

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

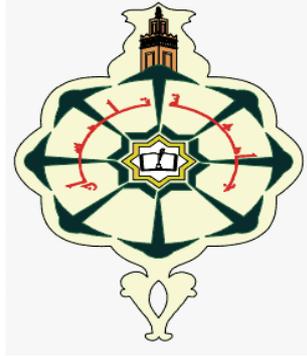
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبو بكر بلقايد تلمسان

Université Aboubekr Belkaid – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



Mémoire de Master

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Construction Mécanique

Présenté par : M. BENAHMED Boumediène Abdelouahab

Thème :

## Intégration de la maintenance en phase de conception d'un équipement de production

Soutenu publiquement, le 22 / 09 / 2020, devant le jury composé de :

M. KARA ALI Djamel

Président

M. GUEZZEN Samir

Examineur

M. MAMI Elias Fouad

Encadreur

M. GHERNAOUT Mohamed El Amine

Co-Encadreur

Année universitaire 2019/2020

# Remerciements

Tout d'abord, je tiens à assurer de ma respectueuse gratitude Monsieur MAMI Elias Fouad qui a bien voulu assurer la direction de mes recherches dans le cadre de ce mémoire. En aucun moment, ses remarques, ses conseils, son attention à la progression de mon travail et sa disponibilité remarquable ne m'ont fait défaut.

Mes vifs remerciements vont à Monsieur GHERNAOUT Mohamed El Amine auquel je me permets d'exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance pour ses précieux conseils et ses orientations qu'il m'a prodigués.

Un grand merci à Messieurs les membres du jury M. KARA ALI Djamel et M. GUEZZEN Samir d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Je remercie l'ensemble des Enseignants du département de Génie Mécanique de la Faculté de Technologie pour leurs enseignements de qualité.

Je remercie également tous ceux qui de près ou de loin ont participé à la concrétisation de ce travail.

# Dédicaces

Je dédie ce travail à :

- mes très chers parents pour leur soutien et leur aide durant toute la période de mes études.
- toute ma famille, mes cousins, mes amis, en particulier au Docteur Rachid, Islam, Fouzi et Abdelhadi.

## Abréviations

AFNOR :	Association Française de Normalisation.
AF :	Analyse Fonctionnelle.
AFAV :	Association Française de l'Analyse de la Valeur.
APR :	Analyse Préliminaire des Risques.
AFDM :	Analyse Fiabilité Disponibilité Maintenabilité.
ADD :	Arbre Des Défaillances.
AMDEC :	Analyse des Modes de Défaillances et de leur Criticité.
ACV :	Analyse du Cycle de Vie.
AV :	Analyse de la Valeur.
A(t) :	Disponibilité en fonction du temps.
ASTM :	American Standard Technology and Materials.
CAO :	Conception Assistée par Ordinateur.
CFAO :	Conception et Fabrication Assistée par Ordinateur.
CCO :	Conception à Coût Objectif.
CEN :	Comité Européen de Normalisation.
CdCF :	Cahier des Charges Fonctionnel.
DE.pro :	Déchets d'Equipements professionnels.
DFM :	Dynamic Flowgraph Methodology.
DD :	Développement Durable.
DTC :	Design To Cost.
DIN :	Deutsch Institute for Normung.
DAO :	Dessin Assisté par Ordinateur.
ETA :	Comité Européen de Standardisation.
ECS :	European Committee of Standardization.
FMEA :	Failure Modes Effect Analysis.
FST :	Fonction analyses System Technique.
FP :	Fonction Principale.
FC :	Fonction Complémentaire.
FA :	Fonction d'Adaptation.

HAZOP : Hazard and Opérability study.

HACCP : Hazard Analyses Critical Control Point.

ISO : International Standardisation Organisation.

MADE : Analyse des Modes de Défaillances et leur Effets.

MP : Maintenance Préventive.

MTBF : Moyenne de Temps de Bon Fonctionnement.

MTBM : Temps Moyen entre les activités de Maintenance.

MTBR : Temps Moyen entre deux Remplacements.

MTTF : Temps Moyen avant la première Défaillance.

MTD/MTI : Temps Moyen d'Indisponibilité / Temps Moyen d'arrêt propre.

MUT : Temps Moyen de Disponibilité.

MTTP : Temps Moyen de Réparation.

NF : Normes Françaises.

PSS : Produit Service / Système.

TPM : Total Productive Maintenance.

TRS : Taux de Rendement Synthétique.

QFD : Quality Function Development.

REX : Retour d'Expérience.

SLI : Soutien Logistique Intégré.

SAVE : Society of American Value Engineers.

SAD : Structured Analysis and Design technic.

## Liste des tableaux

**Tableau 2.1** Niveaux de la maintenance.

**Tableau 2.1** Relation maintenabilité, disponibilité, fiabilité.

**Tableau 2.2** Méthodes classique d'analyse de la sûreté de fonctionnement.

**Tableau 3.1** Diagramme FAST d'une pince de manipulateur.

**Tableau 3.2** Plan de travail d'une action « analyse de la valeur ».

**Tableau 3.3** Principales règles d'élaboration.

**Tableau 3.4** Elément constitutifs du CdCF.

**Tableau 3.5** Elaboration du CdCF.

**Tableau 3.6** Conception pour un Coût Objectif (CCO).

**Tableau 5.1** Liens entre les étapes d'une ACV et la maintenance.

## Liste des figures

- Figure 1.1** Types de maintenance
- Figure 1.2** Localisation du défaut, erreur et panne
- Figure 1.3** Arbre de défaillances
- Figure 1.4** Etapes du cycle de maintenance
- Figure 2.1** Arbre de sûreté de fonctionnement
- Figure 2.2** Résistance, charges, défaillances
- Figure 2.3** Maintenabilité et sûreté de fonctionnement
- Figure 2.4** L'état du système
- Figure 2.5** Disponibilité, indisponibilité
- Figure 2.6** Réduction des risques
- Figure 2.7** Graphe de Markov.
- Figure 2.8** Processus de conception
- Figure 2.9** Pérennisation de la chaîne de production
- Figure 2.10** Schéma « Quality Function Deployment » (QFD)
- Figure 2.11** Du séquentiel vers le simultané
- Figure 2.12** Champ d'application du diagnostic
- Figure 2.13** Emergence d'une relation (Conception machine / Exploitation machine)
- Figure 2.14** Phases de cycle de vie d'un équipement
- Figure 2.15** Modèle waterfall
- Figure 2.16** Cycle de vie en V
- Figure 2.17** Modèle spirale
- Figure 3.1** Bête à corne
- Figure 3.1** Diagramme FAST
- Figure 3.2** Méthode intuitive
- Figure 3.4** Méthode SADT
- Figure 3.5** Analyse fonctionnelle et analyse de la valeur
- Figure 3.6** Analyse fonctionnelle du système de conception des équipements nouveaux
- Figure 3.7** Analyse fonctionnelle du système d'innovation des équipements
- Figure 3.8** Evolution des besoins / équipements
- Figure 3.9** Résume les différentes étapes de l'appropriation d'une démarche d'éco-conception.
- Figure 4.1** Critères intégrés à la conception d'un équipement.

- Figure 4.2** Synergie entre qualité et conception de produits nouveaux.
- Figure 4.3** Synergie entre qualité et conception de produits nouveaux
- Figure 4.4** Investir dans un service de qualité
- Figure 4.5** Composantes du SLI
- Figure 4.6** Mise en évidence des contraintes liées à la conception en exploitation des machines.
- Figure 4.7** Relation utilisateur / concepteur
- Figure 4.8** Retour d'information pour les connaissances de maintenance
- Figure 4.9** Modèle fonctionnel hiérarchique
- Figure 4.10** Exemples de diagrammes des blocs
- Figure 5.1** Etapes de l'appropriation d'une démarche d'éco-conception.
- Figure 5.2** Facteurs d'implantation de la maintenance verte et durable.

