons pu déterminer que la génératrice est l'élément qui pénalise la disponibilité à long terme.

Dans cette optique, nous pourrons ouvrir une piste de recherche qui consiste à innover et d'appliquer le modèle d'intégration de la maintenabilité en phase de conception préliminaire en se basant sur l'approche TRIZ pour la génératrice d'une éolienne. Le but principal de cette piste sera de modéliser la génératrice, de réaliser une analyse fonctionnelle, de gérer les contradictions et d'évaluer la maintenabilité pour générer une solution innovante qui assure une disponibilité optimale de la génératrice afin d'améliorer la disponibilité des éoliennes à entrainement direct.

Pour aller plus loin, nous proposons comme perspective de notre travail de s'ouvrir sur l'application de la méthodologie dans des secteurs d'activités variés avec des parties prenantes distinctes à étudier.

Ainsi, on ajoute une perspective qui s'impose dans le contexte actuel de compétitivité accrue en termes de qualité et de délai. Cette proposition consiste à créer un référentiel informatisé pour aider les concepteurs à faire le choix entre une approche/méthode à adopter pour développer un produit en prenant en compte les contraintes de la sûreté de fonctionnement en phase de conception et d'avoir un dossier de conception informatisé qui intègre en plus des contraintes fonctionnelles/ dysfonctionnelles, de production et d'après-vente une rubrique qui formalise et tiens en compte toutes exigences sécuritaires.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUE

[1] A. Riel, S. Tichkiewitch, et R. Messnarz, « Qualification and certification for the competitive edge in integrated design », *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, vol. 2, n° 4, p. 279–289, 2010.

[2] Y. Gousty, « Le génie industriel », *Que Sais-Je*, 1998.

[3] C. Hales et S. Gooch, *Managing engineering design*. Springer Science & Business Media, 2011.

[4] V. Hubka et W. E. Eder, « Design Science: Introduction to the Needs », *Scope Organ. Of*, 1996.

[5] A. Aoussat, « La pertinence en innovation: nécessité d'une approche plurielle », *Lab. Concept. Prod. Innov.*, 1990.

[6] A. Aoussat, « Contribution à la modélisation du processus de conception de produits industriels », *Rapp. Synthèse En Vue Obtenir Habilit. À Dir. Rech. Inst. Natl. Polytech. Grenoble*, 1996.

[7] O. Plos, S. Buisine, A. Aoussat, F. Mantelet, et C. Dumas, « A Universalist strategy for the design of Assistive Technology », *Int. J. Ind. Ergon.*, vol. 42, n° 6, p. 533–541, 2012.

[8] C. Bouchard, R. Camous, et A. Aoussat, « Nature and role of intermediate representations (IR) in the design process: Case studies in car design », *Int. J. Veh. Des.*, vol. 38, n° 1, p. 1–25, 2005.

[9] C. Mougenot, « Modélisation de la phase d'exploration du processus de conception de produits, pour une créativité augmentée », PhD Thesis, Arts et Métiers ParisTech, 2008.

[10] W. E. Vesely, F. F. Goldberg, N. H. Roberts, et D. F. Haasl, « Fault tree handbook », DTIC Document, 1981.

[11] B. Walliser, *Systèmes et modèles: introduction critique à l'analyse de systèmes*. Editions du Seuil, 1977.

[12] J.-L. Le Moigne, « La modélisation des systèmes complexes », *Paris Bordas Dunot 1990*, 1990.

[13] G. Clergue, *L'apprentissage de la complexité*. Hermès Paris, 1997.

[14] J. de Rosnay, « Le macroscope », *Vers Une Vis. Glob. Paris Seuil*, 1975.

[15] A.-L. Système, « un atout majeur pour la compétitivité des entreprises », in *Actes de la 2ème Conférence Annuelle d'Ingénierie Système, Association Française d'Ingénierie Système*, 2001.

[16] J.-C. Blaise, P. Lhoste, et J. Ciccotelli, « Formalisation of normative knowledge for safe design », *Saf. Sci.*, vol. 41, n° 2, p. 241–261, 2003.

