

WALID OUAKKI

# PRISE EN COMPTE DE LA FIABILITÉ EN CONCEPTION

Mémoire présenté  
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval  
dans le cadre du programme de maîtrise Génie Mécanique  
pour l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.)

DÉPARTEMENT GÉNIE MÉCANIQUE  
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE GÉNIE  
UNIVERSITÉ LAVAL  
QUÉBEC

2011

# Résumé

Le développement d'un produit procède à partir d'une idée, d'un besoin identifié ou tout simplement d'une opportunité d'affaires. Les caractéristiques fonctionnelles sont généralement consignées dans un cahier des charges. Le concepteur fait ensuite appel à son savoir-faire pour générer des solutions qui répondent aux spécifications de cahier des charges. La validation de certaines caractéristiques passe par le développement d'un prototype physique et par une batterie de tests. Pour certaines caractéristiques, telle que la fiabilité, qui s'exprime par la probabilité que le produit réalise la fonction pour laquelle il a été conçu dans des conditions données et dans un intervalle de temps donné, le processus de validation peut nécessiter un nombre important de prototypes physiques pour affirmer que la caractéristique est satisfaite avec un niveau de confiance donné. Le processus de validation peut se révéler coûteux et matériellement non réalisable pour un programme de mise en marché du produit. Ce mémoire propose une démarche et des outils qui permettent au concepteur de comprendre les mécanismes de défaillance des composants du produit, afin de réduire leur impact sur la tenue de ce dernier et enfin d'évaluer la probabilité de défaillance ou du bon fonctionnement.

# Abstract

The product development process comes from an idea, an identified requirement or a business opportunity. Functional characteristics are usually recorded in a specification. The designer then uses its expertise to build solutions that meet the requirements of the specifications. Validation of some characteristics involves the development of a physical prototype and a series of tests. For some characteristic such as reliability which is expressed by the probability that the product performs the function for which it was designed, under specified conditions and for a given time interval, the validation process may need a large number of physical prototypes to state that the characteristics of the product are satisfied with a given confidence level. For a marketing program the product validation process can be costly and physically not feasible. This thesis provides an approach and tools that allow the designer to understand the failure mechanisms of the product components in order to reduce their impact on the product operating of the latter and finally evaluate the probability of failure or operation.

# Avant-propos

Dans le cadre de ce travail, je tiens tout d'abord à remercier chaleureusement Mr. Daoud Ait-Kadi, Professeur à l'Université Laval, de m'avoir donné l'opportunité de travailler sur ce sujet. Je le remercie non seulement de m'avoir encouragé à me lancer, mais également pour la confiance qu'il m'a témoignée. j'ai beaucoup appris auprès de lui et je lui suis entièrement reconnaissant.

Je tiens à remercier tous ceux que j'ai cotoyés à l'Université Laval, en particulier les collègues du groupe de recherche du Professeur Ait-Kadi.

Enfin, je réserve une mention très spéciale à mes parents et à toute ma famille pour leur aide précieuse, leur patience et pour leur soutien constant. Je leur dédie ce mémoire.



# Table des matières

Résumé	ii
Abstract	iii
Avant-Propos	iv
Table des matières	vi
Liste des tableaux	vii
Table des figures	ix
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2 L'ingénierie de la conception</b>	<b>4</b>
2.1 L'évolution de la pensée moderne de la conception. . . . .	4
2.2 Processus de conception. . . . .	6
2.2.1 Planification et clarification des tâches. . . . .	8
2.2.2 Conception conceptuelle. . . . .	8
2.2.3 Conception architecturale ou conception de réalisation. . . . .	11
2.2.4 Conception détaillée. . . . .	13
2.3 Conclusion. . . . .	14
<b>3 Concepts généraux de la fiabilité</b>	<b>15</b>
3.1 Principales caractéristiques de la fiabilité. . . . .	15
3.1.1 Concepts de base de la fiabilité. . . . .	15
3.1.2 La Moyenne des Temps de Bon Fonctionnement. . . . .	18
3.2 Estimation des indices de fiabilité. . . . .	18
3.3 Élaboration de la fiabilité. . . . .	20
3.4 Les différentes phases du cycle de vie d'un produit. . . . .	21
3.5 Recueil de données de fiabilité. . . . .	23
<b>4 Méthodes et outils pour l'évaluation de la fiabilité.</b>	<b>25</b>
4.1 Modélisation et évaluation de la fiabilité d'un système multicomposant.	26

4.1.1	Schémas blocs. . . . .	26
4.1.2	Diagramme d'états. . . . .	28
4.2	Conception pour la fiabilité. . . . .	29
4.2.1	Les arbres de défaillance (AdD). . . . .	29
4.2.2	Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leurs Criticités (AMDEC). . . . .	32
4.2.3	Déploiement de la fonction qualité. . . . .	36
4.3	Approche probabiliste de la conception. . . . .	38
4.3.1	L'approche probabiliste "Contrainte- Résistance". . . . .	40
4.3.2	Évaluation de la fiabilité d'un produit avec l'approche probabiliste " Contrainte - Résistance ". . . . .	41
4.3.3	Méthodes d'approximation Premier/seconde ordre . . . . .	42
4.3.4	Méthodes de simulation de Monte-Carlo (SMC) . . . . .	47
<b>5</b>	<b>Identification et caractérisation des facteurs qui influencent la fiabilité.</b>	<b>50</b>
5.1	Facteur "matériaux". . . . .	51
5.2	Facteur "main d'œuvre", "erreur humaine". . . . .	52
5.2.1	Classification et causes. . . . .	52
5.2.2	Méthode de l'évaluation. . . . .	53
5.3	Facteur "Méthodes et Machine". . . . .	54
5.4	Facteur "Milieu / Environnement". . . . .	54
5.5	Conclusion. . . . .	55
<b>6</b>	<b>Modèle de prise en compte de la fiabilité en conception .</b>	<b>56</b>
6.1	Phase de planification et de clarification des tâches. . . . .	57
6.2	Phase conceptuelle. . . . .	62
6.3	Phase architecturale. . . . .	66
6.4	Phase détaillée. . . . .	71
<b>7</b>	<b>Conclusion</b>	<b>75</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>77</b>
<b>A</b>	<b>Présentation et initiation du code FERUM.</b>	<b>80</b>
A.1	Analyse de la fiabilité d'une poutre sur des appuis simples. . . . .	80
A.2	Analyse de fiabilité d'un système (structure) basée sur le couplage mécano-fiabiliste. . . . .	84

# Liste des tableaux

3.1	Relations entre $f(t)$ , $F(t)$ , $R(t)$ et $r(t)$ . . . . .	17
3.2	Recueils de données de fiabilité en mécanique. . . . .	24
4.1	Événements et opérateurs fondamentaux . . . . .	30
4.2	Classes de probabilité d'occurrence d'un événement (Salamone, 1995) .	33
4.3	Exemple de classes de gravité d'un événement (Salamone, 1995) . . . .	33
6.1	Paramètres de la loi de défaillance des éléments du réducteur (distribution de Weibull) . . . . .	70

# Table des figures

1.1	<i>Processus de conception sans prévalidation des exigences en conception.</i>	2
2.1	<i>Comparaison entre l'ingénierie séquentielle et l'ingénierie concourante inspiré de Salamone (1995).</i>	5
2.2	<i>Modèle de Pahl et Beitz d'après Pahl et al. (2007)</i>	7
2.3	<i>Alternatives pour liaison de transmission d'un mélangeur de béton, Cross (2002).</i>	9
2.4	<i>Principales étapes de la conception conceptuelle</i>	10
2.5	<i>Principales étapes de la conception architecturale.</i>	12
3.1	<i>La fiabilité décroissante avec le temps.</i>	16
3.2	<i>Élaboration de la fiabilité</i>	20
3.3	<i>Allure du taux de panne <math>r(t)</math> en fonction de l'unité d'usage</i>	22
3.4	<i>La courbe du taux de défaillance pour des composant mécanique</i>	22
4.1	<i>Configuration d'un système : a) en série. b) en parallèle.</i>	26
4.2	<i>Diagramme de transition associée à un système ne peuvent occuper que deux états.</i>	28
4.3	<i>Exemple d'un AdD d'une soupape d'un réservoir</i>	31
4.4	<i>Principales étapes pour effectuer une AMDEC</i>	34
4.5	<i>Type d'AMDEC</i>	35
4.6	<i>Maison de la qualité</i>	37
4.7	<i>Diagramme de Warmer</i>	40
4.8	<i>Fonction de densité de probabilité de <math>G(\cdot)</math></i>	43
4.9	<i>Transformation de deux variables du système de coordonnées original au système de coordonnées réduit. L'approximation par FORM de la fonction de performance (Rojas, 2008).</i>	44
4.10	<i>Algorithme FORM pour l'estimation de l'indice de fiabilité (Rojas, 2008).</i>	46
4.11	<i>Approximation par SORM de la fonction de performance (Rojas, 2008)</i>	47
4.12	<i>Illustration de la simulation d'importance dans l'espace physique (De-heeger, 2008).</i>	49
5.1	<i>Identification partielle des facteurs influençant la fiabilité.</i>	50
5.2	<i>Variables de conception.</i>	51



5.3	<i>Propriétés fondamentales des matériaux.</i>	52
5.4	<i>Classification des erreurs humaines.</i>	53
5.5	<i>Effet de la température sur l'acier.</i>	55
6.1	<i>Structure considérant de la fiabilité en conception.</i>	57
6.2	<i>Phase de planification des tâches.</i>	58
6.3	<i>Maison de qualité d'un essuie-glace de pare-brise.</i>	60
6.4	<i>Prévalidation du concept dans la phase conceptuelle.</i>	63
6.5	<i>Soupape d'un réservoir de gaz.</i>	64
6.6	<i>Conditions de fonctionnement et les fonctions, sous-fonctions de la valve</i>	64
6.7	<i>Construction de l'arbre de défaillance basé sur les défaillances identifiées à partir de la figure 6.6.</i>	65
6.8	<i>Causes de dysfonctionnement "valve ne s'ouvre pas" et quelques remèdes.</i>	65
6.9	<i>Prévalidation dans la phase architecturale.</i>	67
6.10	<i>Mise en page préliminaire d'un réducteur de vitesse.</i>	68
6.11	<i>Modélisation du réducteur en schéma bloc.</i>	69
6.12	<i>Présentation graphique de la fiabilité du système et de ses composants, Tebbi (2005)</i>	70
6.13	<i>Prévalidation dans la phase détaillée.</i>	73
A.1	<i>poutre sur des appuis simples.</i>	80
A.2	<i>"Système treillis "</i>	84

# Chapitre 1

## Introduction

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

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

Pourtant, pour valider qu'un produit est fiable dans le processus de conception, le concepteur<sup>1</sup> doit disposer des données une fois le modèle physique réalisé, ensuite l'information est remontée en amont dans le processus pour effectuer les modifications nécessaires (figure 1.1).

---

1. Dans les parties subséquentes de ce travail, le terme "concepteur" référera à l'équipe de conception et de développement.



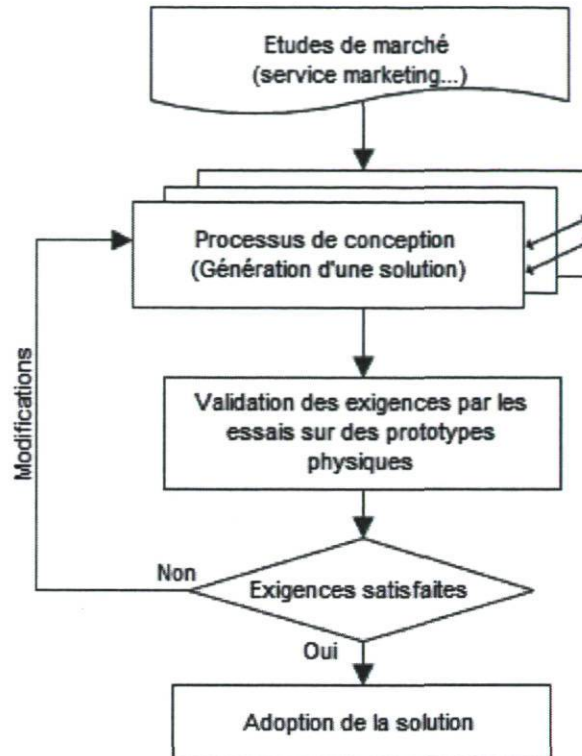


FIGURE 1.1 – *Processus de conception sans prévalidation des exigences en conception.*

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

Plusieurs outils existent ou sont en cours de développement pour améliorer ou pour évaluer la fiabilité d'un produit. Leur intégrations dans un processus de conception sont toutefois mal établis. Le concepteur ne dispose pas, à l'heure actuelle, d'une vision globale de la disposition de ces méthodes. Pour répondre à cet objectif, nous proposons une méthodologie de validation de la fiabilité au cours du processus de conception. Cette méthodologie comprend les différentes phases du processus, une liste des tâches à mettre en œuvre dans chaque phase, ainsi que les outils qui permettent de les réaliser.

Le contenu de ce mémoire est divisé en sept chapitres.

Après cette introduction (**Chapitre 1**), le **Chapitre 2** traitera de l'ingénierie de conception, qui sera composé de deux volets : le premier portera sur l'évolution de la pensée moderne de l'ingénierie de la conception au cours de ces dernières décennies. Le deuxième volet, sera consacré à l'analyse du processus de conception en vue d'identifier les différentes phases dont il se compose.

Le **Chapitre 3** présentera un rappel des principaux concepts de la fiabilité. L'accent sera mis sur l'estimation des indices de fiabilité, les différentes phases du cycle de vie d'un produit du point de vue de la fiabilité, et un recueil des données de la fiabilité des composants mécaniques.

Le **Chapitre 4** traitera des méthodes et des outils qui permettent l'évaluation de la fiabilité et, plus précisément, ceux qu'on peut utiliser dans le processus de conception.

Dans le **Chapitre 5**, l'identification et la caractérisation des facteurs qui influencent la fiabilité seront présentées.

Le modèle d'évaluation de la fiabilité dès les premières phases de conception, sera exposée dans le **Chapitre 6**.

Nous terminerons ce mémoire par une conclusion en envisageant plusieurs perspectives de recherche.

# Chapitre 2

## L'ingénierie de la conception

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

### 2.1 L'évolution de la pensée moderne de la conception.

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

L'ingénierie de conception moderne a émergé avec la révolution industrielle du 19ème siècle, marquée par l'apparition des entreprises manufacturières et l'approbation des premiers modes organisationnels du travail. Au 20ème siècle, les stratégies organisationnelles globales des entreprises ont rapidement changé afin de répondre à la forte pression de la croissance du marché, pour augmenter les performances des produits, proposer le prix le plus bas et réduire le temps de mise sur le marché des produits. Ce qui a provoqué un changement au niveau du fonctionnement des différentes structures de l'entreprise. Taylor propose, comme un des grands principes de l'organisation scientifique de travail, la séparation des tâches, de la conception du produit à celle de sa réalisation (Mikchevitch, 2004)(Gakwaya, 2010). Ce qui rend toute action spécifique associée au développement et à la production, décomposée en un ensemble d'activités



dont l'exécution ne tient compte que des activités subséquentes (figure 2.1).

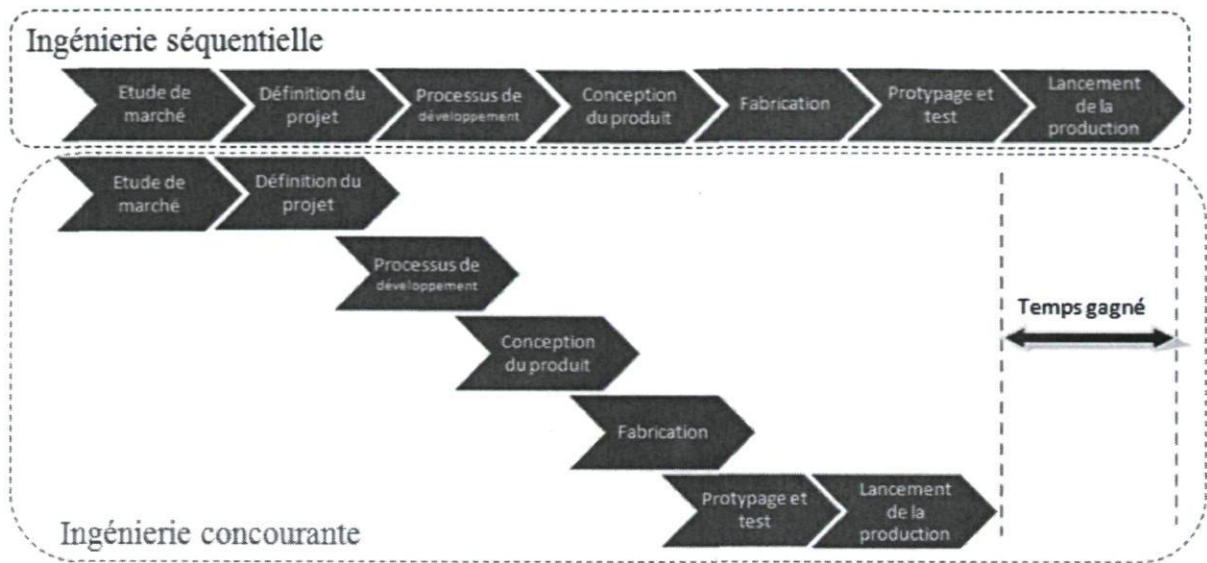


FIGURE 2.1 – Comparaison entre l'ingénierie séquentielle et l'ingénierie concurrente inspiré de Salamone (1995).

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

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

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

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

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

## 2.2 Processus de conception.

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

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

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

Dans ce qui suit, nous décrivons le modèle qui connaît le plus de succès dans l'école européenne de conception, mais aussi le plus accepté sur le plan international (Scaravetti, 2004). Ce modèle est basé sur l'approche systématique décrite par Pahl et Beitz.



Si on se réfère aux travaux de Pahl et Beitz, le processus de conception est décomposé en quatre grandes phases, Pahl *et al.* (2007). Chaque phase est décomposée en plusieurs étapes de travail et des tâches spécifiques (figure 2.2).

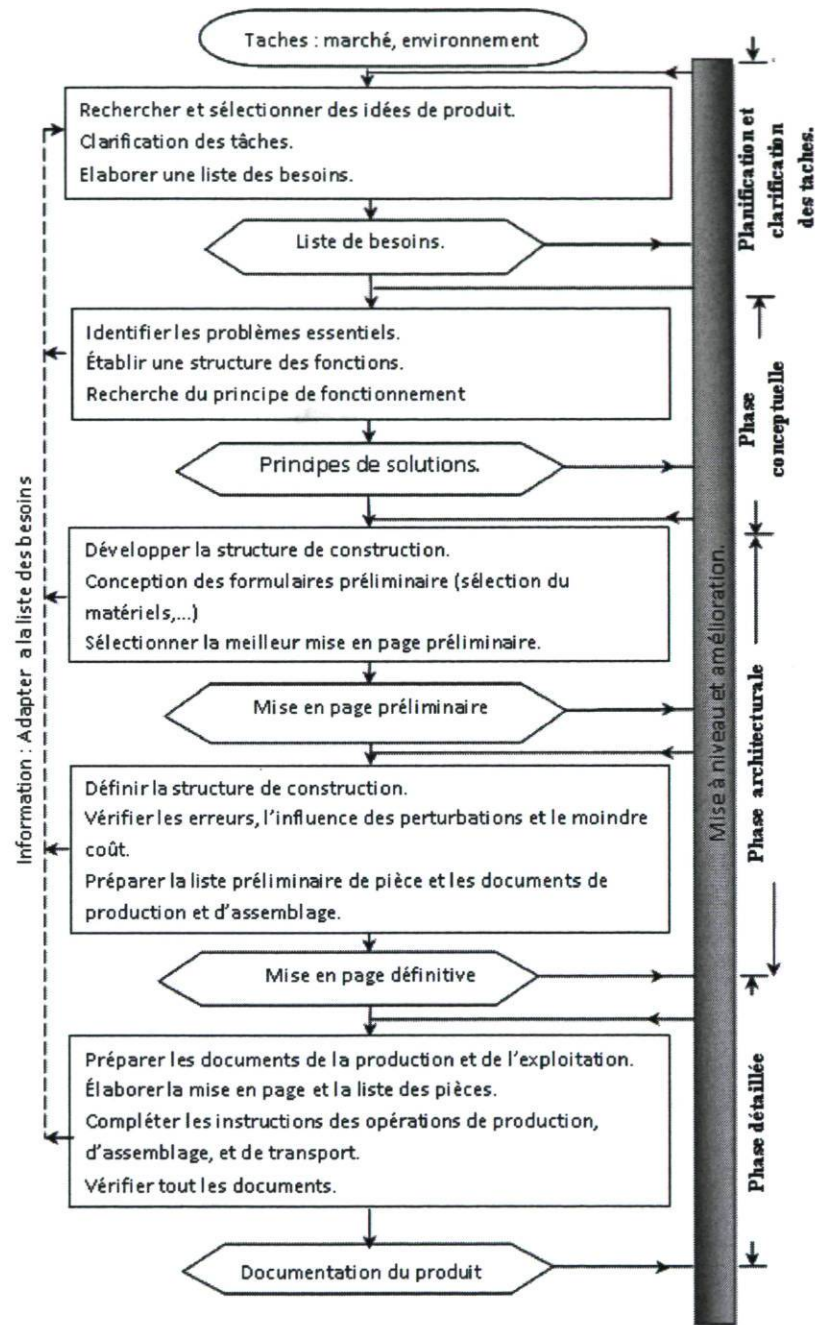


FIGURE 2.2 – Modèle de Pahl et Beitz d'après Pahl et al. (2007)

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



### 2.2.1 Planification et clarification des tâches.

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

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

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

Cette activité se traduit par la spécification de l'information sous la forme d'une liste, qui correspond au cahier de charges contre lequel la réussite du projet de conception peut être jugée. Une méthode utile servant à soutenir la préparation de la liste des exigences est la Quality Function Deployment (QFD). Elle traduit les exigences du client en caractéristiques techniques (voir chap.4).