## Liste des formules

$$\text{Taux d'utilisation des moyens} = \frac{\text{Potentiel réalisé}}{\text{Potentiel disponible}} \quad (1.1)$$

$$\text{Taux d'utilisation ou disponibilité intrinsèque} = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}} \quad (1.2)$$

$$\text{Taux de fonctionnement de l'équipement} = \frac{\text{Cumul heures de marche}}{\text{Heures prévues}} \quad (1.3)$$

$$\text{Taux de défaillance} = \frac{1}{\text{MTBF}} \quad (1.4)$$

$$\text{Taux d'anticipation} = \frac{\text{Nombre d'interventions programmées réalisées}}{\text{Nombre total d'interventions programmées}} \quad (1.5)$$

$$\text{Taux d'amélioration des coûts} = \frac{C. \text{ réalisé}}{C. \text{ prévu}} \quad (1.6)$$

$$\text{Taux de productivité} = \frac{\text{Activités}}{\text{Moyens}} \quad (1.7)$$

$$R(t) = \text{Pr} (\text{résistance} < \text{charges}) \quad (2.1)$$

$$T_f = [\min(t) [\text{Résistance}(t) < \text{Charges}(t)]] \quad (2.2)$$

$$A(t) = \text{Pr} (\text{système est non défaillant à l'instant } t) \quad (2.3)$$

$$S(t) = \text{Pr} (\text{Éviter de faire apparaître des événements critiques ou catastrophiques sur } [0, t]) \quad (2.4)$$

$$\text{Risque} = \text{Endommagement} + \text{Incertitude} \quad (2.5)$$

$$\text{Risque} = x \cdot \text{Pr} \quad (2.6)$$

$$\text{MTTR}_x = \sum_i \lambda_i \text{MTTR}_i / \sum_i \lambda_i \quad (4.1)$$

$$\text{MTTR}_i = \sum_k t_{ik} \quad (4.2)$$

$$\text{Surcoût consenti à l'acquisition} < \text{gain espéré sur le cycle d'exploitation} \quad (4.3)$$

$$\text{Structure optimale} = \min (\text{CStx} + \text{Coûtx}) \quad (4.4)$$

## Résumé

Le but de ce travail est de proposer une méthodologie consistant à intégrer la maintenance lors de la conception d'un équipement. Plusieurs phases sont nécessaires et doivent être minutieusement étudiées afin d'améliorer les décisions de conception en vue d'augmenter la production et de la productivité.

De même, la disponibilité et la durée de vie de l'équipement peuvent être allongées avec une diminution notable du coût global de maintenance.

**Mots clés :** Maintenance – Intégration – Conception – Sûreté de fonctionnement – LCC-  
Coût global de maintenance.

## Abstract

The purpose of this work is to offer a methodology which consists in including service during the design of an equipment: several stages are necessary and must be studied to improve decisions of design with a view to augmenting production and productivity.

So, availability and life cycle of the equipment can be lengthened with a notable reduction of the overall maintenance cost.

**Key words:** Service – Integration – Conception – Operational safety – LCC.

## ملخص

الهدف من هذا العمل هو اقتراح منهجية تعتمد على إدماج أعمال الصيانة إنطلاقاً من مرحلة التصميم : العديد من المراحل من المهم دراستها بشكل مدقق من أجل تحسين قرارات التصميم بهدف رفع الانتاج و الإنتاجية .  
بالتالي, التوفر وتمديد مدة حياة المعدات مع تخفيض معتبر في التكلفة الإجمالية لأعمال الصيانة.

**الكلمات المفتاحية:** الصيانة - الإدماج - التصميم - تكلفة مدة الحياة .

# Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

## Chapitre 1

### Maintenance et stratégies méthodologiques

Introduction .....	5
1.1 Définitions de la maintenance .....	5
1.1.1 Définition du dictionnaire «Larousse » .....	5
1.1.2 Définitions normalisées .....	5
1.1.3 Présentation des principales opérations de maintenance .....	6
1.2 Formes de la maintenance .....	6
1.2.1 Maintenance préventive .....	6
1.2.1.1 Maintenance préventive systématique.....	7
1.2.1.2 Maintenance conditionnelle.....	7
1.2.1.3 Maintenance prévisionnelle.....	8
1.2.2 Maintenance corrective .....	8
1.2.2.1 Maintenance palliative .....	8
1.2.2.2 Maintenance curative .....	9
1.3 Niveaux de maintenance .....	11
1.4 Lutte contre les défaillances .....	12
1.4.1 Classification des défaillances .....	13
1.4.2 Modes de défaillances .....	14
1.4.3 Arbre de défaillances .....	15
1.4.4 Notion du vieillissement .....	16
1.5 Indicateurs de durée des activités de maintenance .....	17
1.5.1 Principaux indicateurs de fréquences des activités de maintenance.....	17
1.5.2 Indicateurs de temps de main d'œuvre .....	18
1.5.3 Indicateurs de coût des activités de maintenance .....	18
Conclusion .....	19

## Chapitre 2

### Généralités sur la conception des équipements

Introduction .....	21
2.1 Définitions et notion de conception .....	21
2.1.1 Conception industrielle .....	21
2.1.2 Conception de produit .....	21
2.2 Types de conception .....	21
2.2.1 Conception routinière .....	22
2.2.2 Conception adaptative .....	22
2.2.3 « Variant design » .....	22
2.2.4 Conception innovante .....	22
2.2.5 Conception créative .....	22
2.2.6 Conception stratégique .....	23
2.3 Sûreté de fonctionnement (SDF) .....	23
2.3.1 Fiabilité .....	25
2.3.2 Maintenabilité .....	26
2.3.3 Disponibilité .....	27
2.3.4 Sécurité .....	28
2.3.5 Règles de sûreté de fonctionnement .....	30
2.3.6 Démarches de sûreté de fonctionnement .....	32
2.3.7 Méthodes principales d'analyse de la sûreté de fonctionnement .....	33
2.3.7.1 Graphe de Markov .....	34
2.3.7.2 Simulation de Monté-Carlo.....	35
2.3.7.3 Graphe de flux dynamique .....	35
2.4 Processus de conception .....	35
2.4.1 Paramètres de conception .....	37
2.4.2 Phases et démarches de conception .....	38
2.4.2.1 Démarches cartésiennes .....	39
2.4.2.2 Démarches systématiques .....	39

2.5	Connaissance des équipements et leurs comportements .....	40
2.5.1	Méthodologie du diagnostic .....	40
2.5.2	Champ d'application de la méthode du diagnostic .....	41
2.5.3	Environnement des équipements .....	41
2.5.4	Notion du Retour d'Expérience (REX).....	42
2.5.5	Analyse du cycle de vie d'un équipement .....	43
2.5.5.1	Expression du besoin.....	44
2.5.5.2	Recherche et développement de l'équipement.....	44
2.5.5.3	Méthodes et industrialisation.....	45
2.5.5.4	Réalisation.....	45
2.5.5.5	Installation, exploitation et démantèlement.....	46
2.6	Modèles de cycle de vie.....	46
2.6.1	Modèle en cascade Waterfall.....	46
2.6.2	Cycle de vie en V.....	47
2.6.3	Modèle contractuel.....	48
2.6.4	Modèle spirale.....	49
2.7	Calcul du coût global.....	50
2.8	Logiciels de Conception Assistée par Ordinateur (CAO).....	51
2.8.1	Positionnement des logiciels.....	51
2.8.2	Utilité d'un logiciel de CAO.....	52
2.8.3	Avantage d'un logiciel de CAO .....	52
	Conclusion .....	52