[17] L. Cauffriez, « Méthodes et modèles pour l'évaluation de la sûreté de fonctionnement de systèmes automatisés complexes: Application à l'exploitation de lignes de production-Application à la conception de systèmes intelligents distribués », Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2005.

[18] D. Estampe, « Modèle d'évaluation des performances Supply Chain: outil de mesure de la crétion de valeur », Châtenay-Malabry, Ecole centrale de Paris, 2009.

[19] D. Noyes et F. Pérès, « Analyse des systèmes-Sûreté de fonctionnement », *Tech. Ing.*, 2007.

[20] M. R. Cutkosky et J. M. Tenenbaum, « A methodology and computational framework for concurrent product and process design », *Mech. Mach. Theory*, vol. 25, n° 3, p. 365–381, 1990.

[21] S. K. Chandrasegaran *et al.*, « The evolution, challenges, and future of knowledge representation in product design systems », *Comput.-Aided Des.*, vol. 45, n° 2, p. 204–228, 2013.

[22] A. Ballu, H. Falgarone, N. Chevassus, et L. Mathieu, « A new design method based on functions and tolerance specifications for product modelling », *CIRP Ann.-Manuf. Technol.*, vol. 55, n° 1, p. 139–142, 2006.

[23] O. Garro, « Thématique de Recherche Conception Innovante et Distribuée », 2000.

[24] C. Quinet, « Herbert Simon et la rationalité », *Rev. Fr. Déconomie*, vol. 9, n° 1, p. 133–181, 1994.

[25] C. CAMBERLEIN, « LA QUALI TE UN OUTI LI NCONTOURNABLE ALI NVESTI GATI ON CLI NI QUE ».

[26] F. Mili, W. Shen, I. Martinez, P. Noel, M. Ram, et E. Zouras, « Knowledge modeling for design decisions », *Artif. Intell. Eng.*, vol. 15, n° 2, p. 153–164, 2001.

[27] J. Perrin, *Concevoir l'innovation industrielle: Méthodologie de conception de l'innovation*. CNRS, 2001.

[28] B. Lawson, M. Bassanino, M. Phiri, et J. Worthington, « Intentions, practices and aspirations: Understanding learning in design », *Des. Stud.*, vol. 24, n° 4, p. 327–339, 2003.

[29] D. Tate et M. Nordlund, « A design process roadmap as a general tool for structuring and supporting design activities », in *Proceedings of the Second World Conference on Integrated Design and Process Technology (IDPT)*, 1996, vol. 3, p. 1–4.

[30] N. P. Suh, « Axiomatic Design: Advances and Applications (The Oxford Series on Advanced Manufacturing) », 2001.

[31] S. Kota et A. C. Ward, « Functions, structures and constraints in conceptual design., Design laboratory, Dept of Mechanical Engineering and Applied Mechanics, University of Michigan », *Ann Arbor*, 1991.