### 2.2.2 Conception conceptuelle.

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

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

Pendant, il est possible qu'il y ait plusieurs variantes d'une solution de principe comme cela est illustré dans la figure 2.3.

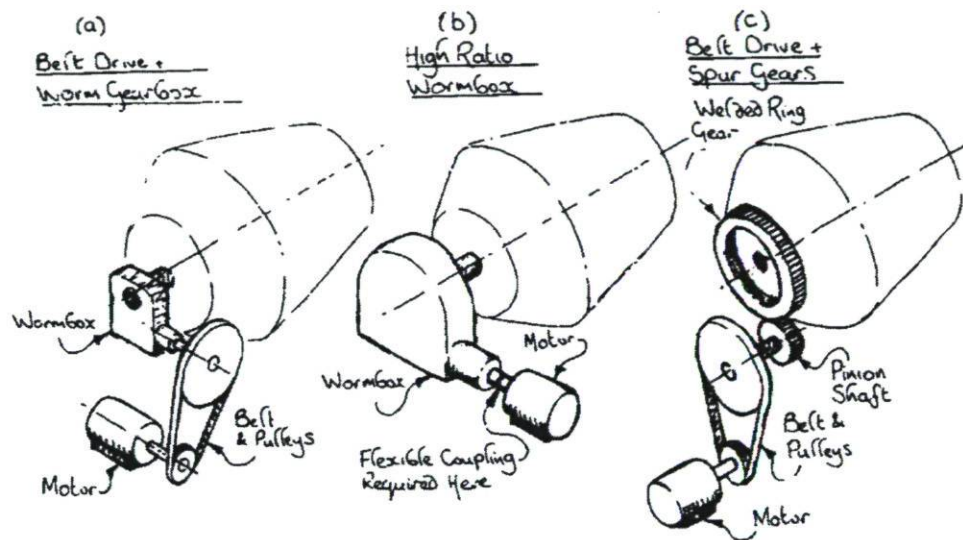


FIGURE 2.3 – Alternatives pour liaison de transmission d'un mélangeur de béton, Cross (2002).

La phase de conception comporte plusieurs étapes (figure 2.4), dont aucune ne doit être ignorée. Dans la réalisation ultérieure des phases de conception, il est extrêmement difficile, voire impossible, de corriger les lacunes fondamentales de la solution de principe. Une solution durable et efficace est plus susceptible d'être un support aux choix des principes les plus appropriés que d'une concentration exagérée sur les détails techniques.



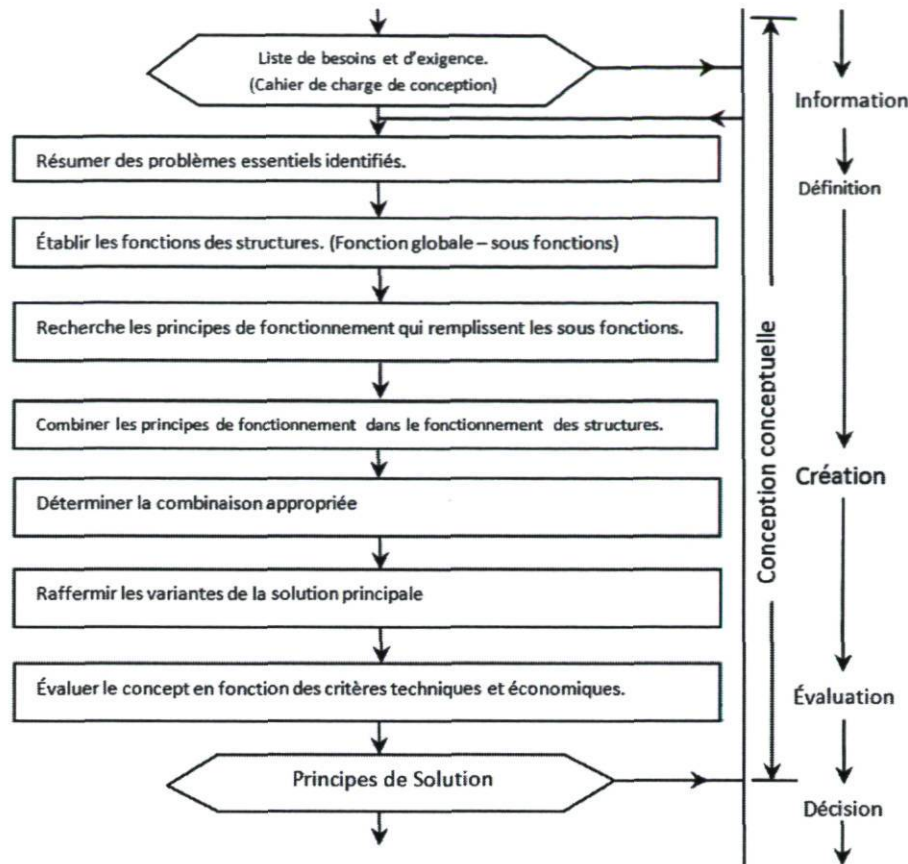


FIGURE 2.4 – Principales étapes de la conception conceptuelle

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

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

Une bonne formulation générique dégage clairement la fonction principale et les contraintes essentielles sans pour autant nuire au choix d'une solution particulière. L'utilisation de l'abstraction, accompagnée de l'établissement de la liste des requis, permet l'identification des caractéristiques principales du futur produit à concevoir. Pahl *et al.* (2007) proposent l'algorithme suivant pour la conduite de cette analyse :

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

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

### 2.2.3 Conception architecturale ou conception de réalisation.

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

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

Le processus de conception est complexe pour les raisons suivantes :

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

### 2.2.3.1 Étape de la conception architecturale.

Pour ces raisons, il n'est pas toujours possible de dresser un plan strict de la phase de la conception architecturale. Toutefois, il est possible de suggérer une approche globale avec les principales étapes de fonctionnement (figure 2.5).

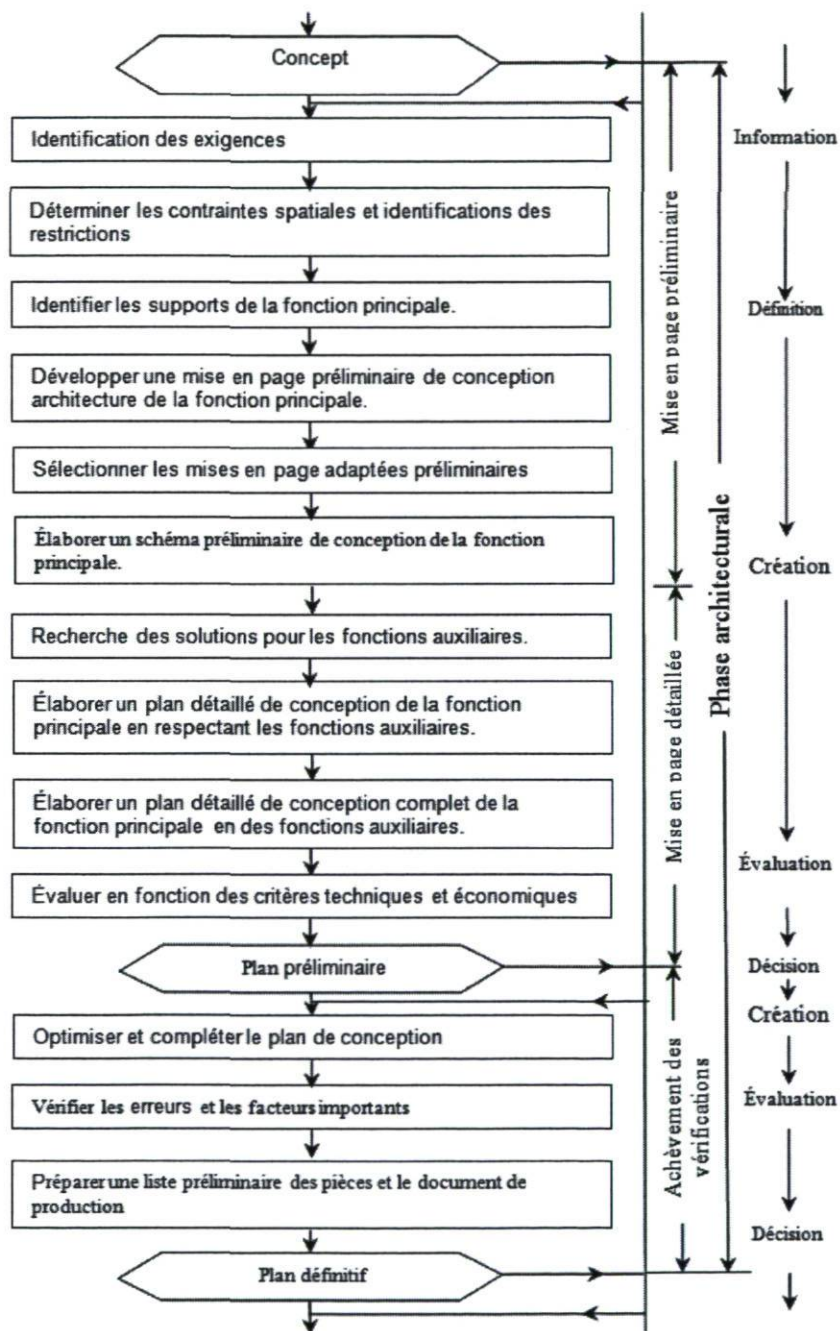


FIGURE 2.5 – Principales étapes de la conception architecturale.



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

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

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

#### 2.2.4 Conception détaillée.

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

- Formes de tous les composants ;
- Dessins d'assemblage et liste des pièces appropriées ;
- La sélection définitive des matériaux ;
- Tolérances des dimensions définitives et de la qualité de surface ;
- Procédures de mise en forme ;
- La méthode de production ;
- etc.

Cette dernière phase comprend différentes vérifications ainsi que l'optimisation des contraintes correspondantes à la conception : contraintes admissibles dans les pièces, critères technologiques prescrits par les réglementations, contraintes ergonomiques définies par les normes, etc. Ici, le concepteur peut également revenir en arrière dans le processus de conception pour effectuer des modifications.

Ces activités sont de plus en plus prises en utilisant un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO). Cela permet l'utilisation directe des données du produit pour la planification de la production.



## **2.3 Conclusion.**

Dans ce chapitre, on a présenté dans un premier lieu l'évolution de la pensée moderne de la conception, puis une analyse des différentes étapes du processus de conception d'après l'approche systématique. Dans chaque phase du processus, une évaluation des solutions générées est systématiquement effectuée. Cette évaluation permet de s'assurer que les exigences du cahier de charges sont respectées au fur et à mesure qu'on avance dans le processus de conception. On présentera dans le chapitre qui suit, les principaux concepts de la fiabilité, et cela dans le but de pouvoir par la suite intégrer la fiabilité dans l'évaluation des solutions générées dans chaque phase du processus de conception.

# Chapitre 3

## Concepts généraux de la fiabilité

Actuellement, l'analyse de la fiabilité des produits (systèmes) est une phase indispensable au cours de la planification, la conception et l'exploitation d'un produit. Contrairement aux années 60, où elle concernait particulièrement des systèmes de haute technologie (l'aérospatial, la défense, énergie nucléaire...), la fiabilité est devenue un facteur d'aide à la décision dans différents domaines "grand public" tels que l'informatique, l'électronique, la mécanique...

Dans ce chapitre, nous rappellerons les concepts de base de l'ingénierie de la fiabilité, l'estimation des indices de fiabilité et l'élaboration de la fiabilité, ensuite nous traiterons les différentes phases du cycle de vie d'un produit du point de vue de la fiabilité, enfin nous terminerons par un recueil de la disponibilité des données de la fiabilité.

### 3.1 Principales caractéristiques de la fiabilité.

#### 3.1.1 Concepts de base de la fiabilité.

La fiabilité  $R(t)$  est la caractéristique d'un système exprimée par la probabilité qu'il accomplisse la fonction pour laquelle il a été conçu, dans des conditions données et pendant une durée donnée (Corazza, 1975).

$$0 \leq R(t) \leq 1 \quad (3.1)$$

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

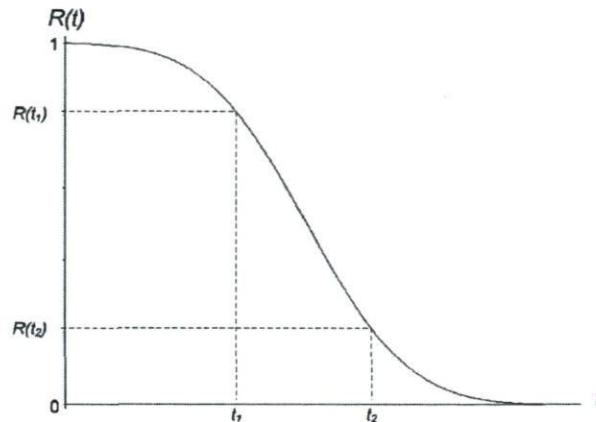


FIGURE 3.1 – La fiabilité décroissante avec le temps.

Un système est reporté défaillant ou en panne, s'il ne réalise plus la fonction pour laquelle il a été conçu.

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

On désigne par  $T$  la durée de vie d'un système.  $T$  est une variable aléatoire à laquelle on associe la fonction de densité  $f(t)$ , où  $f(t)dt$  la probabilité que la durée de vie du système soit comprise entre  $t$  et  $t + dt$ , ou la probabilité que le système tombe en panne entre  $t$  et  $t + dt$ .

La fiabilité dans l'intervalle  $[0, t[$ , est la probabilité que le système soit en vie à l'instant  $t$ , ou encore la probabilité que la durée de vie  $T$  du système soit supérieure à  $t$ . (à noter que  $\int_0^{\infty} f(t).dt = 1$ )

$$R(t) = \text{Probabilité}\{\text{durée de vie } T > t\} = \int_t^{\infty} f(x).dx \quad (3.2)$$

Soit  $F(t)$  la distribution de probabilité associée à la durée de vie.  $F(t)$  est la probabilité que le système tombe en panne dans  $[0, t[$ . la probabilité que la durée de vie du

système soit  $\leq t$  est donnée par :

$$F(t) = \text{Probabilité}\{durée\ de\ vie\ T \leq t\} = \int_0^t f(x).dx \quad (3.3)$$

Pour les systèmes pouvant occuper que l'un des deux états (Opération ou Hors usage).

$$F(t) + R(t) = 1 \quad (3.4)$$

Le taux de panne,  $r(t)$  est la quatrième fonction qui permet de caractériser la loi de dégradation d'un système. Il s'agit de la probabilité conditionnelle de défaillance par unité de temps d'un système ayant survécu jusqu'à l'instant  $t$ .

$$r(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P[T \leq t + \Delta t | T > t]}{\Delta t} \quad (3.5)$$

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

$$r(t) = \frac{dF(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R(t)} \quad (3.6)$$

la loi de dégradation d'un système est complètement définie par la connaissance d'une des quatre caractéristiques  $f(t)$ ,  $F(t)$ ,  $R(t)$  ou  $r(t)$ . Le tableau 3.1, présente les relations entre ces caractéristiques, Ait-Kadi (2002).

	$f(t)$	$F(t)$	$R(t)$	$r(t)$
$f(t) =$	-	$\frac{dF(t)}{dt}$	$-\frac{dR(t)}{dt}$	$r(t) \cdot e^{-\int_0^t r(x)dx}$
$F(t) =$	$\int_0^t f(x)dx$	-	$1 - R(t)$	$1 - e^{-\int_0^t r(x)dx}$
$R(t) =$	$\int_t^\infty f(x)dx$	$1 - F(t)$	-	$e^{-\int_0^t r(x)dx}$
$r(t) =$	$\frac{f(t)}{\int_t^\infty f(x)dx}$	$\frac{dF(t)}{1 - F(t)}$	$-\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt}$	-

TABLE 3.1 – Relations entre  $f(t)$ ,  $F(t)$ ,  $R(t)$  et  $r(t)$



### 3.1.2 La Moyenne des Temps de Bon Fonctionnement.

Le *Mean Time Between Failure*, MTBF ( qui est approximé par La Moyenne de Temps de Bon Fonctionnement si les temps de réparation sont négligeables) correspond à l'espérance mathématique de la variable aléatoire  $T$ . Son expression est donnée par la relation suivante.

$$MTBF = \int_0^{\infty} t f(t).dt = \int_0^{\infty} R(t).dt \quad (3.7)$$

## 3.2 Estimation des indices de fiabilité.

Afin de calculer la fiabilité d'un produit, il faut disposer des informations sur sa durée de vie. Généralement, ces informations sont issues des historiques d'exploitation ou des essais sur des prototypes.

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

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

$N_f(t)$  : Nombre d'éléments ayant échoué.

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

À l'issue de ces essais, on est en mesure de déterminer les fonctions empiriques suivantes, ainsi que les autres caractéristiques de la fiabilité :

La fiabilité (La probabilité de survie) :

$$R(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_s(t)}{N} \quad (3.8)$$

La probabilité de défaillance :

$$F(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_f(t)}{N} \quad (3.9)$$

La fonction de densité :

$$f(t) = \frac{N_f(t + \Delta t) - N_f(t)}{N \cdot \Delta} \quad (3.10)$$

Le taux de panne :

$$r(t) = \frac{N_f(t + \Delta t) - N_f(t)}{N_s(t) \cdot \Delta} \quad (3.11)$$

La connaissance d'une des quatre caractéristiques  $f(t)$ ,  $F(t)$ ,  $R(t)$  ou  $r(t)$ , permet de d'obtenir toutes les autres.



### 3.3 Élaboration de la fiabilité.

Les études et travaux de fiabilité se situent aux trois stades du cycle de vie d'un produit à savoir :

- La conception.
- La fabrication.
- L'exploitation.

la fiabilité d'un système dépend de sa conception, du processus de fabrication et d'assemblage et enfin de l'exploitation (figure 3.2).

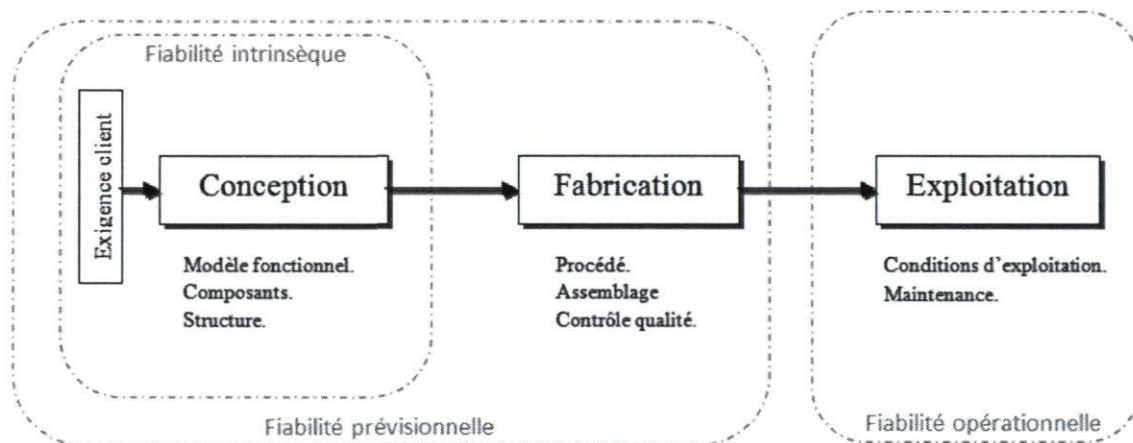


FIGURE 3.2 – Élaboration de la fiabilité

#### La fiabilité estimée ou intrinsèque :

C'est la fiabilité d'un dispositif ou composant, mesurée au cours des essais spécifiques effectués selon un protocole entièrement défini.

#### La fiabilité prévisionnelle :

C'est la fiabilité calculée au stade de la conception, sur la base d'un modèle mathématique défini à partir des données du projet et de la fiabilité estimée des composants.

#### La fiabilité opérationnelle :

C'est la fiabilité évaluée sur des dispositifs en exploitation normale. Elle dépend des conditions réelles d'utilisation.

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

### **3.4 Les différentes phases du cycle de vie d'un produit.**

L'ingénierie de la fiabilité identifie trois phases dans le cycle de vie d'un produit sans réparation.

La première phase est la phase de mortalité infantile où le taux de défaillance est relativement élevé. Les défaillances qui se produisent pendant cette phase sont généralement associées aux défauts de fabrication, de contrôle de qualité, de conception,...

La deuxième phase est la phase de défaillance aléatoire, ou phase de vie utile. Pendant cette phase, le taux de défaillance est sensiblement constant. Au cours de cette phase, les défaillances observées ont des causes dans l'occurrence est aléatoires. Réduire le taux de défaillance lors de cette étape nécessite généralement des changements dans la conception des produits (redondance, amélioration de la résistance).

La troisième phase correspond au vieillissement. Cette phase se caractérise par un taux de défaillance qui augmente avec le temps. Ces défaillances peuvent être causées par la fatigue, la corrosion, le vieillissement...

L'évolution dans le temps du taux de défaillance d'un produit donné est caractérisée par ce qu'on appelle, en analyse de fiabilité, la courbe en baignoire (figure 3.3).