## **Chapitre 3**

### **Analyse fonctionnelle, analyse de la valeur et conception**

Introduction .....	54
3.1 Analyse fonctionnelle .....	54
3.1.1 Définition .....	54
3.1.2 Besoin de l'utilisateur.....	54
3.1.3 Validation du besoin .....	54

3.1.4 Service à satisfaire.....	54
3.1.5 Système équipement.....	55
3.1.6 Analyse fonctionnelle externe .....	55
3.1.7 Analyse fonctionnelle interne.....	56
3.1.8 Identification des fonctions.....	56
3.2 Recherche d'idées et familles de solutions.....	59
3.2.1 Etude et évaluation des solutions.....	60
3.3 Analyse de la valeur.....	60
3.3.1 Historique.....	60
3.3.2 Définition.....	61
3.3.3 Notion de fonction.....	62
3.3.4 Notion de valeur.....	63
3.4 Cahier des Charges Fonctionnel (CdCF).....	65
3.4.1 Méthodologie.....	66
3.4.1.1 Phases de l'action.....	66
3.5 Méthodes utilisées en Analyse de la Valeur (AV).....	69
3.5.1 Méthode intuitive.....	70
3.5.2 Méthode FAST (Function Analysis System Technic).....	70
3.5.3 Méthode SADT (Structured Analysis and Design Technic).....	71
3.6 Analyse fonctionnelle du système de conception des équipements nouveaux .....	73
3.7 Analyse de la valeur et conception a coût objectif .....	74
3.7.1 Objectif de la méthode .....	74
3.7.2 Déroulement de l'organisation .....	75
3.8 Analyse fonctionnelle du système d'innovation des équipements .....	75
3.8.1 Décomposition du système d'innovation en sous-systèmes .....	77
3.8.2 Analyse Fiabilité, Disponibilité, Maintenabilité (FDM) des systèmes réparables.....	77
Conclusion .....	78

## Chapitre 4

### Intégration de la qualité et la sécurité en conception

Introduction .....	80
4.1 Critères intégrés à la conception d'un équipement.....	80
4.2 Mise en sécurité en conformité et disponibilité du futur équipement .....	81
4.2.1 Sécurité en conception .....	81
4.2.1.1 Différentes logiques de la sécurité .....	82
4.2.1.2 Principes de prévention .....	83
4.2.2 Qualité optimale en conception .....	84
4.2.2.1 Assurance qualité en conception.....	85
4.2.2.2 Synergie entre qualité et conception .....	86
4.2.2.3 Maitrise du processus de la maitrise des risques .....	89
4.2.3 Service « ingénierie-travaux neufs ».....	89
4.2.4 Soutien Logistique Intégré (SLI).....	90
4.2.5 Impact de la conception sur la maintenance .....	91
4.3 Standardisation des composantes et des sous-systèmes .....	92
4.3.1 Règles de standardisation .....	93
4.4 Intégration des indicateurs de maintenabilité en conception .....	94
4.4.1 Evaluation de la maintenabilité en conception .....	94
4.4.2 Conception pour la maintenabilité .....	94
4.4.3 Processus d'évaluation et de validation du MTTR .....	94
4.4.4 Recommandation pour améliorer le maintenabilité .....	95
4.5 Préconisations d'exploitation et maintenance .....	96
4.5.1 Intégration des contraintes d'exploitation en Conception .....	96
4.5.2 Prise en compte de l'utilisation en conception .....	97
4.5.3 Ergonomie en conception.....	98
4.5.4 Utilisation des connaissances de maintenance dans la conception.....	99
4.6 Enjeu opérationnel et économique.....	101

4.7 Industrialisation .....	101
4.7.1 Modélisation et architecture d'un équipement .....	101
4.7.2 Méthode de sélection de l'architecture optimale de l'équipement .....	103
4.7.3 Méthode de détermination des activités de maintenance .....	104
4.7.3.1 Description du processus .....	104
Conclusion .....	105

## **Chapitre 5**

### **Maintenance et développement durable**

Introduction .....	107
5.1 Développement durable.....	107
5.1.1 Définition.....	107
5.1.2 Principes.....	107
5.1.3 Enjeux des 3 piliers du développement durable.....	112
5.2 Intégration des exigences du développement durable en conception .....	114
5.2.1 Eco-conception.....	114
5.2.1.1 Démarches d'éco-conception .....	115
5.2.2 Evolution, actions de la maintenance et environnement .....	118
5.2.3 Intégration de la maintenance tout au long du cycle de vie d'un équipement.....	119
5.3 Durabilité des équipements .....	122
5.3.1 Matériaux innovants pour la conception.....	123
5.3.2 Maintenance verte.....	123
5.3.3 Industrie et maintenance du futur.....	125
5.4 Recyclage et réutilisation .....	125
5.4.1 Dépollution et recyclage des machines et outillages industriels.....	126
Conclusion .....	126
Conclusion générale .....	127
Bibliographie .....	129
Webographie .....	133

# Introduction générale

Produire à moindre coût, avec une meilleure fiabilité et des temps de cycle de développement et d'industrialisation très courts tout en garantissant une bonne qualité des produits fabriqués, c'est l'intérêt numéro un pour toutes les entreprises modernes, pour être à jour avec la concurrence sur le marché. Dans ce milieu compétitif, l'industrie dépend non seulement de la maîtrise des technologies essentielles, mais encore de la stratégie adoptée et de la gestion du processus globale de la conception, d'où la nécessité d'une structuration méthodologique du processus de la conception. D'autre part, l'intégration des paramètres de la sûreté de fonctionnement, l'analyse fonctionnelle et la traçabilité deviennent un enjeu majeur dans les processus de conception des produits et des équipements.

Pour demeurer disponible et opérationnel, tout équipement industriel a besoin d'être entretenu convenablement. Par conséquent, les décisions prises lors de sa conception ont une grande influence sur l'efficacité et l'efficience de sa future maintenance. Pour optimiser ces dernières, l'idéal serait donc que la conception et la maintenance doivent être pensées en même temps.

En effet, plusieurs travaux de recherche qui ont été abordés dans ce domaine, précisant que la conception d'un équipement influe sur les activités de maintenance [29].

Dans notre étude, nous nous sommes intéressés à l'efficacité et la fiabilité des équipements de production en intégrant la maintenance dès les premières phases de conception, en s'appuyant sur des critères telles que la qualité, la sûreté de fonctionnement, d'autres connaissances, dans le but d'une amélioration continue et une meilleure performance au sein des entreprises de production.

Ces critères concernent la conception des équipements, la maîtrise de la qualité par rapport aux coûts en vue d'une amélioration continue de la maintenance, de la sécurité et de l'environnement de fonctionnement des équipements. L'intégration de la maintenance en conception contribue à maintenir les équipements en service bien au-delà de la durée de vie prévue à l'origine.

Cependant si plusieurs travaux dans la littérature font références à cette stratégie, très peu explicitent les possibilités d'intégration de la maintenance en conception des équipements.

Afin de traiter notre sujet, nous avons structuré notre mémoire suivant les cinq chapitres suivants :

Dans le premier chapitre nous avons passé en revue les stratégies méthodologiques de la maintenance. Après avoir rappelé les formes et niveaux de cette dernière, nous avons montré comment lutter contre les défaillances et nous avons cité quelques indicateurs liés à cette fonction.

## Introduction générale

---

Dans le deuxième chapitre, nous avons abordé les généralités, les types et les paramètres de conception ainsi que la sûreté de fonctionnement des équipements. Nous y avons aussi analysé le comportement des équipements et étudié les modèles de cycle de vie avec le coût global. Nous y avons attiré l'attention sur l'apport précieux des logiciels dans la conception.