[32] B. Longueville, J. Le Cardinal, et J.-C. Bocquet, « La gestion des connaissances pour les projets de conception de produits innovants », in *Septième Colloque sur la Conception Mécanique Intégrée. PRIMECA*, 2001.
[33] D. Scaravetti, « Formulation préalable d'un problème de conception, pour l'aide à la décision en conception préliminaire », Ecole nationale supérieure d'arts et métiers-ENSAM, 2004.
[34] P. Jagodzinski, F. J. M. Reid, P. Culverhouse, R. Parsons, et I. Phillips, « A study of electronics engineering design teams », *Des. Stud.*, vol. 21, n° 4, p. 375–402, 2000.
[35] S. Nabdi et B. Herrou, « Intégration de la maintenance en conception », in *Xème Conférence Internationale: Conception et Production Intégrées*, 2015.
[36] G. E. Dieter, H. A. Kuhn, et S. L. Semiatin, *Handbook of workability and process design*. ASM international, 2003.
[37] D. Deneux, « Méthodes et modèles pour la conception concourante », *Habilit. À Dir. Rech. Univ. Valenciennes Hainaut Cambrésis*, vol. 24, 2002.
[38] S. Sivaloganathan, P. T. J. Andrews, et T. M. M. Shahin, « Design function deployment: a tutorial introduction », 2001.
[39] G. Pahl, « W Beitz Engineering Design », *Pringer-Erlag Ondon*, vol. 1, n° 9, p. 88, 1988.
[40] G. Pahl et W. Beitz, « In K. Wallace », *Eng. Des. Syst. Approach*, 1988.
[41] J. Malmquist et S. Sjöberg, « Asymmetric synthesis of p-carboranylalanine (p-Car) and 2-methyl-o-carboranylalanine (Me-o-Car). », *Tetrahedron*, vol. 52, n° 27, p. 9207–9218, 1996.
[42] G. Prudhomme et P. ZWOLINSKY, « Analyse fonctionnelle et conception intégrée », *PRIMECA– PLAGNE*, 2001.
[43] R. Afnor, « Caractéristiques fondamentales de l'analyse de la valeur », 1990.
[44] D. Ragab-Zouaoua, « Lois d'évolution de TRIZ pour la conception des futures générations des produits: proposition d'un modèle », Arts et Métiers ParisTech, 2012.
[45] L. D. Miles, *Techniques of value analysis and engineering*. Miles Value Foundation, 2015.
[46] N. F. Normes, « X 50–152—Analyse de la valeur », *Caractér. Fondam. AFNOR Paris*, 1990.
[47] B. Yannou, S. Hajsalem, et F. LIMAYEM, « Comparaison des apports de l'analyse de la valeur et de la méthode SPEC sur un cas industriel », *PRIMECA– PLAGNE*, 2001.
[48] R. Duchamp, *La conception de produits nouveaux*. Hermès, 1988.
[49] N. P. Suh, *Axiomatic design*. Oxford University Press, New York, 2001.
[50] N. P. Suh, *The principles of design*. Oxford University Press on Demand, 1990.
[51] N. P. Suh, *Complexity: theory and applications*. Oxford University Press on Demand, 2005.
[52] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen, et K. H. Grote, « Engineering Design: A Systematic Approach, Springer », *N. Y.*, 2007.
[53] Y. Akao, « Quality function deployment », 2004.
[54] Y. Akao et others, « Quality function deployment (QFD) », *Integrating Cust. Requir. Prod. Des.*, p. 369, 1990.
[55] « Problem-Solving Tools - Quality Function Deployment ». [En ligne]. Disponible sur: http://www.qualitytrainingportal.com/resources/problem-solving-tools/data-collection-organization/problem-solving_tools-QFD.htm. [Consulté le: 14-mars-2017].
[56] S.-W. Hsiao, « Concurrent design method for developing a new product », *Int. J. Ind. Ergon.*, vol. 29, n° 1, p. 41–55, 2002.
[57] C. Temponi, J. Yen, et W. A. Tiao, « House of quality: A fuzzy logic-based requirements analysis », *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 117, n° 2, p. 340–354, 1999.
[58] J. R. Hauser, D. Clausing, et others, « The house of quality », 1988.
[59] D. Hutton, *Quality Function Deployment (QFD): The House of Quality*. 1997.
[60] M. Schlueter, « QFD by TRIZ », *TRIZ J. Jun*, 2001.
[61] N. León-Rovira et E. García-Gardea, « Innovation in Engineering Education at ITESM », in *Second LACCEI International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCET'2004)"Challenges and Opportunities for Engineering Education, Research, and Development*, 2004, p. 2–4.
[62] D. Choulier, *Une approche théorique de la conception des objets techniques*. Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2014.
[63] D. Choulier et G. Draghici, « TRIZ: une approche de résolution des problèmes d'innovation dans la conception de produits », *Modélisation Connaiss. Pour Concept. Fabr. Intégrées Drăghici G Brissaud DEd*, p. 31–59, 2000.
[64] D. Cavallucci, « TRIZ: l'approche altshullerienne de la créativité », *Tech. Ing.*, 1999.
[65] D. Cavallucci, F. Rousselot, et C. Zanni, « Linking contradictions and laws of engineering system evolution within the TRIZ framework », *Creat. Innov. Manag.*, vol. 18, n° 2, p. 71–80, 2009.