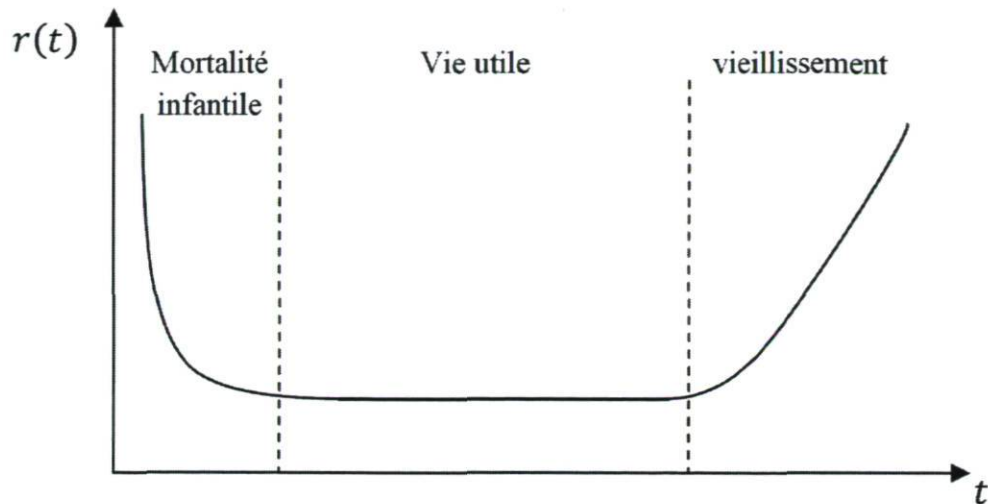


FIGURE 3.3 – Allure du taux de panne  $r(t)$  en fonction de l'unité d'usage

L'expérience a montré que de nombreux éléments, tels que les composants électroniques, ont un taux de défaillance qui évolue de cette manière-là.

Pour ce qui concerne les composants mécaniques, ils sont soumis dès le début de leur vie, au phénomène d'usure ou de vieillissement, et l'évolution du taux de défaillance en fonction du temps ne présente pas le plateau de la figure précédente. La période de vie utile n'existe pas ou elle est réduite (figure 3.4). Le taux de défaillance du dispositif est une fonction non linéaire et ceci à chaque phase de vie (McLean, 2000).

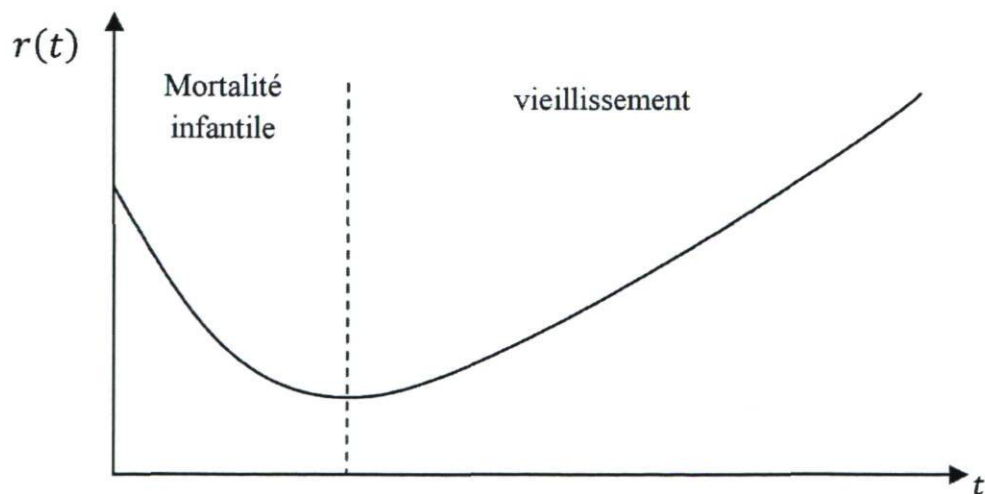


FIGURE 3.4 – La courbe du taux de défaillance pour des composant mécanique



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

- La phase de mortalité infantile où la durée de vie en principe est très courte. Elle est décrite par une décroissance progressive du taux de défaillance avec le temps liée à une amélioration des caractéristiques internes (caractéristiques des défauts) et des interfaces par des actions de rodage préalable sur les pièces.
- La phase de vieillissement, qui comporte la majorité de la durée de vie utile du dispositif. Elle est caractérisée par une augmentation progressive du taux de défaillance.

En générale, Les pièces mécaniques sont soumises à des phénomènes de vieillissement multiples qui peuvent agir en combinaison : usure, fatigue, rupture, corrosion, déformation, et finalement perte de résilience ou fragilisation, Tebbi (2005)

### 3.5 Recueil de données de fiabilité.

Sans des données fiables, il est difficile d'évaluer la fiabilité dans un délai raisonnable. Au fil des années de la pratique de la fiabilité, il y a eu un grand effort pour construire une base des différents types de données de défaillance.

Les sources de données, qui peuvent être exploitées en phase de conception, dépendent du type de composants intégrés dans la solution. Ces composants peuvent être séparés en deux groupes, (Menye, 2009) :

- Composants identiques ou similaires qui ont déjà été utilisés dans d'autres produits. Leurs données sont issues des historiques des systèmes existants (ou ayant existé), dans lesquels ces composants ont déjà été intégrés. Ces bases de données sont valables sous certaines conditions telles que : la température, l'environnement, . . . Plusieurs bases de données de fiabilité sont disponibles, selon le domaine. Dans le domaine de l'électronique, on recense une multitude de bases de données. Alors que, dans le domaine de la mécanique les recueils de données sont moins disponibles pour les composants mécaniques. Le tableau 3.2, présente les principales bases de données de fiabilité en mécanique, ainsi que leurs sources.

Source	Titre	Éditeur	Dernière version
AVCO	Failure Rates.	D.R.Earles&M.F.Eddins AVCO Corporation, USA.	Avril 1962.
FARADA	Failure Rate Data	GIDEP-Government Industry Data Exchange Program (USA)	Mil-STD-1556 B, 24 février 1986
NPRD	Nonelectronic Parts Reliability Data.	Reliability Analysis Center, RAC, New York, USA.	NPRD 97, 1997.
NSWC	Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment.	Carderock Division, Naval Surface Warfare Center, United States Navy.	NSWC-98/LE1, 1998.
EIREDA	European Reliability Industry Data Handbook	European Commission and Electricité de France CRETE UNIVERSITY PRESS	1998

TABLE 3.2 – Recueils de données de fiabilité en mécanique.

- Nouveaux composants, spécialement conçus pour la solution adoptée au cours de développement. Les taux de pannes peuvent être évalués soit par similarité, lorsqu'il existe des composants plus ou moins similaires pour lesquels les bases de données sont disponibles, soit par l'approche bayésienne qui permet d'estimer les paramètres en prenant en compte à la fois les données expérimentales et les connaissances des experts (Menye, 2009).

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

Au prochain chapitre nous aborderons les méthodes et les outils généralement utilisées pour évaluer la fiabilité.

## Chapitre 4

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

Comme on l'a mentionné au chapitre précédent, pour évaluer la fiabilité d'un produit on doit disposer de données sur la durée de vie. Les données à partir d'essais ou de retour d'expérience. Pour plusieurs problème de consommation courante, des données sur le taux de panne sont publiées. Ces taux de pannes sont supposés constants Tebbi *et al.* (2003).

Différentes techniques disponibles permettent d'évaluer la fiabilité, soit à partir de l'analyse de données, soit à partir d'un nombre réduit de données issues des tests sur des prototypes physiques (Zwingmann, 2005).

Un bref examen des différents outils d'ingénierie de la fiabilité sera présenté. Nous exposerons, en premier, une revue des approches qualitatives et quantitatives qui sont utilisées pour prédire la fiabilité lors de la validation, et pour prévoir la fiabilité d'un produit à partir de la connaissance de la fiabilité de ces composants. Puis l'approche analytique de la fiabilité (Contrainte/Résistance), et les méthodes d'évaluation probabiliste seront présentées. Cet examen est loin d'être exhaustif, mais permet néanmoins d'aborder l'état de l'art sur l'intégration des outils d'évaluation de fiabilité dans l'ingénierie de la conception, en particulier au stade de la conception.



## 4.1 Modélisation et évaluation de la fiabilité d'un système multicomposant.

L'évaluation de la fiabilité d'un système à partir de ses éléments de base est l'un des aspects les plus importants de l'analyse de fiabilité. Un système est une collection d'objets (sous-systèmes, composants, ...) dont la bonne coordination et opération conduisent à son bon fonctionnement.

Dans l'analyse de la fiabilité, il est important de développer un modèle qui traduit le bon fonctionnement de système. le fonctionnement de différents états possibles de ses composants. Dans cette étude, on suppose que le système ne peut occuper que l'un des deux états "En opération" ou "Hors usage".

### 4.1.1 Schémas blocs.

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

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

On présente dans les section suivantes, les configurations les plus fréquentes (figure 4.1) : Système en série et système en parallèle.

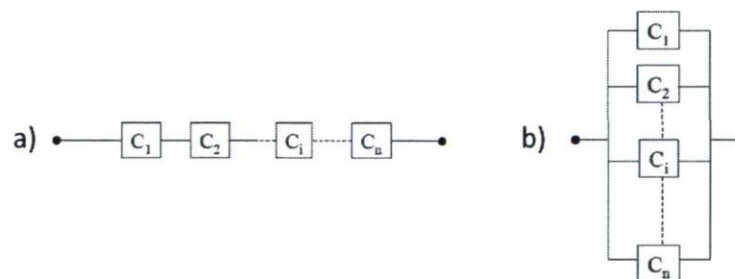


FIGURE 4.1 – Configuration d'un système : a) en série. b) en parallèle.

#### 4.1.1.1 Système en série.

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

$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (4.1)$$

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

$$r(t) = \sum_{i=1}^n r_i(t) \quad (4.2)$$

#### 4.1.1.2 Système en parallèle.

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

$$R(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)) \quad (4.3)$$

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

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

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

### 4.1.2 Diagramme d'états.

L'approche markovienne est largement utilisée en analyse de la fiabilité des système. Elle permet de modéliser les transitions entre différents états possible du système dont les modes de défaillance sont dépendants, mais aussi pour les systèmes réparables avec des taux de panne et de réparation constants.

Le diagramme d'état représente le support graphique des différents états du système et les transitions entre ces états, qui sont représentés par des cercles et relier entre eux par des arcs orientés qui représentent la transition d'un état de départ vers un état d'arrivé,(figure 4.2).

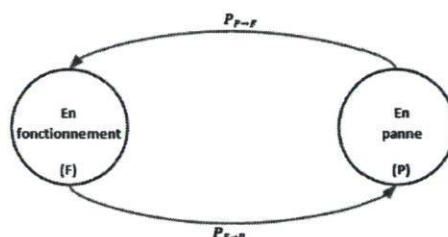


FIGURE 4.2 – Diagramme de transition associée à un système ne peuvent occuper que deux états.

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

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



## 4.2 Conception pour la fiabilité.

### 4.2.1 Les arbres de défaillance (AdD).

#### 4.2.1.1 Concept de base.

L'arbre de défaillance est un outil d'analyse et de recensement purement déductif. Il représente le mode de défaillance du système en fonction des modes de défaillance de ses sous-systèmes et composants. Cette méthode a pour objectif, à partir d'un événement indésirable défini à priori, de déterminer les combinaisons d'évènements, c'est-à-dire les défaillances de composants, pouvant conduire à l'événement indésirable (EI). Cette analyse permet de remonter de cause en cause jusqu'aux événements de base susceptibles d'être à l'origine de l'événement indésirable. Il peut ainsi améliorer la conception de tout système spécifié, produit, ou processus.

L'arbre de défaillance se déroule au cours des premières phases de conception, et au fur et à mesure que la conception se développe, il est progressivement raffiné et mis à jour.

Pour chaque défaillance potentielle, l'AdD est construit en quatre étapes :

1. Rechercher les causes immédiates provoquant directement l'événement indésirable. La définition de l'événement indésirable, qui fera l'objet de l'analyse est une étape cruciale pour la construction de l'arbre. Plus l'événement est défini de manière précise, plus simple sera l'élaboration de l'arbre de défaillances.
2. Classer les événements intermédiaires en deux classes :
  - Défaillance du système dû à la défaillance d'un seul composant.
  - Défaillance de système dû à la défaillance de plusieurs composants.
3. Analyser les défauts des composants : chercher la défaillance primaire puis la défaillance seconde ;
  - Défaillance primaire : elle représente la défaillance d'un composant dû à ses défauts internes. Cela se produit dans un environnement pour lequel le composant est qualifié, c'est-à-dire que les paramètres de l'environnement (température,

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

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

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

Chaque niveau d'événement de L'arbre de défaillance est relié en cascade à l'aide de symboles correspondant à des opérateurs logiques (Table 4.1).

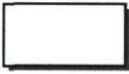





Événement		Opérateurs	
	Événement indésirable ou événement intermédiaire.		ET
	Événement élémentaire ou origine. (défaillance de base).		OU
	Événement élémentaire non développé.		Porte « combinaison »

TABLE 4.1 – Evénements et opérateurs fondamentaux

À titre illustratif, un exemple d'arbre de défaillance d'une soupape d'un réservoir avec l'événement indésirable "la valve ne limite pas la pression" et la cause primaire "la valve ne s'ouvre pas" est étudié en détail, (figure 4.3).

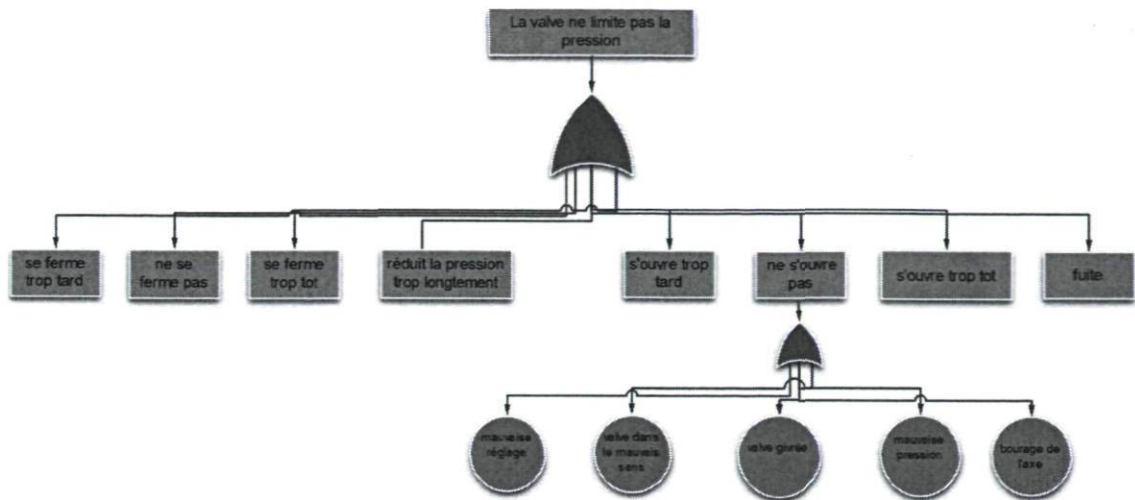


FIGURE 4.3 – Exemple d'un AdD d'une soupape d'un réservoir

À la base, ces arbres de défaillance ne renferment que des informations qualitatives. L'objectif qualitatif consiste à construire une synthèse de tout ce qui peut conduire à un événement redouté et à évaluer l'effet d'une modification du système. L'AdD est un modèle qui illustre graphiquement et logiquement toutes les combinaisons des événements indésirables, ainsi les objectifs de l'AdD sont :

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

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

Les paramètres de fiabilité du système peuvent être calculés à l'aide des règles classiques de simplification des expressions booléennes si la probabilité de défaillance des composants est connue. Ainsi, les facteurs influant sur la fiabilité du système peuvent être analysés. Donc, il peut être utilisé pour quantifier les probabilités des événements



sommets en propageant les probabilités d'occurrence des événements de base vers le sommet des arbres. Lewis (1994) entre autres auteurs, donne de plus amples informations sur la construction et l'évaluation qualitative et quantitative des AdD. Cependant, le Calcul de la probabilité qu'un événement indésirable se produise est basé sur les liens de causalité, qui peuvent être :

- Inclusifs (A Et B) :

$$Pr(A \cap B) = Pr(A).Pr(B) \quad \text{avec } A \text{ et } B \text{ indépendants} \quad (4.4)$$

- Exclusifs (A OU B) :

$$Pr(A \cup B) = Pr(A) + Pr(B) - Pr(A \cap B) \quad (4.5)$$

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

$$Pr(A \cap B) = 0 \quad (4.6)$$

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

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

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

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

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

- Documenter le processus du développement.

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

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

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

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

TABLE 4.2 – Classes de probabilité d'occurrence d'un événement (Salamone, 1995)

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

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

TABLE 4.3 – Exemple de classes de gravité d'un événement (Salamone, 1995)



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

L'indice de criticité " C " est la résultante de ces facteurs de risques. Il est déterminé par le produit des trois indices, équation 4.7.

$$C = D.O.G \quad (4.7)$$

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

#### 4.2.2.1 Principales étapes pour effectuer une AMDEC

L'AMDEC peut être réalisée en huit étapes sur la base des concepts clés de la hiérarchie des systèmes, opérations, fonctions, mode de défaillance, effets, risque de défaillance et de prévention. Ces étapes sont données dans l'ordre logique suivant, figure 4.4 .

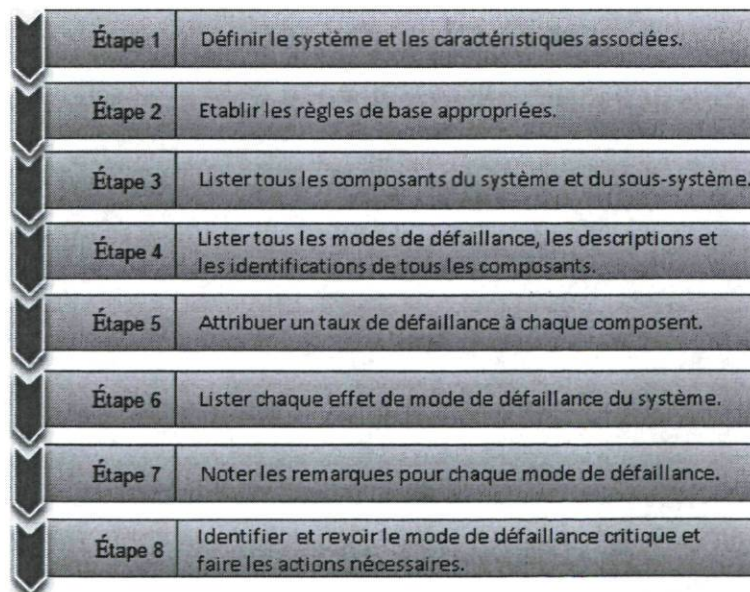


FIGURE 4.4 – Principales étapes pour effectuer une AMDEC



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

#### 4.2.2.2 Types d'AMDEC

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

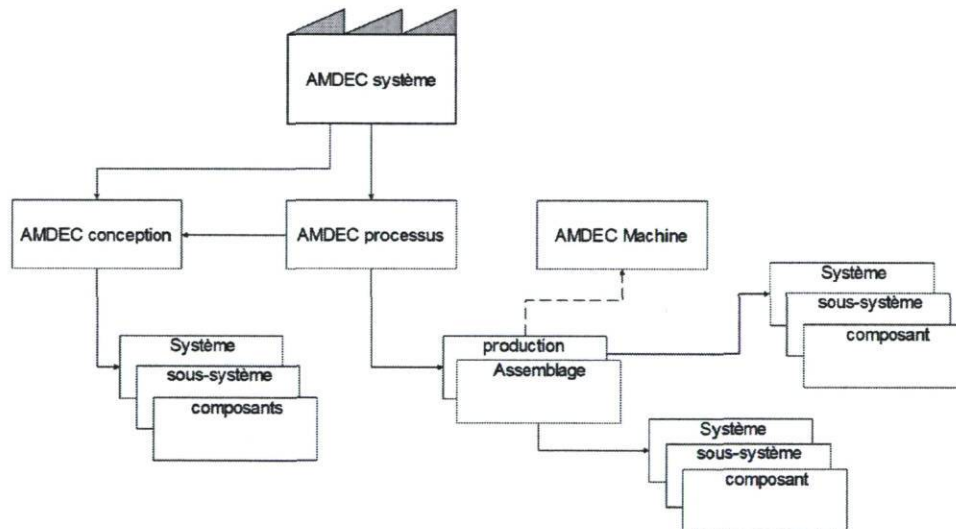


FIGURE 4.5 – Type d'AMDEC

#### – AMDEC système

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

– AMDEC conception

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

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

– AMDEC PROCESSUS

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

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

### 4.2.3 Déploiement de la fonction qualité.

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

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

- Quelles sont les attentes du client à considérer en priorité pour assurer la réussite



- commerciale du produit ?
- Quelles sont les réponses techniques à privilégier ?
- Quelles sont les difficultés potentielles du cycle de développement du produit ?

La réponse à ces questions peut se faire en déployant le QFD plus en détail par une équipe de projet formée de personnes complémentaires réunies autour de la problématique à solutionner. La figure 4.6, montre la structure d'un QFD, ce qui est souvent appelée "maison de qualité" de par sa forme.

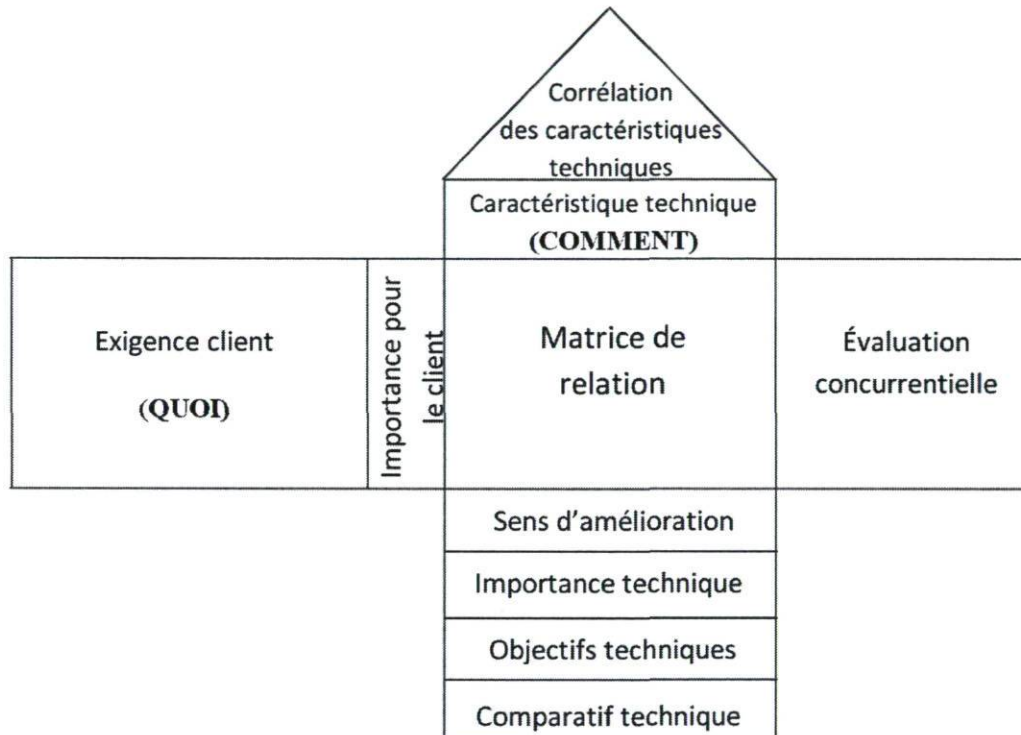


FIGURE 4.6 – *Maison de la qualité*

La maison de la qualité contient l'axe client (horizontal) et l'axe technique (vertical). L'axe client décrit les besoins du client, leurs importances et l'évaluation concurrentielle. Les besoins des clients sont souvent désignés par "QUOI".