Le troisième chapitre a été réservé à l'analyse fonctionnelle et l'analyse de la valeur en conception et leurs méthodes. De même, nous y avons indiqué comment évaluer un cahier des charges fonctionnel.

Dans le quatrième chapitre, nous avons étudié comment intégrer la qualité et la sécurité en conception d'un équipement ainsi que les indicateurs de maintenabilité.

Enfin, le cinquième chapitre a été réservé à la maintenance et le développement durable. Nous y avons recommandé l'intégration des exigences du développement durable en conception, ainsi que le recyclage et la réutilisation des équipements usagés autant que possible.

# Chapitre 1

Maintenance et stratégies  
méthodologiques

## Introduction

La maintenance industrielle a été toujours le parent pauvre des entreprises algériennes de production. Le maintien des équipements de production est un enjeu clé pour la productivité de ces entreprises.

Avec le temps, la maintenance a développé ses propres méthodes et a enrichi ses stratégies méthodologiques. Ses actions sont situées à la croisée de nombreuses voies tant techniques, opérationnelles ou qu'humaines. Cependant, les équipements de production ont toujours causé des phénomènes de dysfonctionnement et de défaillances, nécessitant des interventions et des prestations adéquates.

D'autre part, les activités de maintenance font partie du cycle de vie de l'équipement. Pour rendre ce dernier efficace et disponible en phase d'exploitation, la maintenance doit être pensée dès les premières phases du processus de conception.

## 1.1 Définitions de la maintenance

### 1.1.1 Définition de dictionnaire « Larousse »

Le dictionnaire « Larousse » définit la maintenance comme étant [45] :

« l'ensemble des opérations permettant de maintenir ou de rétablir un matériel, un appareil, un véhicule etc., dans un état donné, ou de lui restituer des caractéristiques de fonctionnement spécifiées ».

« Action ayant pour objet de maintenir en condition grâce à un recomplètement en personnel, en matériel et en ensemble des moyens nécessaires à cette action ».

### 1.1.2 Définitions normalisées

C'est l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un équipement, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise [45].

D'après l'Association Française de Normalisation (AFNOR X 60-010-1994) [45] :

c'est l'ensemble des activités destinées à maintenir ou à rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise. Ces activités sont une combinaison d'activités techniques, administratives et de management.

### 1.1.3 Présentation des principales opérations de la maintenance

Il existe des définitions normatives, des différentes opérations de maintenance ; néanmoins [51] :

- les normes donnent l'esprit d'une intervention mais ne définissent pas toujours clairement les opérations à effectuer.
- les normes ne couvrent pas toutes les prestations.

De ce fait, pour éviter toute ambiguïté, il est nécessaire pour chaque entreprise de définir parfaitement les prestations attendues ou effectuées (objectif, détail des opérations ...etc.).

- **Réparation** : (extrait de la norme AFNOR X 60-010-1994)

Action définitive et limitée de la maintenance à la suite d'une défaillance.

- **Dépannage** : (extrait de la norme AFNOR X 60-010-1994)

Action consécutive à la défaillance de bien, en vue de rendre apte à accomplir une fonction requise, au moins provisoirement.

- **Vérification** : (extrait de la norme AFNOR X 07-010-1994)

Confirmation par examen et établissement des preuves que les exigences spécifiées ont été satisfaites.

Le résultat d'une vérification se traduit par une décision de remise en service, d'ajustage, de réparation, de déclassement ou de réforme.

Dans tous les cas, une trace écrite de la vérification effectuée doit être conservée dans le dossier individuel de l'appareil de mesure.

## 1.2 Formes de la maintenance

### 1.2.1 Maintenance préventive

La norme AFNOR définit la maintenance préventive comme suit [20]:

« maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinée à réduire la probabilité des défaillances ou la dégradation du fonctionnement d'un bien ».

La maintenance préventive, ou maintenance technique planifiée, consiste à intervenir sur un équipement à intervalles réguliers ou en fonction de critères prédéfinis. Son objectif premier est de réduire les risques de pannes des équipements. On distingue essentiellement trois types de la Maintenance Préventive (MP) qui vont suivre [12].

### 1.2.1.1 Maintenance préventive systématique

La maintenance préventive systématique était et demeure une étape essentielle dans la gestion des actifs industriels. Tous les professionnels de l'industrie devraient se familiariser avec le concept de maintenance préventive et de ses bénéfices liés à la gestion des actifs de l'entreprise [42].

#### - Définitions

Selon la norme AFNOR X 60-010 [20]:

se sont les « activités déclenchées suivant un échéancier établi à partir d'un nombre prédéterminé d'unités d'usage » et aussi « les remplacements des pièces et des fluides ont lieu quel que soit leur état de dégradation, et ce de façon périodique ».

maintenance programmée « maintenance préventive exécutée selon un calendrier préétabli ou selon un nombre défini d'unités d'usage ».

maintenance systématique « maintenance préventive exécutée sans contrôle préalable de l'état du bien et à des intervalles définis ».

### 1.2.1.2 Maintenance conditionnelle

Selon la norme AFNOR X 60-010 « les activités de la maintenance conditionnelle sont déclenchées suivant des critères prédéterminés significatifs de l'état de dégradation du bien ou du service ».

La maintenance préventive conditionnelle : « les remplacements ou les remises en état des pièces,

Les remplacements ou les appoints des fluides ont lieu après une analyse de leur état de dégradation. Une décision volontaire est alors prise d'effectuer les remplacements ou les remises en état nécessaire ».

Projet de norme CEN [22] :

maintenance conditionnelle : « maintenance préventive consistant en une surveillance du fonctionnement du bien et des paramètres significatifs de ce fonctionnement intégrant les actions qui en découlent ».

« La surveillance peut être exécutée selon un calendrier, ou à la demande, ou de façon continue ».

### 1.2.1.3 Maintenance prévisionnelle

La norme AFNOR X60-010 définit la maintenance prévisionnelle comme suit [20]:

« maintenance préventive subordonnée à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs de la dégradation du bien permettant de retarder et de planifier les interventions. Elle est parfois improprement appelée maintenance prédictive ».

Tous les éléments manifestent des signes, visibles ou non, de dégradation qui en annonce la défaillance. Le tout est de savoir reconnaître ces signes précurseurs. Des appareils permettent de mesurer cette dégradation, laquelle peut être une variation de température, de vibration, de pression, de dimension, de position, de bruit, etc. Ces dégradations peuvent donc être d'ordre physique, chimique, comportemental, électrique ou autre [47].

### 1.2.2 Maintenance corrective

D'après l'AFNOR, la maintenance corrective est définie ainsi : « maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans état dans lequel il peut accomplir une fonction requise ».

Elle peut être « différée » si « elle n'est pas exécutée immédiatement après détection du panne, mais est retardée en accord avec des règles de maintenance données ». Elle peut être « d'urgence » si elle est exécutée sans délai après détection d'une panne afin d'éviter des conséquences inacceptables » [20].

#### 1.2.2.1 Maintenance palliative

La maintenance palliative désigne un dépannage qui permet de bien fonctionner en attendant une intervention curative. Avec la maintenance palliative, on est dans le provisoire, le court terme.

Pour donner un exemple typique : remplacer un pneu crevé par une roue de secours, c'est de la maintenance palliative ; mettre un nouveau pneu sur la jante d'origine relève de la maintenance curative.

Il n'existe pas de norme officielle définissant la maintenance palliative [48].