[66] G. Altshuller, L. Shulyak, et S. Rodman, *40 Principles: TRIZ keys to innovation*, vol. 1. Technical Innovation Center, Inc., 2002.
[67] M. Kiatake et J. R. D. Petreche, « A case study on the application of the theory of inventive problem solving in architecture », *Archit. Eng. Des. Manag.*, vol. 8, n° 2, p. 90–102, 2012.
[68] C. Lerch et E. Schenk, « Créativité et résolution de problèmes: la conception de nouveaux produits par les PME », 2009.
[69] A. Ngassa, E. Thouvenin, D. Millet, et P. Truchot, « Intégration de nouvelles ressources dans l'entreprise pour innover. Problématique de cette intégration », 2000.
[70] S. Dubois, « Contribution à la formulation des problèmes en conception de systèmes techniques. Etude basée sur la TRIZ », INSA de Strasbourg, 2004.
[71] G. Altshuller et A. Seredinski, *Et soudain apparut l'inventeur: les idées de TRIZ*. Avraam Seredinski, 2006.
[72] W. Yan, « (Meta) Knowledge modeling for inventive design », Université de Strasbourg, 2014.
[73] J. Terninko, A. Zusman, et B. Zlotin, *Systematic innovation: an introduction to TRIZ (theory of inventive problem solving)*. CRC press, 1998.
[74] M. A. Orloff, *ABC-TRIZ: Introduction to Creative Design Thinking with Modern TRIZ Modeling*. Springer, 2016.
[75] M. Kurela, « Résolution des contradictions techniques dans la conception des systèmes de lancement », *7F-1-Concept. Sûre 1*, 2016.
[76] M. Trela, « Optimisation des performances d'innovation: Une approche combinant inventivité technique et recherche du succès commercial. », Ecole nationale supérieure d'arts et métiers-ENSAM, 2013.
[77] D. Choulier et P.-A. Weite, *Découvrir et appliquer les outils de TRIZ*. Université de technologie de Belfort-Montbéliard, 2011.
[78] D. Choulier et G. Drãghici, « TRIZ: une approche de résolution des problèmes d'innovation dans la conception de produits, paru dans: Modélisation de la connaissance pour la conception et la fabrication intégrées », *Ed. Ed. Mirton Timisoara*, 2000.
[79] R. HASAN, P. MARTIN, et A. BERNARD, « L'intégration de l'approche TRIZ dans le processus d'utilisation du modèle générique de la situation de travail de: cas d'une ligne d'imprimerie », in *4th International Industrial Engineering Conference, Aix-Marseille–France*, 2001, p. 12–15.
[80] T. Chambon, D. Choulier, A.-J. Fougères, et P.-A. Weite, « INSTRUMENTATION DE L'UTILISATION D'UN OUTIL METHODOLOGIQUE: APPLICATION AUX «9 ECRANS» DE LA METHODE TRIZ. », in *AIP Primeca 2010*, 2009, p. 1–12.
[81] S. D. Savransky, *Engineering of creativity: Introduction to TRIZ methodology of inventive problem solving*. CRC Press, 2000.
[82] A. Cherifi, M. Dubois, M. Gardoni, R. Jean, et R. Houssin, « L'innovation en écoconception par utilisation de la méthode Eca Triz », 2016.
[83] G. Altshuller et L. Shulyak, *And suddenly the inventor appeared: TRIZ, the theory of inventive problem solving*. Technical Innovation Center, Inc., 1996.
[84] G. S. Al'tshuller, L. Shulyak, et S. Rodman, *The innovation algorithm: TRIZ, systematic innovation and technical creativity*. Technical Innovation Center, Inc., 1999.
[85] B. López-Mesa et G. Thompson, « On the significance of cognitive style and the selection of appropriate design methods », *J. Eng. Des.*, vol. 17, n° 4, p. 371–386, 2006.
[86] V. Boly, *Ingénierie de l'Innovation-Organisation et méthodologies des entreprises innovantes*. Lavoisier, 2004.
[87] N. Lahonde, « Optimisation du processus de conception: proposition d'un modèle de sélection des méthodes pour l'aide à la décision », Arts et Métiers ParisTech, 2010.
[88] M. C. Herrera-Hernandez, C. Luna, L. Prada, C. Berdugo, et A. Al-Ashaab, « Modelling the product development performance of Colombian companies », in *Proceedings of the 19th CIRP Design Conference–Competitive Design*, 2009.
[89] R. Stetter et U. Lindemann, « The transfer of methods into industry », in *Design process improvement*, Springer, 2005, p. 436–459.
[90] T. Braun et U. Lindemann, « Supporting the selection, adaptation and application of methods in product development », in *DS 31: Proceedings of ICED 03, the 14th International Conference on Engineering Design, Stockholm*, 2003.
[91] H. Aldersey-Williams, J. Bound, et R. Coleman, *The methods lab: User research for design*. Design for Ageing Network (DAN), 1999.
[92] A. S. Macdonald et C. S. Lebbon, « The methods lab: A user research methods typology for an inclusive design process », *WDK Publ.*, p. 221–228, 2001.