L'axe technique explique les caractéristiques techniques qui affectent la satisfaction du client directement pour une ou plusieurs attentes de la clientèle, Yang (2007). Sur l'axe technique, on trouve les caractéristiques techniques, leurs corrélations, l'importance et les objectifs des caractéristiques techniques et les techniques d'étalonnage concurrentiel ainsi que le sens d'amélioration. La composante des caractéristiques techniques est souvent dénommée "COMMENT". Les relations entre les besoins du client et les caractéristiques techniques sont évaluées dans la matrice de relation.



Le QFD sera mené surtout en phase amont d'un nouveau projet, à un stade où le large éventail de choix des caractéristiques techniques est encore possible. La démarche consiste à traduire la voix du client dans le langage des ingénieurs de développement. Les principaux éléments à prendre en compte dans ce cadre sont alors : les critères de valeur du produit, les enquêtes marketing, les matrices relationnelles et la sélection des paramètres critiques. De ce fait le QFD consiste en plusieurs activités supportées par des tables et des matrices.

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

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

La mise en œuvre du QFD, consiste à élaborer puis à déployer les matrices QUOI-COMMENT qui permettent à la fois : de définir les spécifications d'un produit " **Les COMMENT** " à partir des attentes du client " **Les QUOI** ", de comparer le produit avec les produits concurrents et, enfin, de faire apparaître les caractéristiques techniques nécessaires à la réalisation du produit.

### 4.3 Approche probabiliste de la conception.

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

Dans ce sens, la prévision du comportement doit être préférablement faite en termes de probabilités. Les incertitudes sont liées, à la variabilité des paramètres physiques et géométriques, aux fluctuations des conditions de charge, des conditions aux limites de

contrainte, et aussi aux lois physiques et hypothèses simplificatrices utilisées dans le processus de modélisation, (Rojas, 2008).

Ainsi, la compatibilité de mécanisme d'interaction entre les phénomènes responsable de la dégradation et de la défaillance des système fait en sorte que la performance d'un système opérant dans des conditions données et dans un intervalle de temps donnée ne peut être prédite avec incertitude

des prévisions sur la performance comportementale peuvent être données uniquement dans un sens probabiliste. Il s'agit donc de l'analyse de la fiabilité par des approches probabilistes, tenant en compte de la dispersion des variables de conception décrites par des distributions probabilistes.

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

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

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

- Le calcul et l'optimisation de la fiabilité d'un système afin d'améliorer la qualité de ses composants.
- L'étude de l'effet des variations des caractéristiques de matériaux, des variations des dimensions et des variations de l'environnement, sur la durée de vie d'un système.
- Le dimensionnement d'un système par rapport à un objectif de fiabilité donné en calculant sa probabilité de défaillance.

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



### 4.3.1 L'approche probabiliste "Contrainte- Résistance".

Cette méthode est basée sur la comparaison probabiliste de la Résistance ( $R$ ) et la Contrainte ( $C$ ), considérées comme des variables aléatoires, en utilisant leurs distributions de probabilité, respectivement  $f_R$  et  $f_C$ , ou leurs paramètres illustratifs. Nous pouvons synthétiser cela par le schéma ci-dessous (figure 4.7), appelé diagramme de Warmer.

Stapelberg (2009) définit les différences entre la résistance et la contrainte comme suit :

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

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

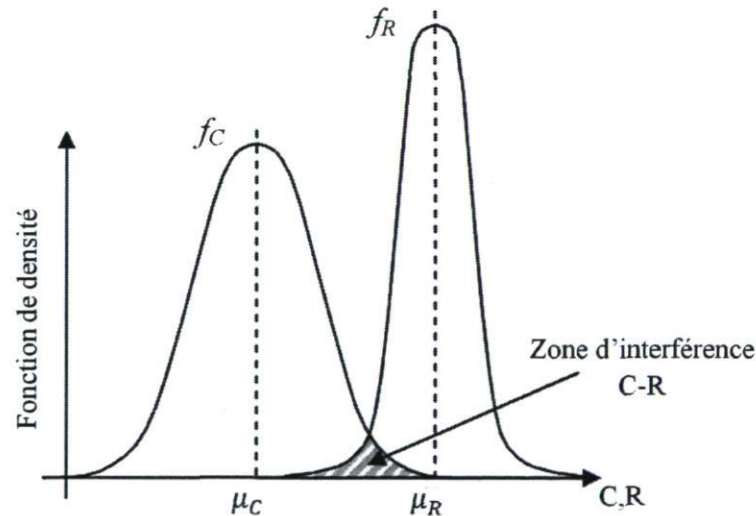


FIGURE 4.7 – Diagramme de Warmer

En connaissant les deux fonctions de densité  $f_R$  et  $f_C$ , on peut déterminer la probabilité de défaillance  $P_f$ , définie par la probabilité que la résistance à la contrainte soit inférieure à la contrainte appliquée (Zone d'interférence  $R - S$ ) :

$$P_f = P(R < C) = \int_0^{\infty} f_R(r) \cdot \left[ \int_0^r f_C(c) dc \right] . dr \quad (4.8)$$



### 4.3.2 Évaluation de la fiabilité d'un produit avec l'approche probabiliste " Contrainte - Résistance ".

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

#### 4.3.2.1 Les variables de conception

Pour définir la fiabilité d'un produit sous le point de vue mathématique, il faut premièrement identifier les variables de conception  $X_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , qui peuvent être les différents facteurs et critères de performance, les paramètres de conception, les paramètres de fabrication,.... L'aléa sur ces variables est défini par une fonction de densité.

Soit  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  le vecteur de variable de base qui regroupe les  $n$  variables de conception d'un produit, et  $f_{(X_1, \dots, X_n)}(x_1, \dots, x_n)$  la densité de densité conjointe des variables de base.

#### 4.3.2.2 Formulation de la fonction d'état limite.

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

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

$$G(X) = R_{critique} - S(X) \quad (4.9)$$

avec,  $R_{critique}$  est la limite du seuil critique de la réponse étudiée appelée résistance.

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

$$P_f = \int_{G \leq 0} f_{(X_1, \dots, X_n)}(x_1, \dots, x_n) d_{x_1} \dots d_{x_n} \quad (4.10)$$

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

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

- Méthodes d'approximation : basées sur une approximation de la loi de distribution des variables de conception par la loi Normale. Le calcul de la probabilité de défaillance est alors effectué à partir de l'étude de l'état limite. Les méthodes les plus utilisées sont les méthodes basées sur le développement de Taylor au voisinage du point de conception : First/Seconde Order Reliability Méthodes connue sous le nom *FORM/SORM*.
- Méthodes par simulation : basées sur un calcul approximatif de la probabilité de défaillance selon la méthode de Monte-Carlo, en générant des échantillons de la population des variables de base pour obtenir une population représentative sur laquelle une analyse statistique peut être effectuée. Cette Méthode se base sur l'étude de la fonction de performance  $G(X)$ . Donc pour le calcul de la probabilité de défaillance, il est nécessaire de connaître la forme ou la surface de l'état limite.

### 4.3.3 Méthodes d'approximation Premier/second ordre

#### 4.3.3.1 Concept des méthodes d'approximation

Les méthodes d'approximation FORM/SORM sont considérées comme les plus efficaces en termes de rapport temps de calcul et précision de la réponse. Elle consiste en un premier temps, à rechercher le point de conception dans l'espace des variables standards. Puis, la fonction d'état-limite est approximée par un développement de Taylor au premier ordre (FORM) ou au second ordre (SORM), autour du point de conception (point de défaillance le plus probable).

### 4.3.3.2 Méthodes d'approximation du premier ordre FORM.

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

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

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \quad (4.11)$$

Où,  $\Phi(\cdot)$  est une fonction de répartition d'une variable normale centrée réduite (moyenne nulle et écart-type unitaire).

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

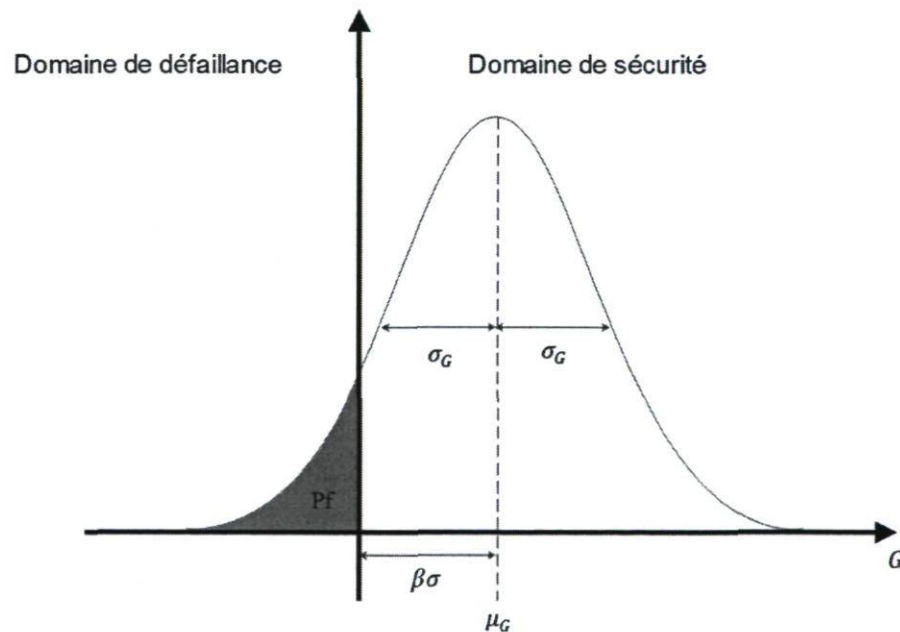


FIGURE 4.8 – Fonction de densité de probabilité de  $G(\cdot)$

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



qui appartient à l'état limite.

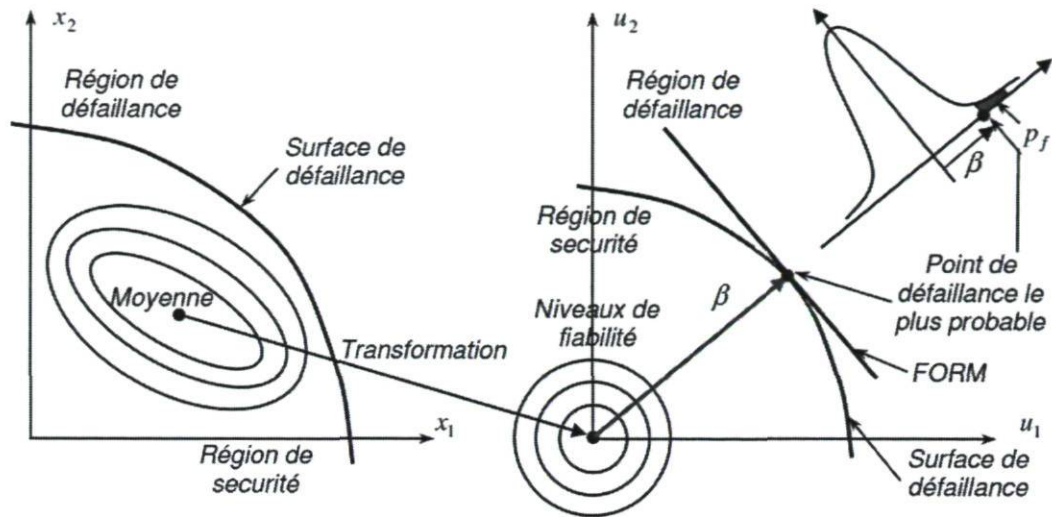


FIGURE 4.9 – Transformation de deux variables du système de coordonnées original au système de coordonnées réduit. L'approximation par FORM de la fonction de performance (Rojas, 2008).

La méthode FORM améliorée (méthode de Hasfer-Lind), peut être appliquée pour des variables aléatoires normales (Haldar et Mahadevan, 2000). Cette méthode requiert la transformation des variables aléatoires de base en variables aléatoires normales centrées réduites (figure 4.9).

$$x'_i = \frac{x_i - \mu_{x_i}}{\sigma_{x_i}} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.12)$$

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

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

$$\beta = \sqrt{(x'^*)^T(x'^*)} \quad (4.13)$$

Le point de distance minimale sur la surface de défaillance est appelé le point de

conception dans l'espace de variable normale centrée réduite est exprimé par :

$$x'^* = -\alpha_i \beta \quad (4.14)$$

Où,  $\alpha_i$  le cosinus directeur au long des axes des coordonnées, exprimé par :

$$\alpha_i = \frac{\left(\frac{dG}{dx_i}\right)^*}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{dG}{dx_i}\right)^{*2}}} \quad (4.15)$$

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

$$x'^* = \mu_{x_i} - \alpha_i \sigma_{x_i} \beta \quad (4.16)$$

Sur la figure (4.8), la courbe d'état limite est remplacée selon la méthode d'approximation FORM par un hyperplan tangent au point de conception.

Le premier algorithme FORM1 utilisé dans les simulations numériques pour l'estimation de l'indice de fiabilité requiert la connaissance explicite de  $G(X)$  en fonction de point de conception. Pour la prise en compte de la méthode FORM dans le processus de conception, on utilisera l'algorithme FORM2 (Haldar et Mahadevan, 2000) qui permet de calculer la valeur de  $\beta$  à partir de l'expression implicite de la fonction de performance (figure 4.10), c'est-à-dire, elle ne peut pas être exprimée comme une forme explicite des variables aléatoires. Dans ce but, on fait appel aux méthodes des éléments finis pour combler ce manque d'information.

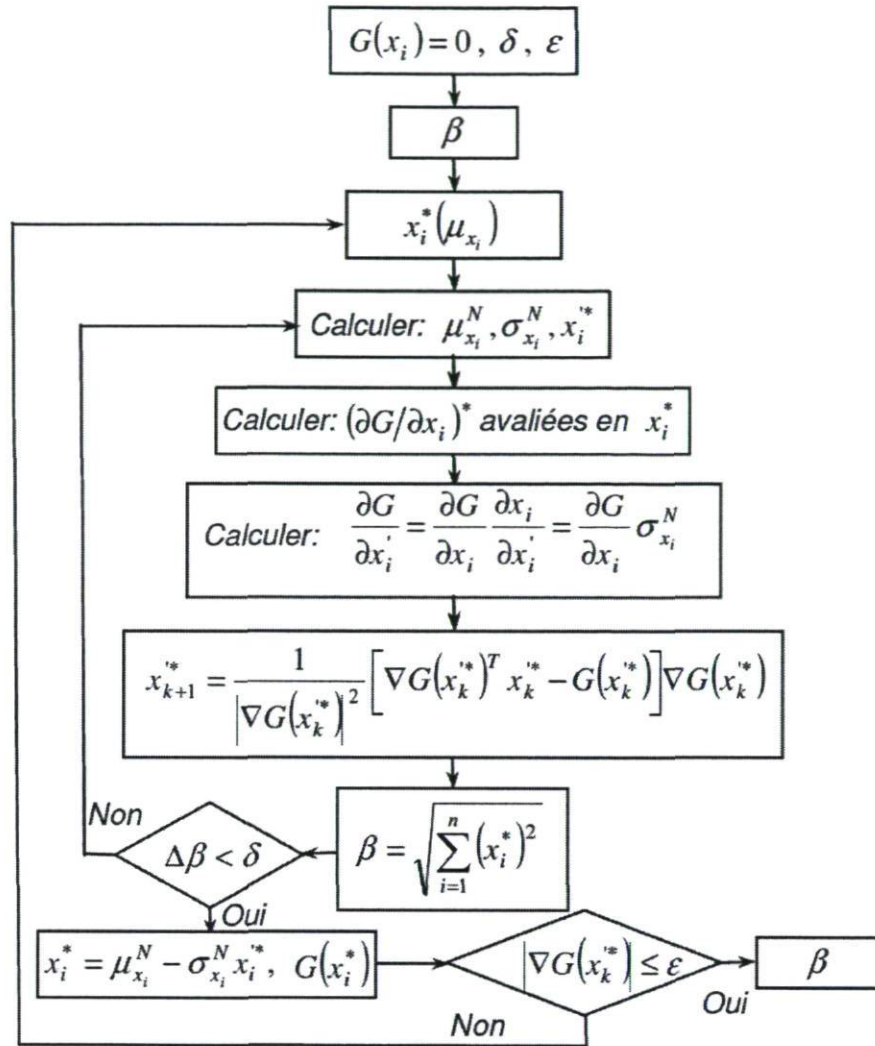


FIGURE 4.10 – Algorithme FORM pour l'estimation de l'indice de fiabilité (Rojas, 2008).

Dans cet algorithme,  $\delta$  est la tolérance exigée à  $\beta$ .

Les moyennes et les écarts types dans l'espace réduit sont désignés respectivement et  $\mu_{x_i}^N$  et  $\sigma_{x_i}^N$ , et ils sont donnés en fonction de  $f_{x(x_i)}$  et  $\phi_{(x_i)}$  des variables aléatoires par les expressions :

$$\mu_{x_i}^N = X_i - \phi_{(x_i)}^{-1} \sigma_{x_i}^N \quad (4.17)$$



$$\sigma_{x_i}^N = \frac{\phi(x_i)}{f_{x(x_i)}} \quad (4.18)$$

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

### 4.3.3.3 Méthodes d'approximation du second ordre SORM

La méthode d'approximation SORM, estime la probabilité de défaillance à travers une approximation quadratique ayant le même rayon de courbure que la fonction de performance au point de conception (figure 4.11). La courbure de la fonction de performance est approchée par un développement en série de Taylor du second ordre autour du point de conception. De cette façon, la méthode SORM constitue une amélioration de la méthode FORM.

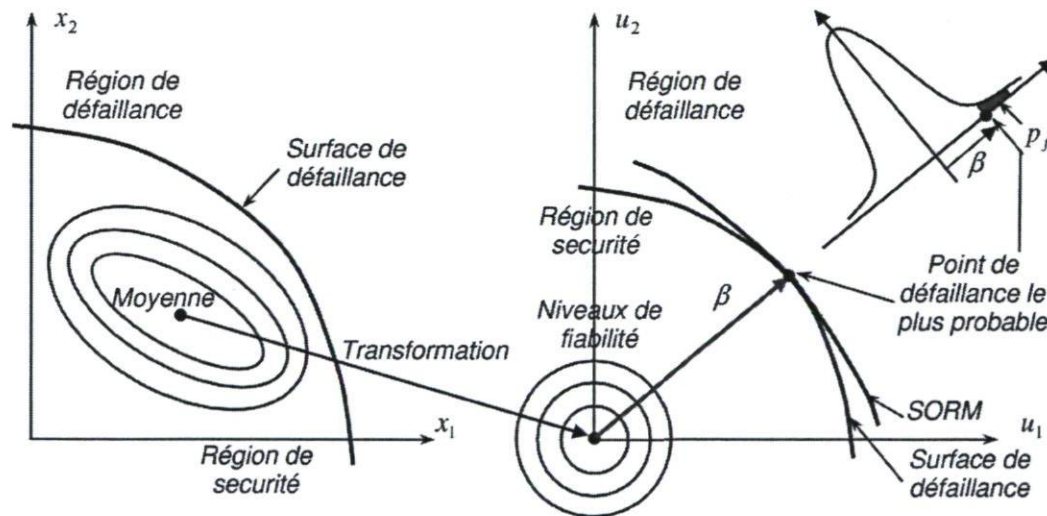


FIGURE 4.11 – Approximation par SORM de la fonction de performance (Rojas, 2008)

### 4.3.4 Méthodes de simulation de Monte-Carlo (SMC)

Les méthodes de simulation de Monte-Carlo sont basées sur le calcul de la fonction de performance pour un échantillon représentatif de la population. Une série de tirages

aléatoires sont effectués, ensuite l'évaluation de la réponse du système est effectuée pour chaque scénario donné.

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

La méthode SMC reproduit le fonctionnement d'un système réel par le biais analytique et analyse les effets des variations des entrées sur les sorties des systèmes (Zwingmann, 2005). Sa mise en œuvre comprend six étapes clés, Haldar et Mahadevan (2000), Rojas (2008).

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

En générale, dans la 4ème étape on fait appelle à des modèles des éléments finis, afin d'évaluer la fonction de performance implicite.

Le but est d'estimer l'intégrale suivante :

$$P_f = \int_{G \leq 0} f_X(x).dx \quad (4.19)$$

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

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

$$P_f = \int \gamma_F(x) f_X(x) dx = E[\gamma_F(x)] \quad (4.20)$$

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

$$P_f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \gamma_F(x_i) = \frac{N_f}{N} \quad (4.21)$$

$N_f$ , le nombre de fois (tirage) où la défaillance se produise.  
 $N$ , le nombre total de tirages, générés selon la fonction de densité dans chaque échantillon.