#### 1.2.2.2 Maintenance curative

Contrairement à la maintenance palliative, qui, pour rappel consiste à réparer un équipement provisoirement, la maintenance curative s'applique lorsqu'une machine ou une installation est en panne et ne peut être réparée. Dans ce cas, il faut changer le matériel partiellement ou dans son intégrité. Il est possible que cette maintenance curative survienne après une maintenance préventive ou corrective [46].

Dans le cadre de la maintenance curative, on ne précise pas si le matériel défectueux gêne ou non le processus dans la globalité. Il peut donc s'agir d'une réparation mineure ou majeure.

La figure 1.1 présente un diagramme combinant les différentes formes de maintenance.

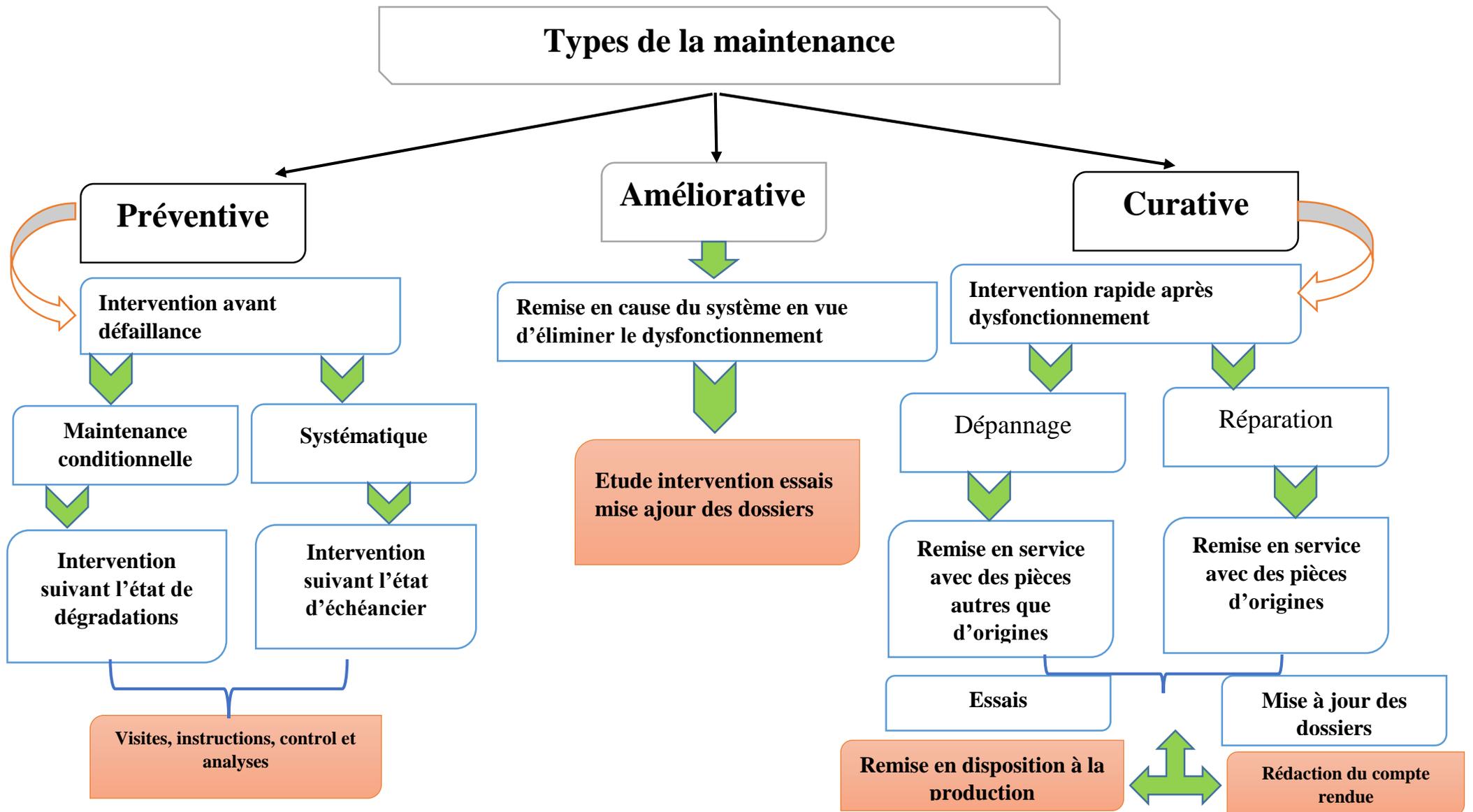


Figure 1.1 Types de maintenance

### 1.3 Niveaux de maintenance

La maintenance est caractérisée par une très grande variabilité des tâches, en natures comme en durées. D'où l'utilité de jeter les bases de son organisation à partir d'une mise en familles à cinq niveaux (tableau 1.1), suivant AFNOR X 60-015. La tendance actuelle est de se ramener à trois niveaux seulement, dans une logique de total productive maintenance (TPM) à savoir [20] :

I = 1 + 2 : c'est la maintenance «de première ligne » transférée progressivement aux opérateurs de production, assistés si nécessaire par les techniciens de maintenance de l'antenne sectorisée;

II = 3 + 4 : domaine d'action privilégié des équipes polyvalentes de techniciens de maintenance. Diagnostics, interventions techniquement évoluées, mise en œuvre d'améliorations, etc.

III = 5 : travaux spécialisés souvent sous-traités pour que la maintenance puisse recentrer ses moyens sur son savoir-faire [20] :

Niveau	Personnel d'intervention	Nature de l'intervention	Moyens requis
1	Exploitant, sur place	Réglage simple d'organes accessibles sans aucun démontage, ou échange d'éléments accessibles dans les consignes de toute sécurité conduite.	Outillage léger défini dans les consignes de conduite
2	Technicien habilité (dépanneur) sur place	Dépannage par échange standard d'éléments prévus à cet effet, ou opérations mineures de maintenance préventive.	Outillage standard et rechanges situés à proximité.
3	Technicien spécialité, sur place ou en atelier de maintenance	Identification et diagnostic de pannes, réparation par échange de composants fonctionnels, réparation mécanique mineures.	Outillage prévu plus appareils de mesure, banc d'essai, de contrôle
4	Equipe encadrée par un technicien spécialité, en atelier central	Travaux importants de maintenance corrective ou préventive. Révision.	Outillage général et spécialisé
5	Equipe complète polyvalente, en atelier central	Travaux de rénovation, réparation importantes confiées à un atelier central Souvent externalisés	Moyens proches de ceux de la fabrication par le constructeur.

**Tableau 1.1** Niveaux de la maintenance [20].

## 1.4 Lutte contre les défaillances

Une défaillance est la cessation de l'aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise avec les performances définies dans les spécifications techniques [43]. C'est un événement qui met un composant ou un système dans l'état de dysfonctionnement où il ne peut plus fournir sa fonction requise ; un système est considéré défaillant si ses capacités de fonctionnement sont suspendues, donc il est considéré incapable d'assurer les fonctions requises. Certaines défaillances n'affectent pas directement les fonctions du système et ne nécessitent qu'une action corrective ; d'autres, en revanche, affectent la disponibilité ou la sécurité du système. Pour un système, on pourrait choisir un niveau de défaillance fixé de sorte que le risque de défaillance soit considéré acceptable.