[93] H.-J. Franke, S. Löffler, et M. Deimel, « Increasing the efficiency of design catalogues by using modern data processing technologies », in *DS 32: Proceedings of DESIGN 2004, the 8th International Design Conference, Dubrovnik, Croatia*, 2004.
[94] H.-J. Franke et M. Deimel, « Selecting and combining methods for complex problem solving within the design process », in *DS 32: Proceedings of DESIGN 2004, the 8th International Design Conference, Dubrovnik, Croatia*, 2004.
[95] C. L. Dym, A. M. Agogino, O. Eris, D. D. Frey, et L. J. Leifer, « Engineering design thinking, teaching, and learning », *J. Eng. Educ.*, vol. 94, n° 1, p. 103–120, 2005.
[96] E. Brangier et J. Barcenilla, « Concevoir un produit facile à utiliser », *Paris Ed. D'organisation*, 2003.
[97] R. Van der Lugt, « How sketching can affect the idea generation process in design group meetings », *Des. Stud.*, vol. 26, n° 2, p. 101–122, 2005.
[98] F. Dardy, C. Teixido, J. L. Brissard, et M. Polizzi, *Guide de la compétitivité Industrielle: De la Conception à la Production*. Paris, 1st edn., ISBN, 2003.
[99] J.-C. Sagot, V. Gouin, et S. Gomes, « Ergonomics in product design: safety factor », *Saf. Sci.*, vol. 41, n° 2‑3, p. 137–154, 2003.
[100] G. B. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen, et K. Grote, *W.," Engineering Design*. Springer, 2007.
[101] J. Tidd, J. Bessant, et K. Pavitt, *Managing innovation integrating technological, market and organizational change*. John Wiley and Sons Ltd, 2005.
[102] K.-H. Chai et Y. Xin, « The application of new product development tools in industry: The case of Singapore », *IEEE Trans. Eng. Manag.*, vol. 53, n° 4, p. 543–554, 2006.
[103] J.-C. Laprie, « Dependability: Basic concepts and terminology », in *Dependability: Basic Concepts and Terminology*, Springer, 1992, p. 3–245.
[104] A. Avizienis, J.-C. Laprie, et B. Randell, *Fundamental concepts of dependability*. University of Newcastle upon Tyne, Computing Science, 2001.
[105] A. Avizienis, J.-C. Laprie, B. Randell, et C. Landwehr, « Basic concepts and taxonomy of dependable and secure computing », *IEEE Trans. Dependable Secure Comput.*, vol. 1, n° 1, p. 11–33, 2004.
[106] A. Villemeur, « Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels », 1988.
[107] J. Zwingmann, G. Konrad, E. Kotter, N. P. Südkamp, et M. Oberst, « Computer-navigated iliosacral screw insertion reduces malposition rate and radiation exposure », *Clin. Orthop. Relat. Res.*, vol. 467, n° 7, p. 1833, 2009.
[108] L. Al Bassit, N. Tricot, L. Sadeghi, et L. Mathieu, « ESTIMATION QUANTITATIVE DES RISQUES LIÉS À L'UTILISATION D'UN SYSTÈME LORS DE SA CONCEPTION », in *MOSIM 2014, 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation*, 2014.
[109] A. Bobbio et R. Terruggia, « Reliability and quality of service in weighted probabilistic networks using algebraic decision diagrams », in *Reliability and Maintainability Symposium, 2009. RAMS 2009. Annual*, 2009, p. 19–24.
[110] R. Guillerm, « Intégration de la sûreté de fonctionnement dans les processus d'ingénierie système », Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2011.
[111] S. Nabdi et B. Herrou, « Analyse de la fiabilité d'un système, application à une éolienne », *Congrès Int. Génie Ind. Manag. Systèmes EST Fès Du*, vol. 21.
[112] K. N. Otto, *Kristin L. Wood product design*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001.
[113] D. H. Stamatis, *Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution*. ASQ Quality Press, 2003.
[114] G. Lasnier, *Sûreté de fonctionnement des équipements et calculs de fiabilité*. Lavoisier, 2011.
[115] X. Zwingmann, « Modèle d'évaluation de la fiabilité et de la maintenabilité au stade de la conception », UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC, 2005.
[116] E. Castillo, J. M. Gutiérrez, et A. S. Hadi, « Sensitivity analysis in discrete Bayesian networks », *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.-Part Syst. Hum.*, vol. 27, n° 4, p. 412–423, 1997.
[117] J. G. Torres-Toledano et L. E. Sucar, « Bayesian networks for reliability analysis of complex systems », in *Ibero-American Conference on Artificial Intelligence*, 1998, p. 195–206.
[118] D. Allen et A. Darwiche, « New advances in inference by recursive conditioning », in *Proceedings of the Nineteenth conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*, 2002, p. 2–10.
[119] P. Weber, G. Medina-Oliva, C. Simon, et B. Iung, « Overview on Bayesian networks applications for dependability, risk analysis and maintenance areas », *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 25, n° 4, p. 671–682, 2012.
[120] A. Bobbio, L. Portinale, M. Minichino, et E. Ciancamerla, « Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into Bayesian networks », *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 71, n° 3, p. 249–260, 2001.