La figure 4.12, illustre la simulation d'importance dans l'espace physique. Les tirages sont générés autour du point de défaillance le plus probable.

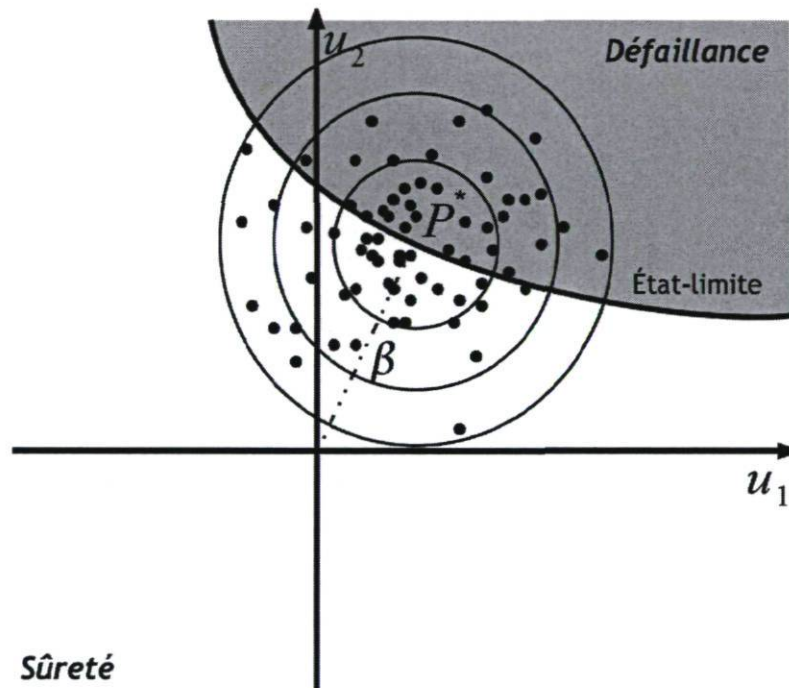


FIGURE 4.12 – Illustration de la simulation d'importance dans l'espace physique (Deheeger, 2008).

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



# Chapitre 5

## Identification et caractérisation des facteurs qui influencent la fiabilité.

En général, les défaillances peuvent se produire à la suite d'une mauvaise sélection de matériaux, d'erreurs de conception et d'imperfections de fabrication. Bien que certaines défaillances soient aussi causées par la variabilité due à la production et à l'exploitation. Il existe une relation entre les caractéristiques de défaillance d'un produit pendant son cycle de vie, et le phénomène de variabilité. Ces facteurs influencent la fiabilité du produit. Pour mieux cerner les différents facteurs qui mènent au même effet (variation de la fiabilité), une séance de brainstorming a été effectuée puis représentée sur un diagramme de causes-effets (diagramme d'Ishikawa), (figure 5.1).

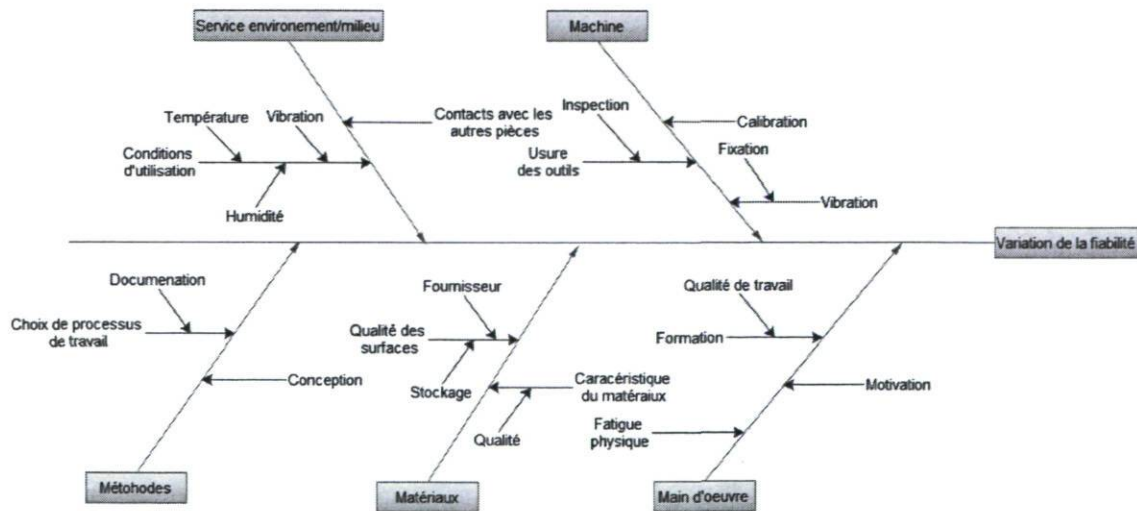


FIGURE 5.1 – Identification partielle des facteurs influençant la fiabilité.

La variabilité des facteurs influençant la fiabilité, ou le manque de contrôle et la compréhension de la variabilité sont des éléments importants lors de la prise en compte de la fiabilité en conception. En outre, une caractérisation adéquate de ces facteurs et la compréhension de leur variabilité, et comment ils interagissent avec les décisions prises pendant la conception peuvent améliorer la fiabilité du produit.

De point de vue de la conception, on peut regrouper les facteurs qui affectent la fiabilité en deux types, (figure 5.2) :

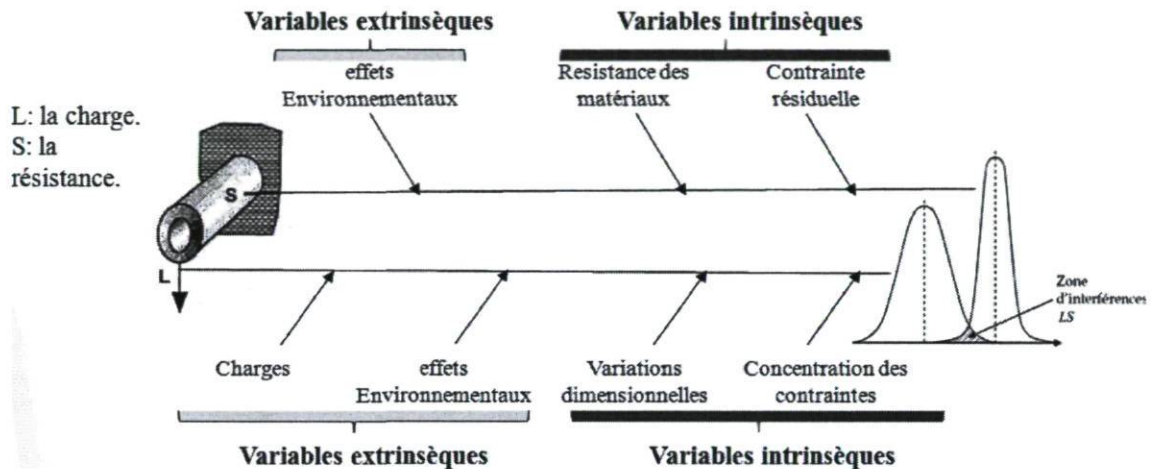


FIGURE 5.2 – Variables de conception.

- Les variables de conception intrinsèques, dont le concepteur a le plus de contrôle. Ces variables sont liées au domaine "matériaux", "méthodes" et "main d'œuvre".
- Les variables de conception extrinsèques dont le concepteur a un contrôle limité. Ces variables sont issues du domaine "milieu/environnement".

Pour mieux comprendre la variabilité des facteurs influençant la fiabilité et leurs caractéristiques. Nous présenterons dans les sections ci-dessous quelque facteurs jugés important avec, lorsque c'est possible, un aperçu sur leurs intégrations dans l'évaluation de la fiabilité dans le processus de conception.

## 5.1 Facteur "matériaux".

Dans la phase de conception, les propriétés des matériaux (figure 5.3) sont des grandeurs essentielles pour évaluer le comportement d'un produit. Leur imprécision conduit souvent à un mode de défaillance.

Propriétés fondamentales des matériaux	Définition
Rigidité	la rigidité est en fonction de l'intensité des liaisons qui existent entre les atomes ou les molécules constitutives d'un matériau. On mesure la rigidité par la valeur des divers modules d'élasticité en particulier par le module d'Young, E.
Résistance	la résistance caractérise la contrainte maximale qu'un matériau peut supporter avant de se rompre. La résistance d'un matériau est fonction, bien entendu, de l'intensité de ses liaisons atomiques ou moléculaires, mais elle peut également dépendre de l'influence de certains paramètres extérieurs, comme la géométrie de la pièce ou les défauts qui sont présents (fissure et dislocation).
Ductilité	la ductilité est la propriété grâce à laquelle un matériau peut se déformer de façon permanente avant de se rompre. La ductilité facilite donc la mise en forme du matériau à l'état solide.
Ténacité	la résistance à la propagation brutale de fissures. (on peut mesurer cette ténacité par l'énergie requise pour entraîner la rupture.

FIGURE 5.3 – Propriétés fondamentales des matériaux.

Même si les données sur les propriétés de la plupart des matériaux sont largement disponibles, il est possible de trouver des variations dans les caractéristiques d'un même matériau, et cela est dû aux fournisseurs de la matière première qui ne peuvent pas garantir que leur production garde constamment le même niveau de qualité (Zwingmann, 2005).

Différentes caractéristiques dépendantes telles que la limite élastique, contraintes résiduelles, et d'autres ne sont pas simples à mesurer. Il est très courant chez les concepteurs de n'utiliser que les propriétés grossières au cours de la phase de conception. Ces caractéristiques ont une influence importante sur le comportement du produit et donc sur sa fiabilité.

## 5.2 Facteur "main d'œuvre", "erreur humaine".

### 5.2.1 Classification et causes.

Comme dans la fiabilité de tout autre système, l'erreur humaine joue un rôle important dans la fiabilité des équipements mécaniques. Au fil des ans, et à plusieurs reprises, on a observé que les systèmes mécaniques ont échoué en raison d'une erreur humaine plutôt qu'une défaillance matérielle.



Un examen attentif de l'erreur humaine dans la conception des systèmes mécaniques peut aider à éliminer ou à réduire l'occurrence de défaillances non liées au matériel pendant le fonctionnement de ces systèmes.

Les erreurs humaines peuvent se produire de différentes façons, et leur présence peuvent être classées en sept catégories distinctes comme le montre la figure 5.4, Dhillon (2005).

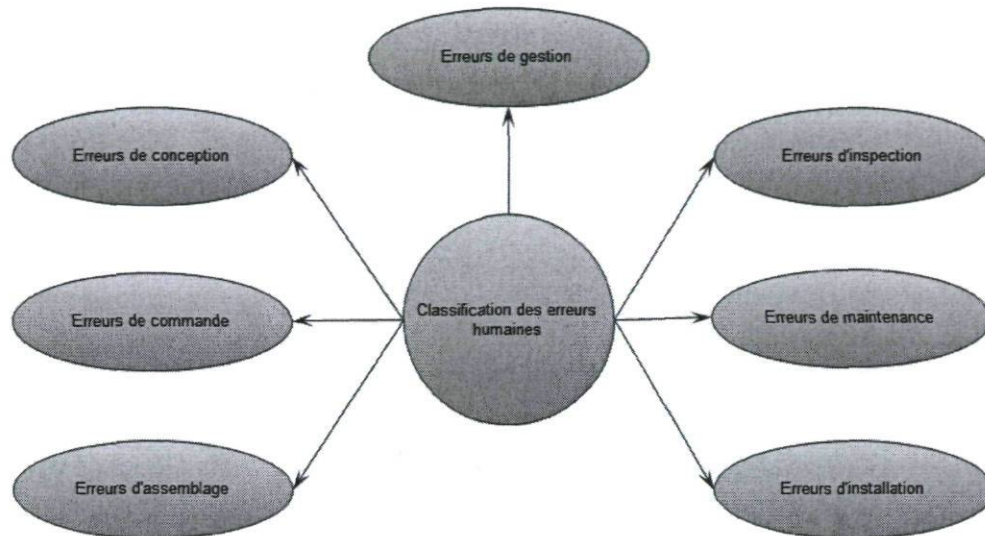


FIGURE 5.4 – Classification des erreurs humaines.

Il existe de nombreuses causes qui favorisent l'apparition d'une erreur humaine : la mauvaise conception des équipements, la complexité des tâches, l'aménagement inadéquat des lieux de travail, les procédures d'exploitation et d'entretien, un environnement inapproprié du travail (i.e : le mauvais éclairage, haute/basse température, espace de travail encombré, niveau de bruit élevé, ...), les outils inadéquats de travail, les faibles compétences du personnel impliqué, et la faible motivation du personnel, Dhillon (2005).

### 5.2.2 Méthode de l'évaluation.

Il est difficile d'estimer la probabilité de défaillance d'un système, et à priori sa fiabilité, si on ne considère pas l'incertitude due à l'erreur humaine. En outre, si on néglige cette incertitude, on ne peut même pas obtenir une estimation de la probabilité de défaillance afin de valider la fiabilité du système.

La difficulté relative à l'intégration de l'erreur humaine réside dans la quantifications de la fiabilité humaine. De nombreuses techniques permettent d'évaluer la fiabilité humaine ont été développées, Dhillon (2005) mentionne plusieurs techniques qui permettent de quantifier l'erreur humaine. Chaque technique a ses avantages et ses inconvénients. Habituellement, ces méthodes sont utilisées pour effectuer l'analyse des tâches dans la méthode de prédiction de taux d'erreurs humaines, il s'agit de construire un arbre de défaillance (une représentation markovienne), où on remplace les causes du diagramme (les états markoviens) par des tâches ou des sous-tâches réalisées avec une attribution de probabilité d'occurrence.

### **5.3 Facteur "Méthodes et Machine".**

Le choix d'une méthode est toujours liée au choix de la machine. De ce fait, si le choix de la méthode génère des variations du comportement de la pièce à produire, les sources de ces variations se retrouvent dans le choix de la machine et vice versa.

La prise en compte de ces variations causées par les machines est indispensable lors de l'évaluation du comportement d'un produit, car elles sont susceptibles de faire varier les contraintes résiduelles et la résistance des produits. Par exemple, si on considère les variations d'ordre géométrique. les cotes d'une pièce peuvent changer à cause : d'outillages usés, de machines dérégées, d'une mauvaise manipulation, . . . ces pièces produites ne sont pas rejetées car elles respectent les tolérances dimensionnelles définies par le bureau des méthodes. Ainsi, chaque dimension est une variable aléatoire, sa fonction de densité dépend du processus d'obtention de la cote.

Plusieurs modèles analytiques, sous forme de lignes directrices permettent de modéliser certaines variations (concentration des contraintes, rugosité d'usinage, . . .) en fonction du temps. Cependant, ces modèles reposent souvent sur des formulations empiriques qui ne peuvent pas être généralisées.

### **5.4 Facteur "Milieu / Environnement".**

Les variations des conditions de l'environnement d'exploitation donnent lieu à des surcharges temporaires ou transitoires provoquant des défaillances. Un certain nombre de propriétés des matériaux dans la conception dépendent notamment de ces conditions environnementales. Le moindre changement en dehors des limites calculées peut



entraîner des défaillances. Par exemple, la figure 5.5 montre comment la variation de la température entraîne des modifications sur les principales propriétés mécaniques d'un acier à base concentration en carbone. Ces défaillances peuvent être plus ou moins réduites par la sélection du matériau approprié et en respectant les règles de conception.

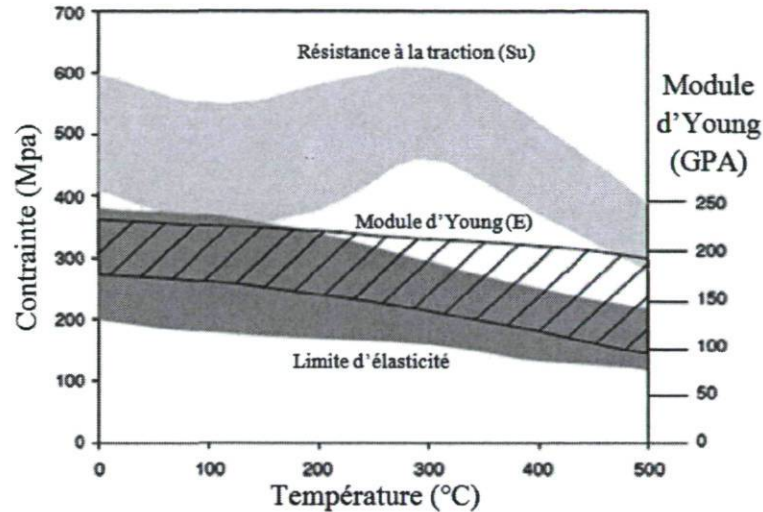


FIGURE 5.5 – Effet de la température sur l'acier.

## 5.5 Conclusion.

Dans ce chapitre, une caractérisation des différents facteurs influençant la fiabilité et leur variabilité a été exposée, afin de mettre en garde le concepteur de leur influence sur la fiabilité du produit. Ces facteurs et leur variabilité, sont plus ou moins difficiles à modéliser selon la complexité du produit et la précision des informations disponibles.

Le manque de contrôle et la compréhension des différents facteurs qui influencent la variabilité de la fiabilité du produit sont des éléments importants afin de pouvoir réduire la probabilité de défaillance en conception. Dans le chapitre qui suit une méthodologie de prévalidation de la fiabilité en conception sera présentée, afin de réduire les défaillances potentielles dès un stade précoce de la conception.



# Chapitre 6

## Modèle de prise en compte de la fiabilité en conception .

Un programme de fiabilité efficace consiste en une série de tâches à mettre en œuvre tout au long du cycle de vie du produit. Habituellement, les activités de la fiabilité sont des activités indépendantes dans des projets d'ingénierie (Yang, 2007), et les modes permettant d'intégrer les différents outils d'évaluation de la fiabilité dans le processus de conception sont mal définis. Ce qui rend la tâche difficile au concepteur pour effectuer une prévalidation, à priori de la fiabilité, avant de passer à une phase postérieure du processus de conception. Ceci génère un cumul d'erreurs dans chaque phase du processus, et ces dernières ont un impact direct sur le temps nécessaire pour la validation d'un produit et donc sur son coût total de développement et de mise en marché.

Pour pouvoir contribuer à la réussite des projets d'un point de vue de la fiabilité dès les premières phases de conception, en minimisant le nombre de modifications nécessaires pour satisfaire les exigences du client et donc réduire le temps requis lors de la validation d'un produit, on propose une méthodologie de prévalidation de la fiabilité à adopter dès la première phase du processus. Cette méthodologie comprend les principales phases de conception et les tâches qui doivent être à chaque phase, ainsi que les outils d'aide à la réalisation de ces tâches (figure 6.1).

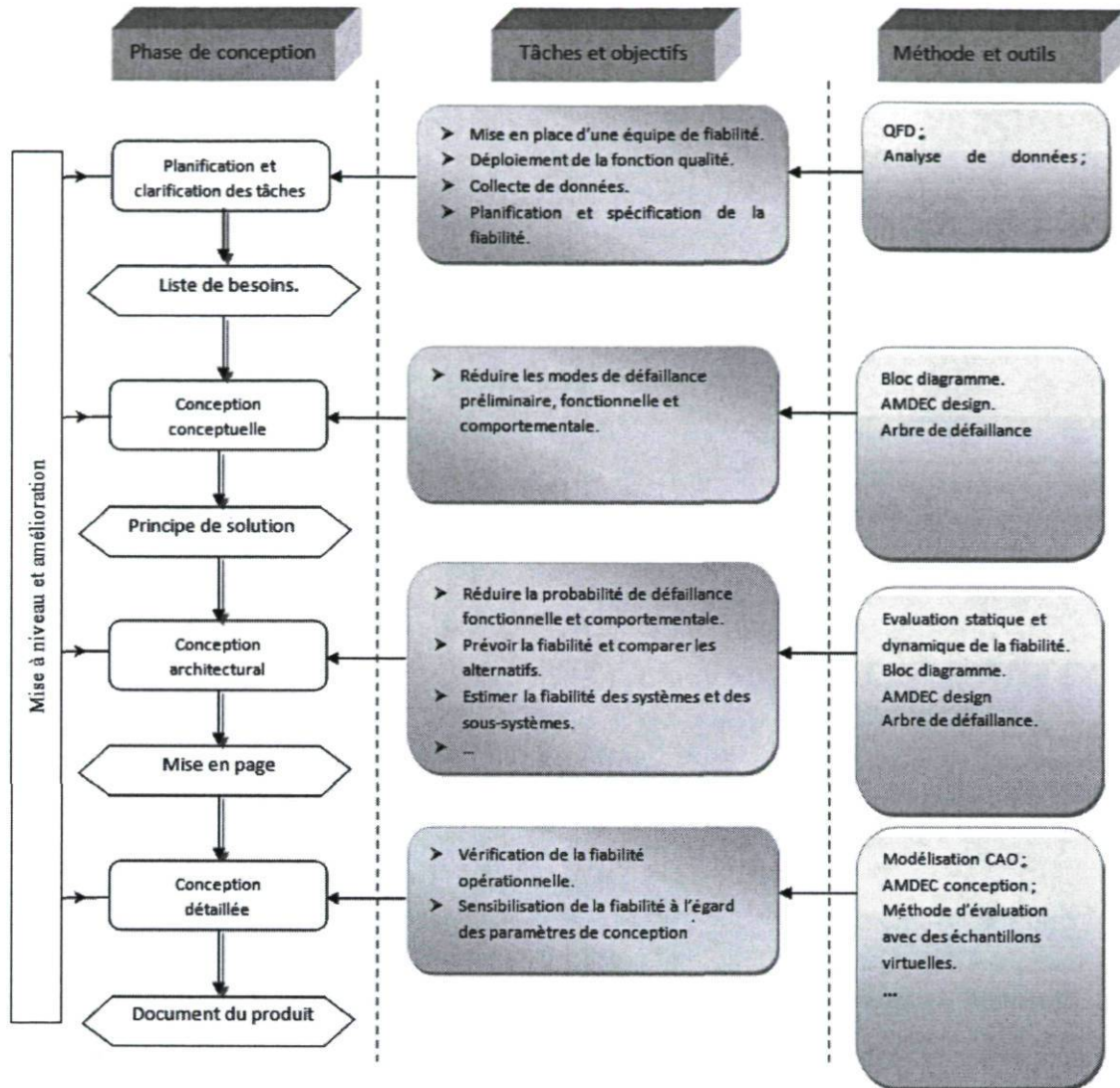


FIGURE 6.1 – Structure considérant de la fiabilité en conception.