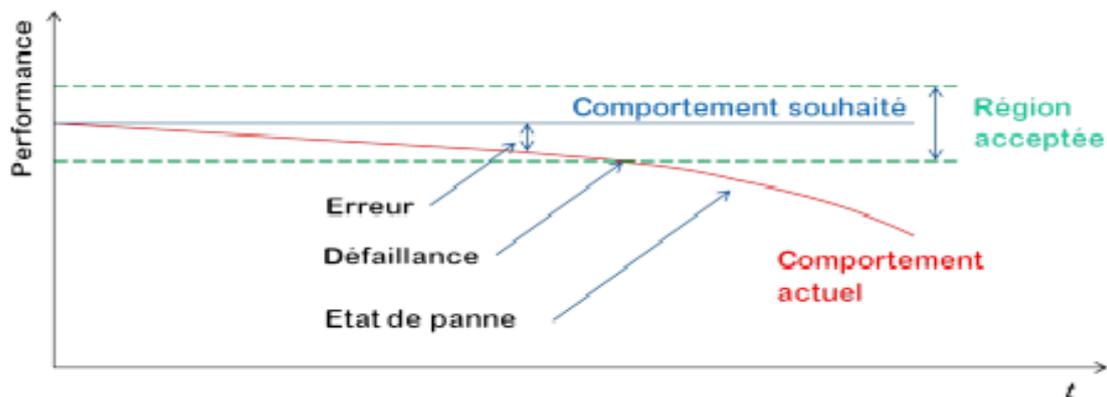


Figure 1.2 Localisation de défaillance, erreur et panne [41].

Si la dégradation de l'état du système est en dessous de cette valeur, qui peut être appelée le point de défaillance potentielle, il n'est pas nécessaire d'intervenir. La dégradation est définie comme l'état d'un système qui présente une déviation négative de performance, d'un des services fournis par le système, au-dessous d'un seuil défini dans les caractéristiques. En général, il existe des systèmes dans lesquels on a un seul état, soit l'état du fonctionnement parfait ou l'état de défaillance ; ce type de systèmes s'appelle des systèmes binaires. Dans d'autres systèmes, le nombre d'états possibles dépasse deux états, on peut alors avoir un état de défaillance et plusieurs autres états de fonctionnement à des niveaux différents de performance ; ce type de systèmes s'appelle des systèmes "multi-états". Il faut bien distinguer entre la défaillance, l'erreur et l'état de panne, ce qui est illustré dans la figure (Fig1.2) [35]. L'état de panne peut être défini par l'état d'un bien dans lequel il ne peut pas accomplir une fonction requise, excluant l'inaptitude due à la maintenance préventive ou à d'autres actions programmées ou à un manque de ressources extérieures. Une panne est souvent la

conséquence d'une défaillance de l'entité elle-même mais peut exister sans avoir une défaillance. La cause d'une panne est un défaut physique ou une erreur humaine.

L'erreur est une déviation d'un état du système, d'un service ou d'un processus de l'état exemplaire souhaité. Mais aussi, le défaut est défini comme toute non-conformité d'une entité aux comportements souhaités ; on appelle conformité, la capacité de fournir ou de répondre à une performance définie ou exigée. Un défaut ne conduit pas toujours à une défaillance, par contre une défaillance indique normalement un défaut. Si les effets d'une panne ne sont pas observables, cela n'aurait pas d'impact immédiat sur le fonctionnement ou la sécurité ; on appelle ce type de pannes, une panne cachée. Dans ce cas, on appelle la défaillance qui se produit après la panne cachée, "une panne composée". Celle-ci sera l'élément qui permet d'observer les conséquences indésirables. Les causes des défaillances peuvent être liées à la conception, la fabrication ou l'exploitation. On définit aussi la "densité des défaillances" par la somme cumulée du nombre des défaillances à chaque instant dans la durée de vie d'un équipement ; et le taux de défaillances par le nombre moyen arithmétique des défaillances d'un composant ou d'un système par unité de temps d'usage mesuré, normalement en heures et parfois en nombre de défaillances par an [41].

### 1.4.1 Classification des défaillances

Se basant sur les normes (NF EN 13306) et (NF X 60 500), les défaillances peuvent être classées selon plusieurs paramètres [42]:

- en fonction des causes
  - Défaillance due à un mauvais emploi.
  - Défaillance due à une faiblesse inhérente.
  - Défaillance seconde : défaillance d'un bien causée directement ou indirectement par une défaillance ou une panne d'un autre bien.
- en fonction du degré de dégradation
  - Défaillance partielle : une perte de certaines capacités de performance mais pas la perte complète de fonctionnement.
  - Défaillance complète : un arrêt total de fonction du service principal.
  - Défaillance intermittente : une perte de fonctionnement pour une durée trop courte et un retour en fonctionnement normal sans avoir été soumis à une maintenance.

- en fonction de la vitesse d'apparition
  - Défaillance soudaine : défaillance qui ne pouvait pas être prévue par un examen ou une surveillance de fonctionnement préalable.
  - Défaillance progressive : défaillance qui peut être prédite par un test ou une vérification de performance.
- en fonction de la vitesse d'apparition et du degré de dégradation
  - Défaillance catalectique : défaillance à la fois soudaine et complète.
  - Défaillance par dégradation : défaillance à la fois progressive et partielle.
- Par rapport aux conséquences
  - Défaillance mineure : défaillance qui permet de fournir une mission dégradée sans l'arrêt de la mission globale.
  - Défaillance majeure : défaillance qui conduit à la perte de la mission globale, endommagement du bien.
  - Défaillance critique : défaillance qui mène à une destruction importante de mission, effets sur l'environnement à court terme.
  - Défaillance catastrophique : défaillance avec risque de perte de vie humaine, effets sur l'environnement à long terme.
  - Panne cachée.
- D'après S. Natkin [26] :
  - défaillance statique : le système produit des résultats non corrects de manière permanente (aspects fonctionnels).
  - défaillance dynamique : le système suit un régime transitoire pendant lequel le système produit un résultat faux puis atteint un régime permanent durant lequel les sorties sont correctes (aspects temporels).
  - défaillance durable : le système produit des résultats erronés de manière persistante.
  - défaillance transitoire : comme une réponse à un événement, le système ne délivre pas la fonction attendue pour un moment.

## 1.4.2 Modes des défaillances

Un mode de défaillance est la manière selon laquelle cette défaillance est observée [43]. C'est la façon dans laquelle un produit ou un équipement se comporte pour tomber en panne pendant sa fonction (perte de fonction, dégradation d'une fonction, fonction intempestive : un événement qui a lieu avant un moment spécifié, etc.). Il ne faut pas confondre les modes de défaillances et les mécanismes de défaillances qui sont des processus qui conduisent à une

défaillance, ou ont généré une défaillance (la fatigue, le stress et la corrosion ne sont pas des modes de défaillances mais des mécanismes de défaillances). La connaissance des modes de défaillances d'un processus, d'un produit, ou d'un équipement sont des points clés dans les études de fiabilité. Les outils qui sont développés à cet effet sont [41] :

- AF l'Analyse Fonctionnelle.
- AMDEC l'Analyse des Modes de Défaillances, des Effets et de leurs Criticités.
- APR l'Analyse Préliminaire des Risques.
- l'HAZOP (Hazard and Operability study).
- l'HACCP (Hazard Analysis Critical Control Point).
- ADD les arbres de défaillances, etc.

### 1.4.3 Arbre de défaillances

- Principe[58] :

L'arbre de défaillances est une méthode de construction et de représentation de relations fonctionnelles entre événements aléatoires.

Son objectif est de déterminer les combinaisons possibles d'événements indésirables :

- événement de base : défaillances indépendantes des composants.
- événement indésirable : perte de la fonction de l'équipement.