[121] H. Boudali et J. B. Dugan, « A discrete-time Bayesian network reliability modeling and analysis framework », *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 87, n° 3, p. 337–349, 2005.
[122] H. Boudali et J. B. Dugan, « A continuous-time Bayesian network reliability modeling, and analysis framework », *IEEE Trans. Reliab.*, vol. 55, n° 1, p. 86–97, 2006.
[123] P. Weber, « Dynamic bayesian networks model to estimate process availability », in *In 8th International Conference Quality, Reliability, Maintenance, CCF'02. Sinaia, Romania*, 2002, p. 184–189.
[124] P. Weber et L. Jouffe, « Reliability modelling with dynamic bayesian networks », in *In 5th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes (SAFEPROCESS'03), Washington, DC, USA*, 2003, p. 57–62.
[125] P. Weber et L. Jouffe, « Complex system reliability modelling with dynamic object oriented Bayesian networks (DOOBN) », *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 91, n° 2, p. 149–162, 2006.
[126] S. Mahadevan, R. Zhang, et N. Smith, « Bayesian networks for system reliability reassessment », *Struct. Saf.*, vol. 23, n° 3, p. 231–251, 2001.
[127] M. Bensi, A. Der Kiureghian, et D. Straub, « Efficient Bayesian network modeling of systems », *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 112, p. 200–213, 2013.
[128] H. Langseth et L. Portinale, « Applications of Bayesian Networks in Reliability Analysis », in *Bayesian Network Technologies: Applications and Graphical Models*, IGI Global, 2007, p. 84–102.
[129] P. Weber et C. Simon, « Méthode de modélisation par Réseaux Bayésien de la fiabilité d'un système multi-états », in *11ème Congrès International Pluridisciplinaire en Qualité, Sûreté de Fonctionnement et Développement Durable, QUALITA 2015*, 2015.
[130] A. Bobbio, E. Ciancamerla, G. Franceschinis, R. Gaeta, M. Minichino, et L. Portinale, « Sequential application of heterogeneous models for the safetyanalysis of a control system: a case study », *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 81, n° 3, p. 269–280, 2003.
[131] H. Boudali et J. B. Duga, « A new Bayesian network approach to solve dynamic fault trees », in *Reliability and Maintainability Symposium, 2005. Proceedings. Annual*, 2005, p. 451–456.
[132] B. S. Dhillon, *Engineering Systems Reliability, Safety, and Maintenance: An Integrated Approach*. CRC Press, 2017.
[133] M. Sallak, J.-F. Aubry, et C. Simon, « Allocation de disponibilité et de redondance: Une approche par les réseaux de fiabilité ».
[134] C. E. Ebeling, *An introduction to reliability and maintainability engineering*. Tata McGraw-Hill Education, 2004.
[135] S. Nabdi et B. Herrou, « Approach to Assessment of Maintainability in Design. », *Int. J. Perform. Eng.*, vol. 12, n° 6, 2016.
[136] B. S. Dhillon, *Design reliability: fundamentals and applications*. CRC press, 1999.
[137] J.-B. Menye, « Validation de la maintenabilité et de la disponibilité en conception d'un système multi-composants », Université Laval, 2009.
[138] D. J. Smith, *Reliability, maintainability and risk: Practical methods for engineers including RCM and safety-related systems*. Butterworth Heinemann, 2005.
[139] A. A. Ammar, « Adaptation et mise en place d'un processus d'innovation et de conception au sein d'une PME », Arts et Métiers ParisTech, 2010.
[140] N. Souad et H. Brahim, « Contribution to Integrating Maintainability into Preliminary Design Based on TRIZ », *Eng. J.*, vol. 22, n° 5, p. 213–226, 2018.
[141] S. Lindenberg, *20% Wind Energy By 2030: Increasing Wind Energy?` s Contribution to US Electricity Supply*. Diane Publishing, 2009.
[142] J. Ribrant, « Reliability performance and maintenance—a survey of failures in wind power systems », *KTH Sch. Electr. Eng.*, p. 59–72, 2006.
[143] Y. Feng, P. J. Tavner, et H. Long, « Early experiences with UK Round 1 offshore wind farms. », *Proc. Inst. Civ. Eng. Energy*, vol. 163, n° 4, p. 167–181, 2010.
[144] W. Engels, T. Obdam, et F. Savenije, « Current developments in wind-2009 », *ECN Rep. ECNE-09-96*, 2009.
[145] F. Besnard, *On maintenance optimization for offshore wind farms*. Chalmers University of Technology, 2013.
[146] P. Sandborn, G. Haddad, et A. Kashani-Pour, « Development of a Maintenance Option Model to Optimize Offshore Wind Farm Sustainment », in *32nd ASME Wind Energy Symposium*, 2014, p. 0362.
[147] F. Besnard, K. Fischer, et L. B. Tjernberg, « A model for the optimization of the maintenance support organization for offshore wind farms », *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 4, n° 2, p. 443–450, 2013.
[148] V. C. Leahey, D. J. Sharpe, et D. G. Infield, « Condition monitoring techniques for optimisation of wind farm performance », *Int. J. COMADEM*, vol. 2, p. 5–14, 1999.