## 6.1 Phase de planification et de clarification des tâches.

Au stade de la planification, les tâches de la fiabilité doivent permettre les multiples attentes du client, établir les exigences de la fiabilité concurrentielle, constituer une équipe et assurer les ressources nécessaires pour qu'un programme de fiabilité puisse être réalisé dans les meilleures conditions (figure 6.2). Les tâches de la fiabilité dans cette phase du processus de conception sont expliquées brièvement ci-dessous.

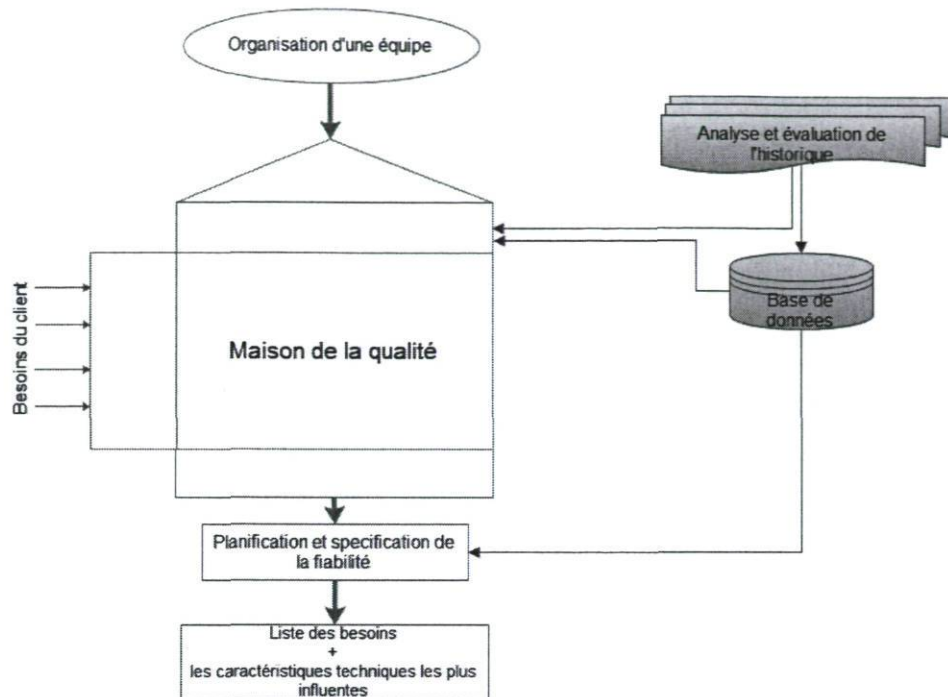


FIGURE 6.2 – Phase de planification des tâches.

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

**Analyse et évaluation de l'historique de la fiabilité** (Si disponible). Cette tâche consiste à collecter, rassembler et analyser les commentaires des clients, les données des tests et l'insuffisance des données du produit avant génération. L'analyse devrait indiquer les points dont le client n'était pas satisfait et de révéler les différents points à améliorer. Un modèle recommandé pour la caractérisation des données a été développé par Robert Klein, Cohen (1995), et peut être exploité lors de la réalisation de cette tâche.

**Déploiement de la fonction qualité (QFD).** Lors de l'exécution de cette étape, il faudra réduire toutes les caractéristiques techniques qui affectent la fiabilité, en met-



tant l'accent sur les attentes du client en termes de fiabilité, et en leur attribuant une note importante. Ensuite ces caractéristiques techniques seront fortement corrélées, afin d'identifier les différentes contradictions et obtenir celles qui affectent la fiabilité du produit. Les caractéristiques techniques sélectionnées doivent être développées à un niveau inférieur avec plus d'importance.

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

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

#### **Exemple illustratif :**

Pour illustrer la principale tâche de la phase de planification et de clarification qui est le déploiement de la maison de la qualité. Un exemple illustratif pour la prise en compte de la fiabilité lors de déploiement de la QFD, pour un système d'essuie-glace de pare-brise d'automobile est présenté, cet exemple est emprunté à YAN07. L'exemple typique est seulement pour un tel système et n'est pas destiné à être exhaustif.

1. On fait un état des exigences du client, pour définir les entrées de la maison qualité. Ces attentes sont souvent non techniques et floues. Pour le système étudié, les attentes de client sont : une grande fiabilité, un minimum de bruit de fonctionnement, pas de trace d'eau résiduelle, une grande zone d'essuyage... ces besoins sont répertoriés dans les entrées " QUOI " de la maison qualité (figure 6.3).
2. On détermine l'opportunité du client, dont le taux d'intérêt pour chaque exigence par rapport à une autre. Diverses approches d'échelle sont utilisées dans la pratique, mais aucune d'entre elle n'est théoriquement saine. Dans l'ensemble d'essuie-glace, nous utilisons l'approche processus analytique, Armacost *et al.* (1994), dont le taux du niveau d'importance est donné sur une échelle de 1 à 9 : 9 étant donnée comme un niveau extrêmement important, 7 comme fortement important, 5 comme très important, 3 comme important, et 1 comme pas important. Les valeurs 2, 4, 6, et 8 sont affectés à un niveau d'importance entre les deux.

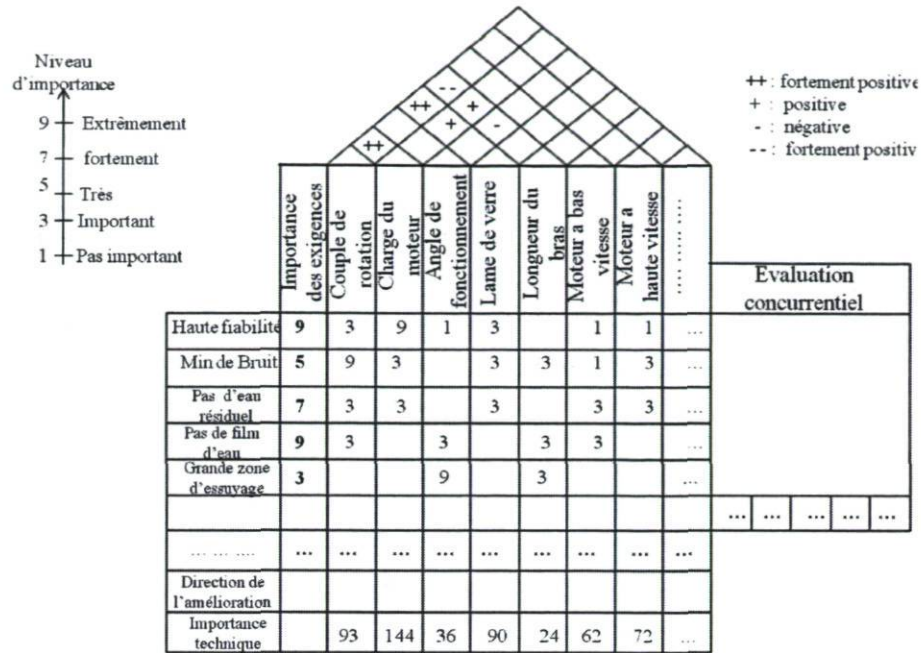


FIGURE 6.3 – Maison de qualité d'un essuie-glace de pare-brise.

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

- On évalue le rendement concurrentiel pour les principaux produits concurrents et du produit avant génération. L'objectif de cette évaluation est d'évaluer le poids et les faiblesses du produit en cours de conception, et d'identifier les domaines à améliorer. Suite à un manque de données, cette étape ne sera pas effectuée dans cet exemple.
- On établit une liste de caractéristiques techniques qui touchent au moins une ou plusieurs exigences de l'axe client. Ces caractéristiques doivent être mesurables et contrôlables, et elles doivent définir techniquement la performance du produit en cours de sa conception. Elles seront déployées d'une manière sélective dans la prochaine phase du processus. Dans cette étape, l'analyse et l'évaluation de l'historique des bases de données existantes sont d'une grande utilité afin d'identifier les principales caractéristiques techniques qui influencent la fiabilité, et qui peuvent ne pas être évidentes. Dans le système d'essuie-glace les caractéristiques techniques qui ont été identifiées, sont répertoriées dans la figure 6.3.
- On identifie les inter-relations entre les exigences du client et les caractéristiques techniques. Le poids de chaque relation peut-être classé en trois niveaux où la



note de neuf est attribuée à une relation forte, 3 à une relation moyenne, et 1 à faible rapport. Chaque caractéristique technique doit être étroitement liée à au moins une exigence, et chaque exigence doit également être liée à une caractéristique technique. Cela garantit que toutes les exigences du client soient prises en compte dans la planification du produit. Le poids de chaque relation par rapport au système d'essuie-glace sont entrés dans la matrice de la maison qualité. On peut ainsi observer que la charge du moteur est une des caractéristiques techniques qui affecte fortement la fiabilité du système.

6. On développe les corrélations entre les caractéristiques techniques et on les indique dans le toit de la maison de qualité. Les caractéristiques techniques peuvent avoir une corrélation positive, ce qui signifie que le changement d'une caractéristique technique dans une direction affecte une autre caractéristique dans la même direction. Une corrélation négative signifie le contraire. Quatre niveaux de corrélation sont utilisés : une corrélation fortement positive, représentée graphiquement par (++) ; positive (+) ; négative (-) et fortement négative par (--). Habituellement, les corrélations ajoutent de la complexité dans la conception des produits, et donnent lieu à des décisions de compromis dans le choix des objectifs techniques si les corrélations sont négatives. Les corrélations entre les caractéristiques techniques du système d'essuie-glace apparaissent dans le toit de la maison de qualité, comme le montre la figure 6.3.

7. On calcule l'évaluation de l'importance technique. Pour chaque caractéristique technique donnée, les valeurs de l'indice opportuniste client sont multipliées par le poids correspondant de la matrice. Le degré d'importance de la caractéristique technique est la somme de ces produits.

Les cotes d'importance permettent d'identifier les caractéristiques techniques à privilégier et donc, d'indiquer les caractéristiques importantes qui devraient être sélectionnées pour la poursuite du développement. Dans l'exemple du système d'essuie-glace, le degré d'importance de la charge du moteur est de  $9 \times 9 + 5 \times 3 + 7 \times 3 + 9 \times 3 = 144$ . L'évaluation des caractéristiques techniques sont énumérées dans la rangée "importance technique", illustrée à la figure 6.3. Les évaluations indiquent que la charge du moteur est une caractéristique importante et devrait être déployée avec plus d'importance dans le processus de conception.



## 6.2 Phase conceptuelle.

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

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

- Défaillance fonctionnelle, où les fonctions choisies ne répondent pas aux fins du produit. Elle se produit lorsque la spécification fonctionnelle ou les exigences élaborées ne portent pas sur l'ensemble du problème.
- Défaillance comportementale où le comportement réalisé ne remplit pas la fonction de production associée.

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

L'analyse qualitative des événements préliminaires des défaillances, l'AMDEC, et l'arbre de défaillance peuvent être utilisés, en s'appuyant sur la décomposition de la fonction principale du concept choisi en sous fonctions secondaires à l'aide de bloc-diagramme fonctionnel, afin d'examiner tous les modes de défaillance susceptible à ce stade de développement, pour en déduire les répercussions sur le système (figure 6.4). Ce qui nous permet d'effectuer une prévalidation du concept choisi avant de passer à la phase qui suit.

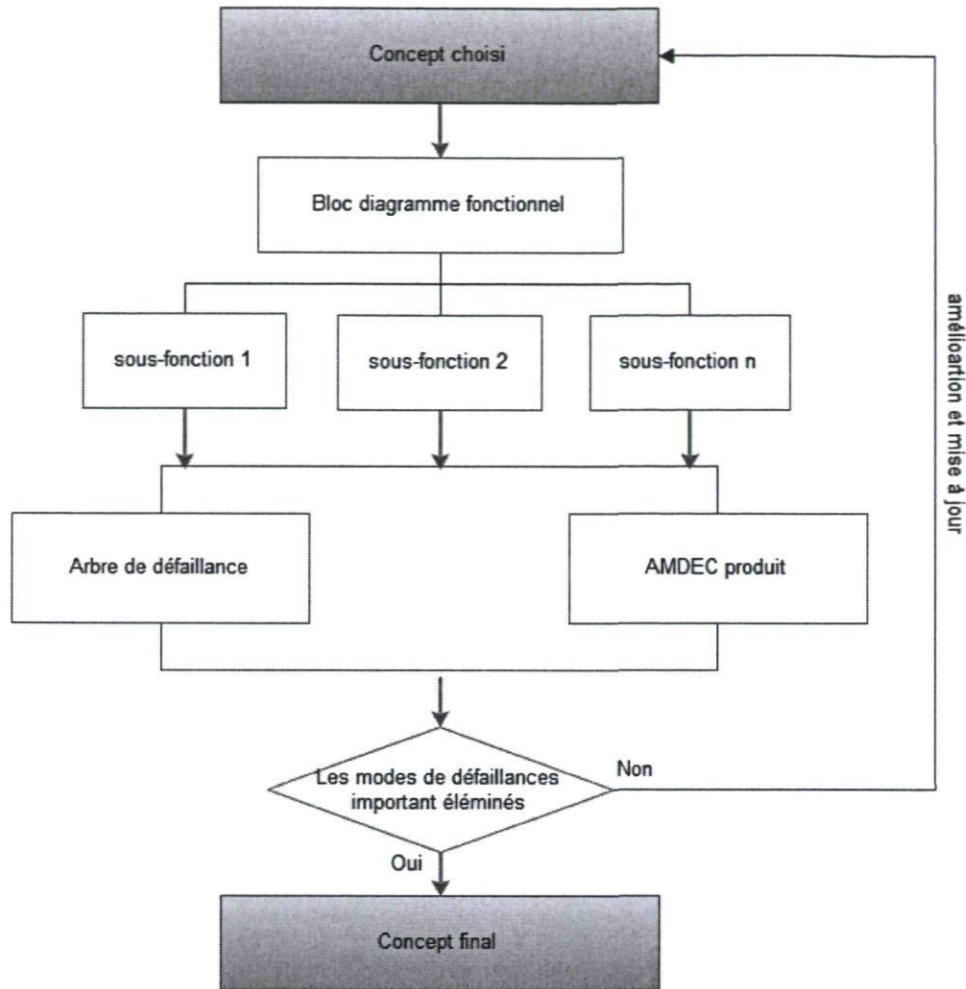


FIGURE 6.4 – Prévalidation du concept dans la phase conceptuelle.

L'effort de la conception relatif au temps et aux connaissances requises par le concepteur sera moins important pour assurer la fiabilité au cours des étapes de la conception architecturale et la conception détaillée, si le concept final élaboré à la phase conceptuelle est fiable. Cela se traduira par un produit plus fiable et moins coûteux, Lindahl (1999).

#### Exemple illustratif :

Afin d'illustrer la procédure développée dans cette phase du processus de conception, on propose d'étudier un système de soupape d'un réservoir de gaz, Pahl *et al.* (2007). À ce stade de développement du processus de conception, on suppose que le concept choisit pour le système de soupape est celui de la figure 6.5.

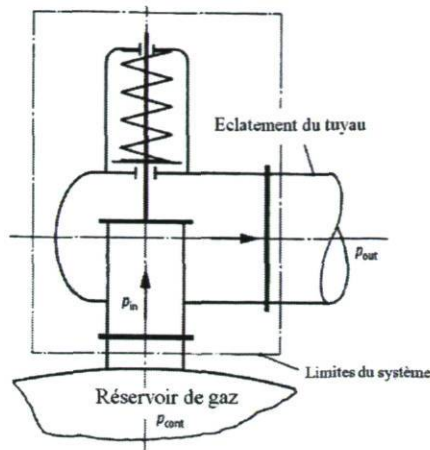


FIGURE 6.5 – Soupape d'un réservoir de gaz.

À partir de la liste des exigences et de la structure de fonctionnement, il est possible de spécifier les conditions de l'exploitation du système de soupape (figure 6.6) .

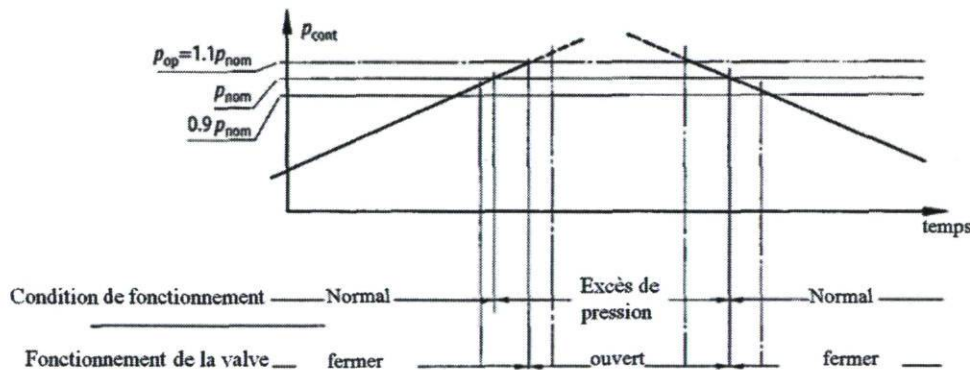


FIGURE 6.6 – Conditions de fonctionnement et les fonctions, sous-fonctions de la valve

La vanne d'évacuation est destinée à s'ouvrir lorsque la pression d'exploitation dépasse 1,1 fois la pression nominale de fonctionnement, et de se fermer à nouveau lorsque le réservoir est sous pression nominale. Les principales fonctions sont donc "la vanne est ouverte" et "la vanne est fermée". La fonction globale peut également être décrite comme "limite de la pression".

Supposons maintenant une éventuelle défaillance de la fonction globale, à savoir "la soupape ne limite pas la pression". À partir de la figure 6.6, on peut identifier les sous-fonctions secondaires où leurs défaillances mènent à la défaillance globale du système. Chacune de ces défaillances à une relation (OU) avec la fonction globale (figure 6.7).



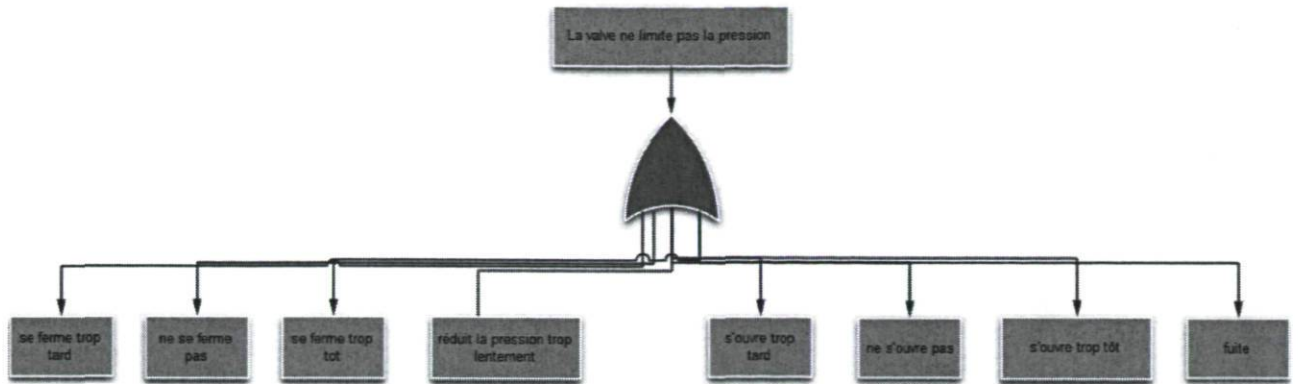


FIGURE 6.7 – Construction de l'arbre de défaillance basé sur les défaillances identifiées à partir de la figure 6.6.

Chaque défaillance ainsi identifiée est ensuite étudiée en fonction de ses causes possibles. La défaillance, que nous allons étudier plus en détail est " la valve ne s'ouvre pas ". Une cause identifiée peut être associée à d'autres causes avec lesquelles elle a une relation (OU) , (ET). Et celles-ci peuvent être examinées en conséquence.

La figure 6.8 montre une sélection d'autres causes de dysfonctionnement et certains remèdes identifiés à ce stade. Souvent, elle ne peuvent pas être clarifiées de manière plus détaillée jusqu'à la phase architecturale ou la phase détaillée.

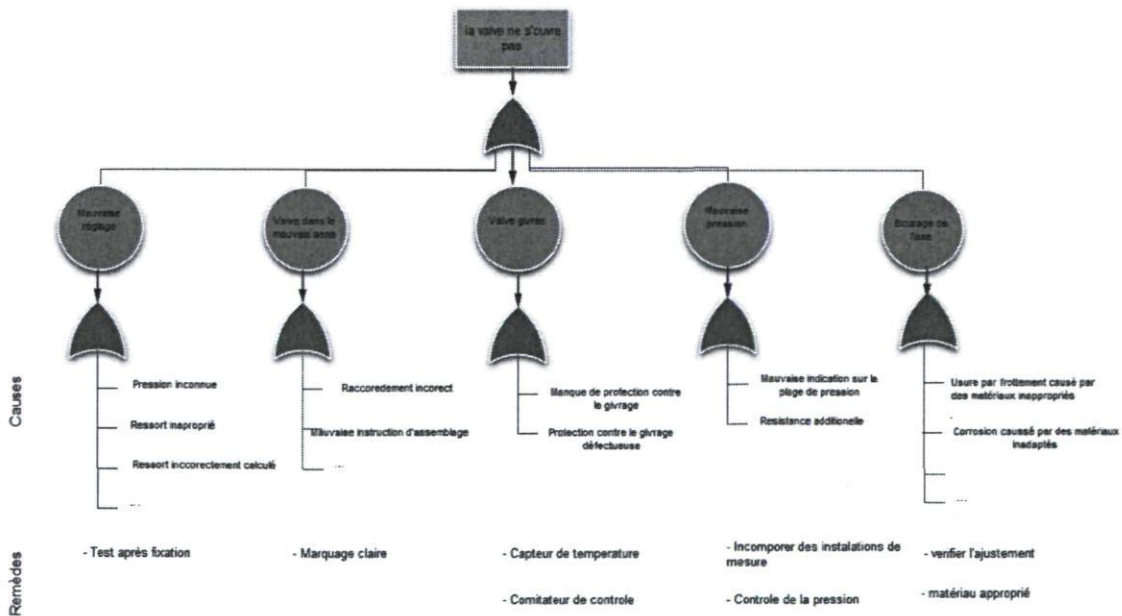


FIGURE 6.8 – Causes de dysfonctionnement "valve ne s'ouvre pas" et quelques remèdes.