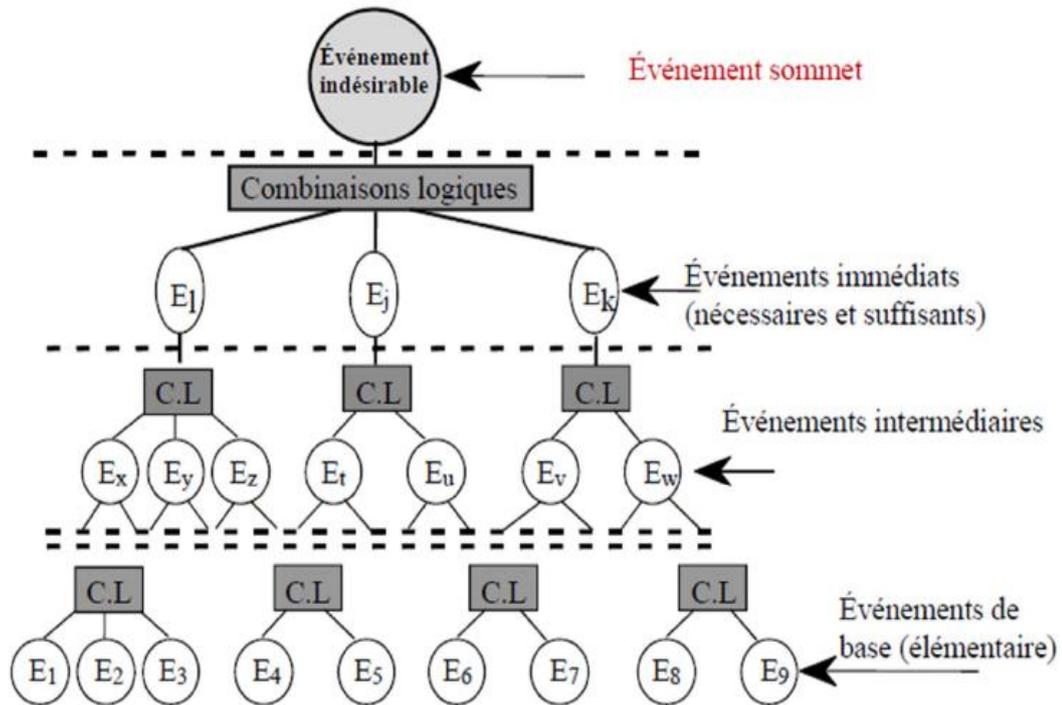
Construire un arbre de défaillance revient à répondre à la question « comment tel événement peut-il arriver ? », ou « quels sont tous les enchaînements possibles qui peuvent aboutir à cet événement ? ».

Un arbre de défaillance est une méthode-type pour répondre à une question du genre « quelles chances y a-t-il que le dispositif de détection et extinction automatique d'incendie manque à se déclencher en présence d'un feu et sur quoi peut-on agir pour diminuer cette probabilité ? » « dans un système avec redondances, quelle est la probabilité finale d'échec en fonction des probabilités élémentaires des composants et de l'architecture ? ».

- Construction de l'arbre de défaillances

Etape itérative jusqu'à l'obtention d'événement de base recherche des causes immédiates, nécessaires et suffisantes de l'événement issues de :

- résultats de l'analyse fonctionnelle interne de l'équipement ;
- AMDEC des entités constituant l'équipement ;
- recherche des paramètres physiques caractérisant l'équipement et leurs évolutions.



**Figure 1.3** Arbre de défaillances [57].

#### 1.4.4 Notion de vieillissement

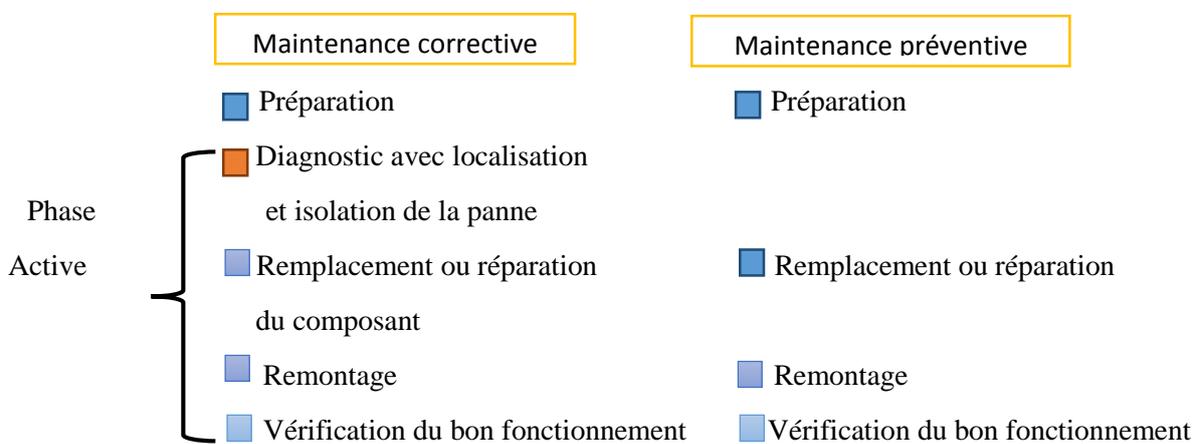
La dégradation est l'évolution irréversible d'une ou plusieurs caractéristiques d'un bien liée au temps, à la durée d'utilisation ou à une autre cause externe. Le vieillissement est un processus par lequel les caractéristiques d'un système, structure ou composant se modifient graduellement avec le temps ou l'utilisation. Le phénomène de vieillissement commence à partir de la phase de fabrication, puis pendant le stockage et enfin durant la durée de vie utile du composant. Ce phénomène se traduit par une déviation négative rapide des performances des matériels, systèmes et structures, ou par une perte de fonctionnalité. Certains considèrent que le vieillissement ou la dégradation d'un dispositif apparaît lorsque le taux des défaillances est croissant, d'autres ont estimé que le vieillissement apparaît au moment où l'on a une accumulation de défaillances autour de la vie moyenne d'un dispositif. La méthodologie utilisée pour évaluer la dégradation est décomposée en plusieurs phases, il s'agit d'une phase d'identification des composants "critiques" pour lesquels on considère que l'étude du vieillissement est nécessaire, donc il n'est pas nécessaire d'examiner tous les dispositifs ou tous les composants sur l'aspect du vieillissement, seuls ceux considérés importants pour la sûreté d'installation ou pour la perte de production sont à inspecter. Une deuxième phase est d'évaluer le vieillissement pour les composants mentionnés, il s'agit de connaître l'impact des mécanismes de dégradation sur certaines propriétés des composants concernés et d'analyser leurs causes. La troisième phase est la mise en œuvre pour la maîtrise du vieillissement,

il s'agit finalement de trouver des solutions afin d'éviter ou d'éliminer le vieillissement. On définit également le mécanisme de dégradation ou le mécanisme de vieillissement par le processus spécifique qui modifie graduellement les caractéristiques d'un dispositif avec le temps ou l'utilisation [43].

## 1.5 Indicateurs de durées des activités de maintenance

L'impact des indicateurs de maintenance sur la fiabilité et la disponibilité des équipements et même leurs durées de vie exige une connaissance bien détaillée de ces indicateurs pour la maîtrise de sûreté de fonctionnement (fiabilité, maintenabilité, disponibilité et sécurité).

Les indicateurs de durée des activités de maintenance estiment la durée des étapes actives du cycle de maintenance corrective ou préventive. Ces indicateurs sont basés sur la durée des étapes de la phase active de maintenance [30].



**Figure 1.4** Etapes du cycle de maintenance [30].

### 1.5.1 Principaux indicateurs de fréquences des activités de maintenance

Le matériel support (machine d'atelier, engins...) doit toujours être présent, d'où le soin particulier à lui réserver. Il faut donc envisager son suivi par les critères de fonctionnement et noter au profit de quelle entité il a servi. Ceci permet d'avoir les taux d'utilisation, les taux potentiels et ceux d'indisponibilité.