[149] H. Ghamlouch, « Modélisation de la dégradation, maintenance conditionnelle et pronostic: usage des processus de diffusion », Troyes, 2016.
[150] R. du Maroc, « Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement », *Dép. L'Environnement"Oasis Au Maroc L'adaptation Au Chang. Clim. Oasis Résilientes L'adaptation Au Chanagement Clim. Nd Httpwww Oasisadaptation Com*, 2008.
[151] S. Atouk, « Les énergies renouvelables et les populations rurales pauvres: le cas du Maroc », PhD Thesis, éditeur non identifié, 2013.
[152] S. Nabdi et B. Herrou, « The development of wind potential in Morocco », *Int. J. Adv. Inf. Sci. Technol.*, vol. 4, n° 12, p. 125‑128, déc. 2015.
[153] O. VOICEOFFUTUREGENERATI, « BOOSTING DEVELOPMENT IN MOROCCO ».
[154] B. Multon, G. Robin, O. Gergaud, et H. B. Ahmed, « Le génie électrique dans le vent: recherches dans le domaine de la génération éolienne », in *congrès Jeunes Chercheurs en Génie Electrique 2003*, 2003, p. 10p.
[155] A. Boyette, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », Université Henri Poincaré-Nancy I, 2006.
[156] S. Nabdi, H. Zaghar, et B. Herrou, « Bayesian Modeling of a Wind Turbine System in the Preliminary Design Phase. », *J. Eng. Sci. Technol. Rev.*, vol. 10, n° 4, 2017.
[157] « Windstats ». [En ligne]. Disponible sur: http://www.windstats.nl/. [Consulté le: 16-mars-2017].
[158] « Startseite - Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein ». [En ligne]. Disponible sur: http://www.lksh.de/startseite/. [Consulté le: 16-mars-2017].