Le regroupement des mesures correctives selon les services concernés, simplifie leur exécution. Sur la base des informations obtenues à partir d'une analyse par arbre de défaillance, le concepteur est en mesure d'améliorer et de compléter la liste des exigences avant de procéder à la phase architecturale.

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

### 6.3 Phase architecturale.

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

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

- Méthode d'évaluation statique où la fiabilité des systèmes est évaluée sans tenir compte du facteur temps. Plus précisément, la fiabilité des composants du système est supposée constante.
- Méthode d'évaluation dynamique où les éléments de la fiabilité varient en fonction du temps.

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

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

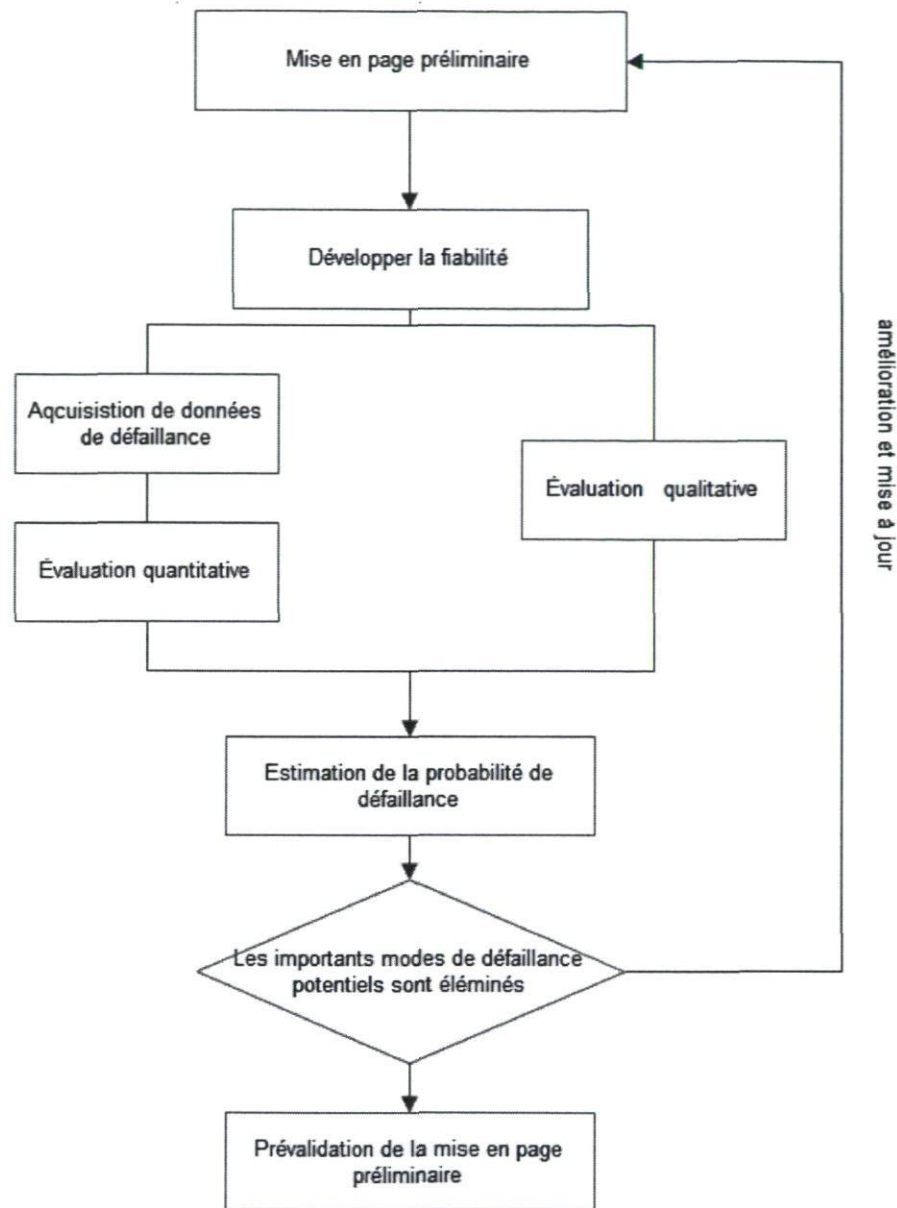


FIGURE 6.9 – Prévalidation dans la phase architecturale.

entre les différentes causes de défaillances, pour ensuite estimer la probabilité de défaillance du système, (figure 6.9).

Ces approches permettent de prendre en compte la dimension du système et la logique des éléments de défaillance basée soit sur la formulation statique, dynamique ou sur l'évaluation qualitative. Donc, ils nous permettent de valider la configuration du système, et qui nous donnent une estimation de la fiabilité, tels que la probabilité de défaillance, l'importance des composants, les composants critiques sur lequel en doit



effectuer des modifications afin d'améliorer la fiabilité du système...

Cependant, leur haut niveau d'abstraction est insuffisant pour relier la fiabilité aux variables de conception les plus influentes (par exemple les propriétés des matériaux, des sollicitations, de la géométrie...), Hähnel *et al.* (2007).

### Exemple illustratif :

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

Le système utilisé dans cet exemple, est un système de transmission (réducteur de vitesse) figure 6.10, Pahl *et al.* (2007). La puissance de transmission se fait par le plus grand engrenage de l'arbre de transmission, et outre que les roulements des arbres, le système se compose d'un carter avec un capot et couvre différents petits roulements, qui sont scellés par des joints d'étanchéité radials.

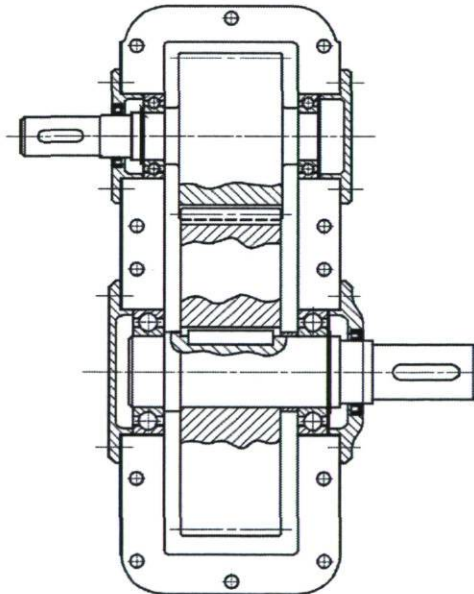


FIGURE 6.10 – Mise en page préliminaire d'un réducteur de vitesse.

Pour déterminer la fiabilité du système, il est utile de se référer à l'organigramme représenté à la figure 6.9. L'objectif principal de l'analyse, est de déterminer les composants qui sont pertinents pour la fiabilité et de mettre en place une structure de la fiabilité du système.

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

On identifie tous les composants du système afin d'étudier un aperçu du système (les composants et/ou des interfaces du composant peuvent être considérés comme des composants). Certains de ces composants peuvent devenir défaillants pour plusieurs raisons. Un engrenage, par exemple, peut perdre sa fonctionnalité si une des dents s'use.

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

On modélise le système sous forme d'un schéma bloc. Ceci sous-entend qu'une analyse topologique préalable du système doit être réalisée. D'après le schéma bloc fonctionnel, on peut constater que la défaillance d'un composant entraîne la défaillance du système, donc la structure du système est une structure en série (figure 6.11).

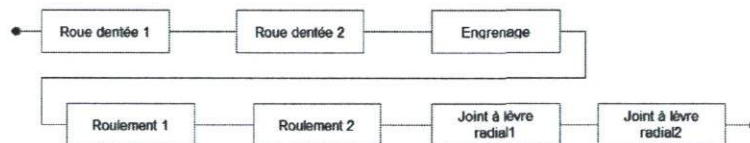


FIGURE 6.11 – Modélisation du réducteur en schéma bloc.

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

$$R_{\text{système}} = R_{\text{Roue1}} \cdot R_{\text{Roue2}} \cdot R_{\text{Eng}} \cdot R_{\text{Roul1}} \cdot R_{\text{Roul2}} \cdot R_{\text{Joint1}} \cdot R_{\text{Joint2}} \quad (6.1)$$

L'équation du système (6.1) décrit les éléments pertinents à la fiabilité du système et de leurs dépendances fonctionnelles. Par conséquent, elle représente le résultat réel de l'analyse du système.

Après l'analyse du système, il est nécessaire de déterminer le comportement des composants ou leurs fiabilité. Bertshe et Lechner (1999) propose de leur associer comme loi de défaillance la distribution de Weibull dont les paramètres figurent dans le tableau 6.1.

Composant		Mode de défaillance	h	b
1	Roue dentée 1	Rupture de la roue dentée 1	38.000	1,4
2	Roue dentée 2	Rupture de la roue dentée 2	70.500	1,8
3	Engrenage	Pitting de l'engrenage	1.966.600	1,3
4	Roulement 1	Défaillance du roulement 1	9.100.000	1,11
5	Roulement 2	Défaillance du roulement 2	15.200.000	1,11
6	Joint à lèvres radial 1	Défaillance du joint à lèvres radial 1	66.000.000	1,0
7	Joint à lèvres radial 2	Défaillance du joint à lèvres radial 2	6.000.000	1,0

TABLE 6.1 – Paramètres de la loi de défaillance des éléments du réducteur (distribution de Weibull)

Le calcul de la fiabilité du système est la dernière étape. Les fiabilités assignées à chaque élément, sont insérées dans le système d'équation (6.1) : Les résultats obtenus sont représentés sur un seul graphique.

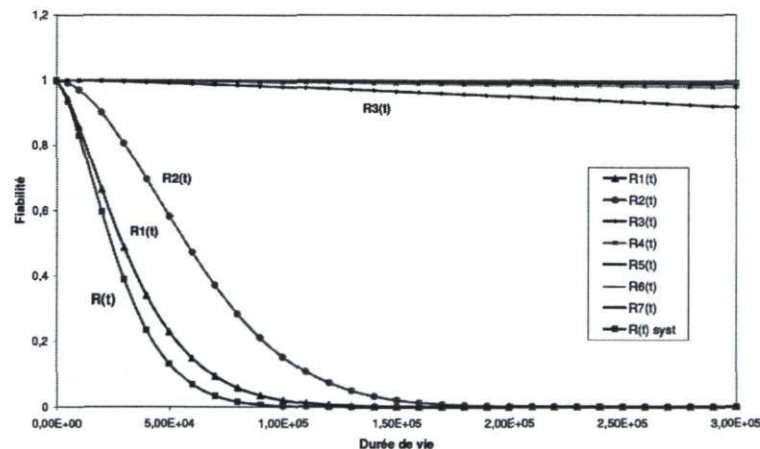


FIGURE 6.12 – Présentation graphique de la fiabilité du système et de ses composants, Tebbi (2005)

On remarque que les courbes de la fonction de fiabilité des composants 1 et 2 sont prépondérantes. Il en résulte que la fiabilité du système de transmission dépend de la fiabilité des deux roues dentées.

la dernière étape est l'analyse des résultats. Si la fiabilité du système est jugée correcte, par rapport aux listes des exigences définies dans la phase de planification



et de clarification, la mise en page du système est acceptée. Sinon, des modifications sont nécessaires, plus précisément sur les deux premiers composants afin d'améliorer la fiabilité du système à ce stade de développement.

## 6.4 Phase détaillée.

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

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

Cependant, les approches probabilistes de la fiabilité, basées sur la simulation numérique, peuvent être exploitées pour concevoir des composants mécaniques dans un contexte incertain, et donc déterminer la probabilité de défaillance du système. Ces méthodes utilisent les variables de conception, sous forme de distributions de probabilité, pour reproduire la variabilité des systèmes réels, contrairement à celles parfaites et déterministes qui sont utilisées en conception traditionnelle.

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

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

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

(l'AMEC, l'AdD).

- L'analyse mécanique (analyse comportementale) : cette analyse consiste à définir un choix du modèle mécanique, en associant à chaque mode de défaillance (fatigue, mécanique de la rupture, . . . ) un modèle mécanique qui traduit le comportement du candidat pour l'évaluation de la fiabilité (sélectionné auparavant) à divers scénarios de défaillances, en fonction des variables de conception. À cette étape, on fait appel aux calculs par éléments finis, afin de construire le modèle mécanique (dans le cas où ne disposons pas de formules analytiques exactes et simples pour construire ce modèle). Ensuite, on effectue une formulation de la fonction d'état limite qui caractérise le comportement de la résistance par rapport à la sollicitation.
- L'évaluation de la variabilité des paramètres de dimensionnement : les variables de conception sont généralement de nature aléatoire. Dans cette étape l'approche probabiliste, pilote les variables de conception du code des méthodes des éléments finis (MEF), selon la loi statistique (densité de probabilité, fonction de répartition), qui tiennent compte de leurs dispersions et de la variabilité mécanique, afin de modéliser le contexte incertain du modèle mécanique et assurer une conception fiable.
- Le calcul de la probabilité de défaillance à l'aide des méthodes par approximation FORM/SORM , ou les méthodes par simulation de Monte-Carlo.
- L'étude de sensibilité des variables géométriques : cette étape consiste à identifier le poids de chaque variable sur le calcul de probabilité de défaillance et examiner celles les plus influentes sur la défaillance et la durée de vie du produit.
- L'analyse des résultats : les résultats obtenus permettent, soit la prévalidation du système s'il répond aux exigences établies par le client, soit d'effectuer des modifications au niveau des éléments critiques afin d'améliorer la probabilité de défaillance du système, et tendre vers une solution acceptable à ce stade de développement.

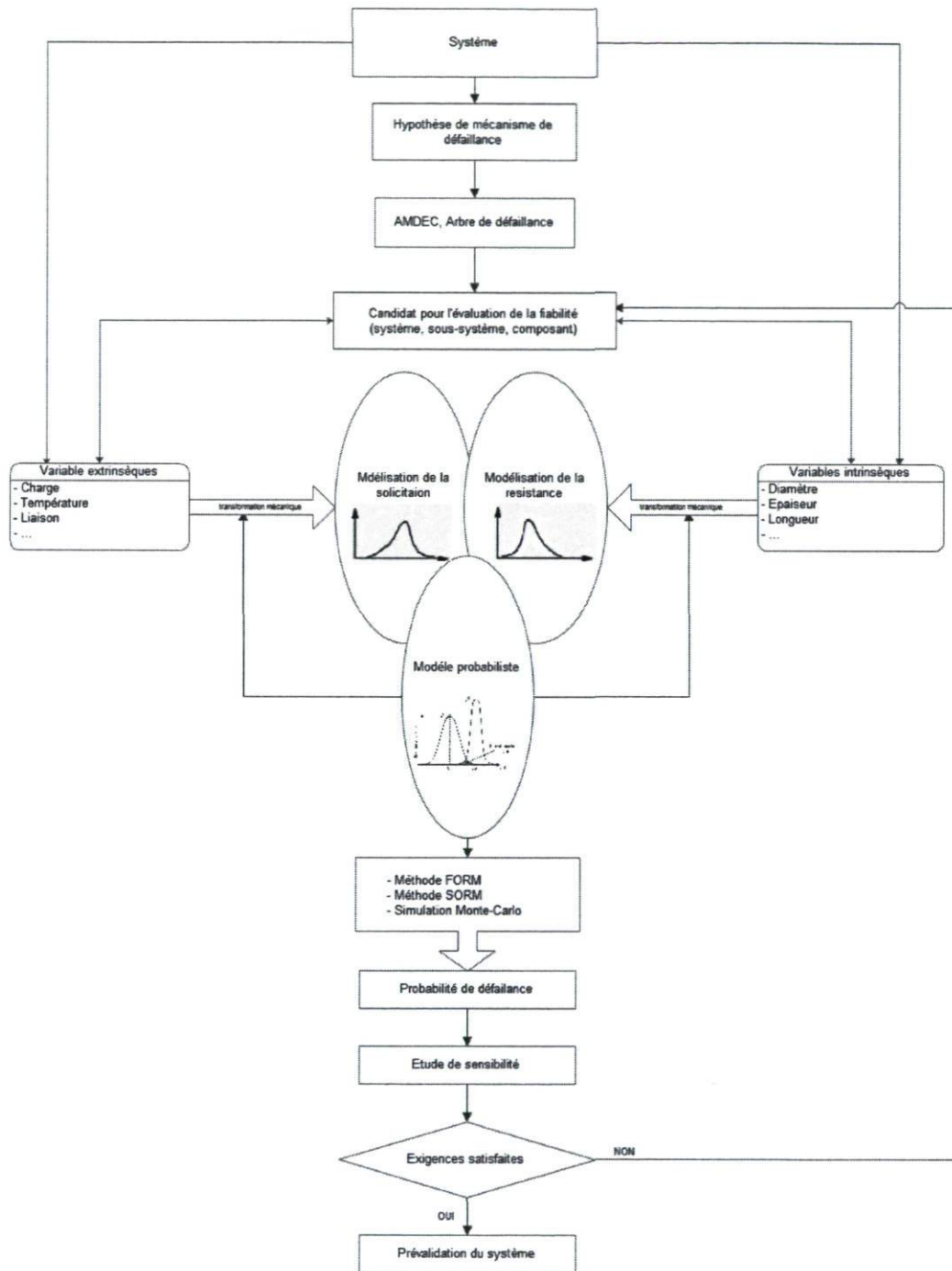


FIGURE 6.13 – Prévalidation dans la phase détaillée.



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

Afin de bien comprendre les principales étapes développées à cette phase de conception, à savoir, l'analyse probabiliste et son couplage avec les méthodes des éléments finis, dans le besoin de déterminer la fonction d'état limite du système dans le cas où nous disposons pas de formule analytique; Une étude est réalisée avec des exemples tirés de la littérature sur un code de calcul FERUM (Finite Element Reliability Using Malab) dont la première évolution a commencé en 1999 à l'Université de California à Berkley (UCB) . Ce code est composé d'une boîte à outil open-source MATLAB, avec différentes méthodes d'évaluation de la fiabilité. L'étude est présentée en annexe A sous forme de tutoriel, et cela dans le but de rendre ce code de calcul à la portée du concepteur pour pouvoir effectuer une prévalidation de la conception à ce stade du processus du point de vue de la fiabilité.

# Chapitre 7

## Conclusion

Ce travail nous a permis d'aborder le sujet de la prise en compte de la fiabilité en conception. La problématique de la fiabilité en conception reste toujours très complexe à traiter, cela est dû au manque des données disponibles à ce stade de développement et à l'imprécision des variables et paramètres de conception. Afin d'approcher cette problématique, une méthodologie de prise en compte de la fiabilité a été développée.

Cette méthodologie permet au concepteur d'anticiper la prise en compte de la fiabilité au stade de la conception, chose qui ne se faisait qu'une fois les prototypes réalisés, et nécessitait un temps considérable pour la validation du produit.

La méthodologie développée comporte différentes tâches à mettre en œuvre dans le processus de conception, à l'aide des procédures à exécuter dans chaque phase. Ces procédures peuvent être considérées comme des procédures conceptuelles qui ouvrent la voie à la recherche dans le domaine de la fiabilité en conception en vue de :

- Assurer la fiabilité des produits tout au long du processus de conception.
- Améliorer les décisions de conception de point de vue fiabilité.
- Permettre la prévalidation dès les premières phases du processus de conception.

### **Perspectives :**

Au terme des travaux de ce mémoire, plusieurs perspectives se dessinent. Les principales extensions envisagées sont les suivantes :

- Modélisation mathématique des différentes procédures de pré-validation de la fiabilité.

- Intégration de l'approche Bayésienne (probabilité conditionnelle) afin d'estimer la fiabilité à chaque phase du processus de conception.
- Intégration de la méthodologie de validation de la fiabilité à des logiciels de la Conception Assistée par Ordinateur.
- Validation du modèle sur un cas industriel.



# Bibliographie

- AIT-KADI, D. (2002). *Fiabilité des systèmes*. Notes de cours / Université Laval, département de génie / mécanique Québec.
- AKAO, Y. et MAZUR, G. (2003). The leading edge in qfd past, present and future. *International Journal of Quality and Reliability Management.*, 20(1):20 – 35.
- ARMACOST, R., COMONAN, P. et SWART, W. (1994). An ahp framework for prioritizing customer requirement in qfd, an industrialized housing application. *IIE Transaction*, volume 26(N 4):pages 72–78.
- BERTSCHE, B. (2008). *Reliability in Automotive and Mechanical Engineering*. Springer, Berlin, ENGLAND.
- BERTSCHE, B. et LECHNER, G. (1999). *Zuverlässigkeit im Maschinenbau*. Springer, Germany.
- BOCQUET, J. et DUFFAU, B. (1997). La gestion du changement : de la gestion de production à la gestion de conception. *Dans L'art du management*, pages 626–631.
- BOUZAIENE, L. (2005). *Anticipation du Vieillissement par Interrogation et Stimulation d'Experts. Application à un matériel passif d'une centrale nucléaire*. Thèse de doctorat, École Centrale de Paris, Paris, FRANCE.
- COHEN, L. (1995). *Quality Function Deployment, how to make QFD work for You*. Engineering Process Improvement Series. Addison Wesley.
- CORAZZA, M. (1975). *Technique mathématiques de la fiabilité prévisionnelle des systèmes*. Cepad, Toulouse , FRANCE.
- CROSS, N. (2002). *Engineering Design Methods, strategies for product design*. John Wiley, England, 4th édition.
- DEHEEGER, F. (2008). *Couplage mécano-fiabiliste : méthodologie d'apprentissage stochastique en fiabilité*. Thèse de doctorat, Université Clermont II, Clermont, FRANCE.

- DHILLON, B. (2005). *Reliability, Quality, and Safety for Engineering*. CRC Press LLC. CRC Press, USA.
- GAKWAYA, A. (2010). *Modélisation et analyse en CAO*. Université LAVAL, Département de génie mécanique, Québec, CANADA, automne 2010 édition.
- HALDAR, A. et MAHADEVAN, S. (2000). *Probability, Reliability and Statistical Methods in Engineering Design*. John Wiley et Sons, New York, USA.
- HALES, C. et GOOCH, S. (2004). *Managing Engineering Design*. Springer, London, second édition.
- HALES, C. et PATTIN, C. (2002). *Design Review for Failure Analysis and Prevention*. ASM Handbook.
- HÄHNEL, A., LEMAIRE, M., RIEUNEAU, F. et PETIT, F. (2007). Machines and mechanisms design for reliability. 12th IFToMM World Congress.
- HSIAO, S. (2002). Concurrent design method for developing a new product. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 29:41–55.
- JO, H., PARSAEI, R. et SULLIVAN, G. (1993). *Principles of concurrent engineering*. Chapman and Hall, London.
- LEVIN, A. et KALAL, T. (2003). *Improving Product Reliability strategies and implementation*. John Wiley, England.
- LEWIS, E. (1994). *Introduction to Reliability Engineering*. John Wiley, Illinois, second édition.
- LINDAHL, M. (1999). E-fmea-a new promising tool for efficient design for environment. *Dans Proceedings First International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*, pages 734 – 9, Los Alamitos, CA, USA.
- MCLEAN, H. (2000). Halt, hass hasa explained : Accelerated reliability techniques. *ASQ Quality press*.
- MENYE, J. (2009). *Validation de la maintenabilité et de la disponibilité en conception d'un système multicomposants*. Thèse de doctorat, Département de génie mécanique, université Laval, Québec, CANADA.
- MIKCHEVITCH, A. (2004). *Méthodologie de simulation d'assemblage ou désassemblage de composants flexibles : Application à la simulation de pièces de type « poutres flexibles » dans un environnement de réalité virtuelle*. Thèse de doctorat, INPG, Grenoble France.



- PAHL, G., BEITZ, W., FELDHUSEN, J. et GROTE, K. (2007). *Engineering design : a systematic approach*. Springer, 3th édition.
- PROCACCIA, H. et MORILHAT, P. (1996). *Fiabilité des structures des installations industrielles*. Eyrolles, FRANCE.
- ROJAS, E. (2008). *Méthodologie d'analyse de fiabilité basée sur des techniques heuristiques d'optimisation et modèles sans maillage : applications aux systèmes Mécaniques*. Thèse de doctorat, INSA, Rouen , FRANCE.
- SALAMONE, T. (1995). *What Every Engineer Should Know about Concurrent Engineering*. M. Dekker, New York.
- SCARAVETTI, D. (2004). *formalisation préalable d'un problème de conception pour l'aide à la décision en conception préliminaire*. Thèse de doctorat, ENSAM, Bordeaux France.
- SMITH, J. et CLARKSON, P. (2005). Design concept modeling to improve reliability. *of engineering design*, 16(5):473–492.
- STAPELBERG, F. (2009). *Handbook of Reliability, Availability, Maintainability and Safety in Engineering Design*. limited. Springer, LONDON, ENGLAND.
- SUH, P. (1990). *The principles of design*. Oxford.
- TEBBI, O. (2005). *Estimation des lois de fiabilité en mécanique par les essais accélérés*. Thèse de doctorat, ISTI Angers, Angers, FRANCE.
- TEBBI, O., GUERIN, F. et DUMON, B. (2003). Statistical analysis of accelerated experiments in mechanics using a mechanical accelerated life model. *Dans Annual Reliability and Maintainability Symposium*, pages 124 – 31, Piscataway, NJ, USA.
- TICHKIEWITC, S. (2011). Method and tools for the effective knowledge management in product life cycle. *Dans Global Product Development*, pages 19–26, Nantes France. CIRP Design conférence.
- YANG, G. (2007). *life cycle reliability engineering*. Wiley , Sons HOBOKEN, NEW JERSEY, USA.
- ZWINGMANN, X. (2005). *Modèle d'évaluation de la fiabilité et de la maintenabilité au stade de la conception*. Thèse de doctorat, Département de génie mécanique, université Laval, Québec, CANADA.



# Annexe A

## Présentation et initiation du code FERUM.

### A.1 Analyse de la fiabilité d'une poutre sur des appuis simples.

Dans cet exemple, on procèdera à l'analyse de fiabilité d'une poutre métallique en statique, pour laquelle on dispose d'une fonction d'état exprimée analytiquement en fonction d'un ensemble de variables déterministes et aléatoires.

On considère une poutre, sur des appuis simples en acier A36, soumise à un moment de flexion déterministe  $M = 4,45KN$ , comme illustré sur la figure A.1 :

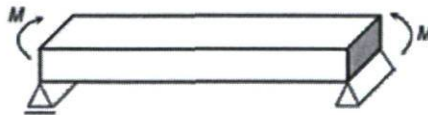


FIGURE A.1 – poutre sur des appuis simples.

En admettant que la contrainte nominale  $\sigma_{nom} = 248MPa$ , et que le module résistant nominale des sections droites soit  $Z = 54mm^3$ . On propose de déterminer le point de conception (l'indice de fiabilité)  $\beta$ , admettant  $Z$  et  $\sigma_{nom}$  des variables aléatoires avec des fonctions de densité connues, afin de déterminer la probabilité de défaillance.

En supposant que la fonction de performance peut être de la forme représentée par

variable	Fonction de densité	moyenne	Écart type
M (deterministe)	-	4,45 KN.m	-
$\sigma_{nom}$	Log-normal	$\mu_{\sigma_{nom}} = 248 \text{ MPa}$	$\delta_{\sigma_{nom}} = 26$
Z	normal	$\mu_Z = 54 \text{ mm}^3$	$\delta_Z = 5.4$

l'équation de l'approche contrainte résistance, nous pouvons écrire l'équation suivante :

$$G = (\sigma_{nom} \cdot Z) - M$$

On utilise la méthode d'approximation FORM disponible dans le code de calcul FERUM, afin de calculer la probabilité de défaillance. Pour cela on va procéder de la manière suivante pour la création du fichier input :

Étape 1 : On commence par définir les variables de conception (aléatoire et déterministe) et le point de départ à l'origine dans l'espace normal standard décorrélé (startpoint).

Dans notre cas, on a deux variables aléatoires et une variable déterministe (le choix du mode de défaillance permet l'identification des facteurs qui influencent la fiabilité).

```

k>>> EIGENIA_SINGHA <<<<
probdata.name = ('R1',
                'R2',
                'R3');
% Horizontal distributions for each random variable
% probdata.marg = [ (type) (mean) (std) (startpoint) (p1) (p2) (p3) (input_type) ]
probdata.marg = [ 1 248 26 248 nan nan nan nan 0 ;
                 2 54 5.4 54 nan nan nan nan 0 ;
                 0 4.5e3 0 4.5e3 nan nan nan nan 0 ];

```

Pour le type de la fonction de densité de chaque variable, le codage disponible sur le code de calcul est le suivant :

```

type: -1 = Parameter in reliability analysis (thetag)
       0 = Deterministic parameter (cg)

       1 = Normal distribution
       2 = Lognormal distribution
       3 = Gamma distribution
       4 = Shifted exponential distribution
       5 = Shifted Rayleigh distribution
       6 = Uniform distribution
       7 = Beta distribution
       8 = Chi-square distribution

      11 = Type I largest value distribution ( same as Gumbel
distribution )
      12 = Type I smallest value distribution
      13 = Type II largest value distribution
      14 = Type III smallest value distribution
      15 = Gumbel distribution ( same as type I largest value
distribution )
      16 = Weibull distribution ( same as Type III smallest value
distribution with epsilon = 0 )

      18 (Reserved for Laplace distribution)
      19 (Reserved for Pareto distribution)

      51 = Truncated normal marginal distribution

```

Étape 2 : Définition de la matrice de corrélation, si il y a lieu.

La matrice de corrélation indique le coefficient de corrélation entre chacune des variables  $x_i$ . Cette matrice est symétrique et sa diagonale est composée de 1, sa dimension égale à (probdata.marg, 1). Les lignes / colonnes correspondant aux paramètres dans l'analyse de la fiabilité (thetag) ou des paramètres déterministes (cg).

Pour notre exemple, nos variables ne sont pas corrélées, donc la matrice de corrélation s'écrit comme suivant :

```
probdata.correlation = [ 1.0 0.0 0.0 ;
                        0.0 1.0 0.0 ;
                        0.0 0.0 1.0 ];
```

Étape 3 : Définition des options d'analyse ( nombre d'itération, convergence).

```
analysisopt.i_max      = 100;      % analyse option, nombre max
                                d'itération.
analysisopt.e1         = 0.001;    % Tolérance sur la proximité de
                                point de conception et à la
                                surface limite de l'état.
analysisopt.e2         = 0.001;    % Tolérance sur la précision du
                                gradient vers l'origine.
analysisopt.step_code  = 0;        % 0: taille de l'étape.
analysisopt.Recorded_u = 1;        % à chaque itération le
                                vecteur_u.0: enregistré, 1: non-
                                enregistré.
analysisopt.Recorded_x = 1;        % à chaque itération le
                                vecteur_x. 0: enregistré, 1: non-
                                enregistré.
```

Étape 4 : Définition de la fonction d'état limite.

Pour notre exemple, la fonction d'état limité s'écrit :

```
gfundata(1).expression = ' (X1.*X2) - X3';
```

Étape 5 : Exécution de l'analyse.

Une fois le fichier input est créé, on exécute ferum.m et on obtient les propositions suivantes, qui nous permettent de choisir le type d'analyse à effectuer.



```

| Welcome to FERUM Version 4.0 (Finite Element Reliability Using Matlab) |
| For more information, visit: http://www.ifma.fr/ferum/ |
| Note: All the analysis options below assumes that necessary data |
| are available in the current Matlab workspace. |
|-----|
0: Exit
1: Help
10: FORM Analysis
11: FORM Analysis - Multiple design point
12: SORM Analysis - Curvature Fitting method with computation of the Hessian
13: SORM Analysis - Point Fitting method
20: Distribution analysis
21: Importance Sampling / Monte Carlo Simulation Analysis
22: Directional Simulation Analysis
23: Subset Simulation Analysis
33: 2SMART Analysis
40: RBDO - Smooth Nested Bi-Level Approach (using the gradient of Pf v.r.t. thetag)
50: Sobol' Global Sensitivity Analysis

CHOOSE OPTION FROM THE LIST ABOVE: |

```

Pour notre cas on va choisir 10 : FORM analysis. On obtient le résultat suivant qui résume toutes les itérations effectuées ainsi que la probabilité de défaillance qui est  $Pf1 = 3.4480E - 08$ .

Field ▲	Value	Min	Max
iter	7	7	7
beta	5.3939	5.3939	5.3939
pf1	3.4480e-08	3.4480...	3.4480...
dsptu	[-5.0479;-1.9006]	-5.0479	-1.9006
G	-1.6211e-05	-1.621...	-1.621...
grad_G	[1.1371e+03;428.0995]	428.09...	1.1371...
alpha	[-0.9359;-0.3523]	-0.9359	-0.3523
dsptx	[116.7542;38.5425]	38.5425	116.75...
imptg	[-0.9126;-0.4088]	-0.9126	-0.4088
gfcn	[8.8920e+03;1.8858e+...	-5.2394	8.8920...
stpsz	[1,1,1,1,1]	1	1
e1	[1,0.2121,0.0102,5.892...	1.8230...	1
e2	[0.0427,0.5922,0.4698,...	1.3305...	0.5922
Recorded_u	<2x7 double>	-5.0479	0.0523
Recorded_x	<2x7 double>	37.0620	248
dbeta_dthetaf	<2x6 double>	-12.36...	3.7036
dbeta_dthetaf_ap...	<2x6 double>	-12.33...	3.7036
dbeta_dthetaf_ratio	<2x6 double>	0	0.0020
dpf_dthetaf	<2x6 double>	-7.110...	2.3732...
dbeta_drho	[0,-1.6476;-1.6476,0]	-1.6476	0
dpf_drho	[0,3.1633e-07;3.1633e...	0	3.1633...
delta	[0.8248;0.4967]	0.4967	0.8248
eta	[-4.1633;-1.2635]	-4.1633	-1.2635
nfun	57	57	57

On remarque que pour obtenir un résultat qui converge, le programme à effectuer 7 itérations. Ainsi, dans le fichier output on peut trouver différentes informations qui peuvent nous aider à améliorer notre structure par une étude de robustesse et de sensibilité.

## A.2 Analyse de fiabilité d'un système (structure) basée sur le couplage mécano-fiabiliste.

Avec cette application, on effectue une analyse de fiabilité d'un système au cas où la fonction d'état limite n'est pas explicite, et on utilise des modèles aux éléments finis pour l'évaluer. Ainsi, on va mettre en pratique le code de calcul des méthodes d'éléments finis disponible dans le logiciel FERUM 3.0.

On considère un problème constitué d'un système "treillis simple" (figure A.2) encastré à l'extrémité gauche, et monté sur des rouleaux à l'extrémité droite. Les membres peuvent tourner librement au niveau des articulations. Le cadre est empêché de se déplacer en dehors du plan.

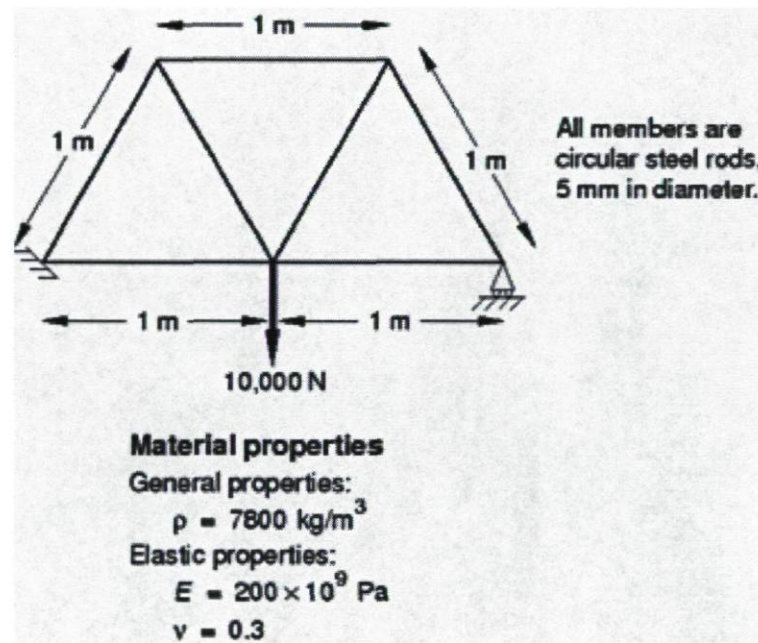


FIGURE A.2 – "Système treillis "

Définition du modèle physique :

Les barres du système sont identiques, elles travaillent en traction compression du même module d'Young  $E$ , même diamètre. Les longueurs sont telles qu'indiqué sur la figure.

Définition du modèle probabiliste :

Les caractéristiques des variables aléatoires sont déterministes, et ils sont définies dans le tableau suivant :

variable	Fonction de densité	moyenne	Écart type	Coefficient de variation
b (detrministe)	-	200 mm	-	-
E	Normal	200.e3 MPa	10000 MPa	0.05
L	-	700 mm	-	-

Définition de la fonction d'état-limite :

La fonction d'état-limite est définie par un déplacement dépassant un seuil donné, et que ce déplacement est évalué par la méthode des éléments finis (ici on fixe un seuil de 10mm).

On procède comme suit :

Étape 1 : On définit le nombre de liberté par nœud.

Dans le problème étudié les barres travaillent en traction compression, donc on a 2 degrés de liberté par nœud.

Étape 2 : Définition des nœuds.

```
femodel.node(1,:) = [ (x-coord) (y-coord) ];
femodel.node(2,:) = [ (x-coord) (y-coord) ];
...
```

Étape 3 : définition des éléments.

```
femodel.el(1,:)=[(type) (node1) (node2) (node3)..(parameter1) (parameter2).];
femodel.el(2,:)=[(type) (node1) (node2) (node3)..(parameter1) (parameter2).];
...
```

Les types d'éléments disponibles dans le code FERUM.

Elastic truss : (1) (node1) (node2) (Elastic Modulus) (Area)

Elastic beam : (2) (node1) (node2) (E) (I) (A)

Elastic quad4 : (3) (node1) (node2) (node3) (node4) (E) (nu) (t) (PS)

J2 plastic truss : (4) (node1) (node2) (E) (A) (nu) (sy) (Hi) (Hk)



Étape 4 : définition de la charge appliquée.

```
femodel.loading(1,:) = [(nodenumber) (magnitude) (direction) (factor)];
femodel.loading(2,:) = [(nodenumber) (magnitude) (direction) (factor)];
...
```

La direction est définie comme suivant :

- 1 : pour direction X.
- 2 : pour direction Y.
- 3 : pour le moment dans le sens horaire.

Étape 5 : définition du degré de liberté :

- 0 : si le nœud est fixé;
- 1 : si le nœud est fixe.

```
femodel.fixed_dof(1,:) = [ (node) (0/1) .. (0/1) ];
femodel.fixed_dof(2,:) = [ (node) (0/1) .. (0/1) ];
...
```

Étape 6 : Définition des données d'entrées du fichier de couplage pour l'analyse de fiabilité.

- L'utilisateur peut définir les paramètres de la fonction d'état-limite :
  - Sans paramètre dans la fonction d'état-limite :  $gfundata(1) = \text{paramètre} \text{ "non"}$  ;
  - Avec paramètres :  $gfundata(1) = \text{paramètre} \text{ "oui"}$ .
 Ensuite, définir les valeurs des paramètres :  $gfundata(1)thetag = [(par1)(par2)..]$ .
- Définition du type d'évaluateur ou d'analyse de la fonction d'état-limite (Alternatives : " de base ", (Alternative : 'basic', 'FERUMlinearfecode', 'FERUMnonlinearfecode', 'fedeads')
- Définition de la tolérance du déplacement / design limite qui ne devrait pas être déplacé par la quantité de réponse spécifiée.

Le fichier input qui permet d'effectuer l'analyse :

```

clear probdata femodel analysisopt gfundata randomfield systems results
output_filename
output_filename = 'outputfile_treillis_TP4.txt';

random = 0;

for i = 1 : 7
    probdata.marg(i,:) = [ 2 200000      60000      200000  0 0 0 0 0];
end

probdata.correlation = eye(7);
probdata.parameter = distribution_parameter(probdata.marg);

analysisopt.ig_max      = 100;
analysisopt.il_max      = 50;
analysisopt.e1          = 0.001;
analysisopt.e2          = 0.001;
analysisopt.step_code   = 0;
analysisopt.grad_flag   = 'ddm';
analysisopt.sim_point   = 'dspt';
analysisopt.stdv_sim    = 1;
analysisopt.num_sim     = 10000;
analysisopt.target_cov  = 0.025;

femodel.ndf = 2;

femodel.node(1,:) = [ 1500      866 ];
femodel.node(2,:) = [ 500      866 ];
femodel.node(3,:) = [ 0      0 ];
femodel.node(4,:) = [ 1000      0 ];
femodel.node(5,:) = [ 2000      0 ];

femodel.el(1,:) = [ 1 1 2 (random) 1000 ];
femodel.el(2,:) = [ 1 2 3 (random) 1000 ];
femodel.el(3,:) = [ 1 3 4 (random) 1000 ];
femodel.el(4,:) = [ 1 2 4 (random) 1000 ];
femodel.el(5,:) = [ 1 1 5 (random) 1000 ];
femodel.el(6,:) = [ 1 4 5 (random) 1000 ];
femodel.el(7,:) = [ 1 4 1 (random) 1000 ];

femodel.loading(1,:) = [ 4 10000 1 1 ];

femodel.nodal_spring = 0;

femodel.fixed_dof(1,:) = [ 3 1 1 ];
femodel.fixed_dof(2,:) = [ 5 0 1 ];

for i = 1 : 7
    femodel.id(i,:) = [ i 2 i ];
end

gfundata(1).evaluator = 'FERUMlinearfecode';
gfundata(1).type = 'displacementlimit';
gfundata(1).parameter = 'yes';

gfundata(1).resp = [ 5 1 ];
gfundata(1).lim = 10;

randomfield.mesh = 0;

```

Résultat obtenu :

Field ^	Value	Min	Max
iter	4	4	4
beta1	2.2151	2.21..	2.21..
pf1	0.0134	0.01..	0.01..
dsptu	[0;-1.9999e-17;-2...	-2.21..	3.01..
dsptx	[1.9157e+05,1.91...	9.99..	1.91..
alpha	[-9.0056e-32;5.8...	-1	1.38..
imptg	[-9.0056e-32;5.8...	-1	1.38..
gfcn	[0.0500,0.0176,-0...	-0.00..	0.05..
grad_gfunc	<7x4 double>	-4.07..	0.02..
stpsz	[0.5000,1,1]	0.50..	1
beta_sensi_the...	<7x6 double>	-7.54..	3.40..
pf_sensi_thetaf	<7x6 double>	-0.11..	0.25..
beta_sensi_the...	34.0578	34.0..	34.0..
pf_sensi_thetag	-1.1687	-1.16..	-1.16..

la convergence a été obtenue en 4 itérations. La probabilité de défaillance est d'ordre 0.0134 pour un seuil de déplacement du nœud 5 de 10mm.