PRODUCTION SCIENTIFIQUE

1. Publications

- S. Nabdi et B. Herrou, « **The development of wind potential in Morocco** », *Int. J. Adv. Inf. Sci. Technol.*, vol. 4, n° 12, p. 125‑128, déc2014
- S. Nabdi et B. Herrou, « **Improved maintenance by the FMECA: Case Study** », *Int. J. Adv. Inf. Sci. Technol.*, vol. 5, n° 1, p. 47‑55, janv 2015
- S. Nabdi et B. Herrou, « **Approach to Assessment of Maintainability in Design**. », *Int. J. Perform. Eng.*, vol. 12, n° 6, 2016, Totem Publisher, Inc., 4625 Stargazer Dr., Plano, Texas 75024, U.S.A
- S. Nabdi, H. Zaghar, et B. Herrou, « **Bayesian Modeling of a Wind Turbine System in the Preliminary Design Phase**. », *J. Eng. Sci. Technol. Rev.*, vol. 10, n° 4, 2017
- N. Souad et H. Brahim, « **Contribution to Integrating Maintainability into Preliminary Design Based on TRIZ** », *Eng. J.*, vol. 22, n° 5, p. 213–226, 2018

2. Communications

- N. Souad et H. Brahim, «***The maintainability of a wind turbine and its impact on the life cycle cost*** » à **5th International Congress on Physics of Radiation-Matter Interactions**, du 5 au 7 Mai 2015
- S. Nabdi et B. Herrou, « **Analyse de la fiabilité d'un système, application à une éolienne** », *Congrès Int. Génie Ind. Manag. Systèmes EST Fès Du*, vol. 21. **(CIGIMS'15),** du 21 au 23 Mai 2015
- S. Nabdi et B. Herrou, « ***Amélioration des paramètres de la sûreté de fonctionnement dès la conception: Etat d'avancement*** » au 1er Forum des doctorants du pôle TICSM, 17 Décembre 2015, Fès, Maroc
- S. Nabdi et B. Herrou, « **Intégration de la maintenance en conception** », in *Xème Conférence Internationale: Conception et Production Intégrées*, 2015. **(CPI 2015),** du 2 au 4 Décembre 2015
- S. Nabdi et B. Herrou, «***Réseaux bayésiens : un outil de modélisation pour la sûreté de fonctionnement »*** au Workshop sur les Systèmes de Production Industriels: Pilotage, Automatisation et Maintenance Industrielle, Faculté des Sciences et Techniques de Fès, 12 mai 2016
- S. Nabdi et B. Herrou, «***les travaux de maintenance et leur impact sur la disponibilité***» à la troisième édition du Colloque International sur le Monitoring des Systèmes Industriels (CIMSI 2016), 19-20 Octobre, Fès, Maroc
- S. Nabdi et B. Herrou, « ***Le potentiel éolien au Maroc*** » à la deuxième édition de la Conférence Internationale en Sciences et Technologies Electriques au Maghreb CISTEM'2016 (conférence IEEE), 26-28 Octobre, Marrakech, Maroc
- S. Nabdi et B. Herrou, « ***Intégration de la maintenabilité en phase préliminaire de conception en se basant sur la théorie TRIZ »*** au Congrès International du Génie Industriel et du Management des Systèmes (CIGIMS'2017), ENSAM-Meknès, 17-18 mai 2017 Meknès (Maroc)
- S. Nabdi et B. Herrou, « ***Analyse du soutien logistique en phase de conception système*** **» Congrès CIMOSM2017, 06-07 /12/2017, Fès, Maroc**