L'homme est le premier à être suivi. En maintenance, les tâches ne sont pas répétitives et les standards sont difficilement déterminables. Ainsi, le contrôle et l'évaluation des activités exigent la comparaison avec un ensemble de travaux. De ce fait, le suivi est quotidien et peut être concrétisé par une fiche analytique journalière pour pouvoir déterminer les différents ratios indicateurs de productivité.

Ci-après quelques ratios d'efficacité utilisés en maintenance [5] :

$$\text{Taux d'utilisation des moyens} = \frac{\text{Potentiel réalisé}}{\text{Potentiel disponible}} \quad (1.1)$$

$$\text{Taux d'utilisation ou disponibilité intrinsèque} = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}} \quad (1.2)$$

$$\text{Taux de fonctionnement de l'équipement} = \frac{\text{Cumul heures de marche}}{\text{Heures prévues}} \quad (1.3)$$

$$\text{Taux de défaillance} = \frac{1}{\text{MTBF}} \quad (1.4)$$

$$\text{Taux d'anticipation} = \frac{\text{Nombre d'interventions programmées réalisées}}{\text{Nombre total d'interventions programmées}} \quad (1.5)$$

$$\text{Taux d'amélioration des coûts} = \frac{\text{C. réalisé}}{\text{C. prévu}} \quad (1.6)$$

$$\text{Taux de productivité} = \frac{\text{Activités}}{\text{Moyens}} \quad (1.7)$$

MTBF : Temps Moyen Entre deux Défaillances successives (Mean Time Between Failure).

MTTR : Temps Moyen de Réparation (Mean Time To Reper).

### 1.5.2 Indicateurs de temps de main d'œuvre

Dans cette catégorie, les indicateurs couramment rencontrés sont : le temps moyen de main d'œuvre par heure de fonctionnement, par activité de maintenance, par mission, par mois ou par an. Il peut être considéré comme l'indicateur principal pour calculer les autres indicateurs [23].

### 1.5.3 Indicateurs de coûts des activités de maintenance

Les coûts de maintenance prennent en compte les éléments tels que la main d'œuvre, les pièces de rechange, les équipements supports et les infrastructures. Les indicateurs permettant d'évaluer ces coûts sont similaires à ceux relatifs aux de temps de main d'œuvre. Ainsi, on a le coût moyen de maintenance par heure de fonctionnement, par activité de maintenance, par mission, par mois ou par an [30].

Les paramètres nécessaires au calcul des indicateurs de maintenabilité utilisés en exploitation sont :

- les taux de pannes des composants,  $\lambda_i$ .
- les fréquences des activités de maintenance préventive,  $f_j$ .

Les familles d'indicateurs sont utilisées dans la littérature. Dans chaque famille, les indicateurs sont calculés à partir des mêmes paramètres. On dit que deux familles d'indicateurs peuvent être évaluées en conception par leur facilité et la disponibilité des données nécessaires pour l'évaluation : les indicateurs de durée et les indicateurs de fréquence des activités de maintenance. Le choix d'un ou de plusieurs indicateurs dépend de l'utilisateur final et des données disponibles pour l'évaluation.

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue les différentes formes et niveaux de maintenance. Nous avons montré comment les défaillances peuvent être classées, afin de les prévenir, les éviter ou les maîtriser ainsi que la prise en compte du phénomène de vieillissement dès la phase de conception.

Enfin, la maintenance industrielle demeure toujours une fonction essentielle pour la gestion des équipements. Avec l'évolution rapide des différentes techniques et concepts ; elle est devenue un centre de profit et un facteur de qualité et de productivité.

# Chapitre 2

Généralités sur la conception des équipements

## Introduction

La conception est une méthode utilisée dès que l'homme cherche à faciliter sa vie ou bien ses activités quotidiennes.

Pour tous ce qui est un produit ou un équipement, la conception est l'étape où l'ingénieur reprend au besoin avec plusieurs solutions, prenant en compte l'impact des paramètres et exigences utilisant ce qu'on appelle les activités de conception (la pré-étude, les études détaillées, les simulations, les calculs...) [18], il va converger vers une solution optimale.

La conception occupe une place majeure dans le processus d'industrialisation. Elle intervient en particulier lors de la création des modèles mécaniques (produits ou équipement), le processus de conception a pris des formes différentes, selon le degré d'innovation des objets et selon les organisations et les stratégies des firmes où ils ont été développés. L'intégration de la maintenance en phase de conception devient actuellement un objectif très important pour les entreprises qui veulent avoir une place dans le marché ; mais la complexité de cet enjeu, grâce aux critères qui peuvent influencer ce dernier, demande une étude bien détaillée du processus de conception prenant en compte tous les paramètres qui peuvent établir une différence vers le bien (sûreté de fonctionnement, cycle de vie, productivité, qualité...).

## 2.1 Définitions et notions de conception

### 2.1.1 Conception industrielle

Selon la norme AFNOR, la conception d'un équipement est l'activité créatrice qui, partant des besoins exprimés, des moyens existants et des possibilités technologiques, aboutit à la définition d'un produit satisfaisant ces besoins et industriellement réalisable [43].

### 2.1.2 Conception de produit

La nécessité d'innover a apparu dès l'évolution de la structure industrielle concurrentielle. Il a fallu donc intégrer une fonction de transition entre la recherche et le développement. Elle correspond à la phase de conception innovante tout en amont du développement de produit sur la base d'un concept technique ou par rapport à l'usage [43].

La complexité de processus de conception a exagéré sur les spécialistes de reconsidérer ce dernier dans le but de l'organiser de nouveau, par conséquent, mettre une typologie pour les définitions et faciliter l'utilisation de la conception dans les différents secteurs industriels.

## 2.2 Types de conception

Il est possible d'identifier plusieurs typologies de conception dans les ouvrages, que l'on peut classer selon la proposition de connaissances nouvelles qu'elles nécessitent [30].

La reconception est une situation courante. Elle peut concerner des modifications à apporter à un produit commercialisé, nécessitées par de nouvelles exigences ou un manque de performances. Il peut s'agir également d'une mise à jour, planifiée dans le cycle de vie du produit avant son introduction sur le marché, afin qu'il reste compétitif. En général, la reconception part d'une solution existante d'un produit existant pour les faire évoluer.

### 2.2.1 Conception routinière

Elle concerne l'utilisation de principes de solutions possibles qui sont souvent catalogués. L'ensemble des sous problèmes et leurs solutions sont connus même si le problème est nouveau, les stratégies et méthodes sont connues. Il existe dans la littérature des concepts qui traitent la notion du « repeat design » comme étant une conception qui vise à mettre en place des modifications pour réduire les coûts, simplifier et améliorer une conception existante en utilisant des techniques de conception établies [52].

### 2.2.2 Conception adaptative

On part d'une structure fonctionnelle établie, on maintient des principes de solution connus et on adapte l'architecture aux exigences changées.

### 2.2.3 « Variant design »

C'est une conception qui nécessite des connaissances nouvelles. Il peut s'agir d'innovation d'un produit existant sans changement du principe de solution, telles changement de tailles et de dispositions, application d'amélioration des procédés de fabrication ou de l'usage d'une technologie existante.

### 2.2.4 Conception innovante

Elle nécessite plus de connaissances nouvelles, la décomposition du problème est connue, mais il n'existe pas d'alternative connue pour tous les sous problèmes, dans cette conception tous les attributs ne sont pas connus à l'avance.

### 2.2.5 Conception créative

Ni les attributs ni les méthodes ne se sont pas connus. L'élément clé est la transformation de l'inconscient en conscient. La conception créative est un processus structuré, collaboratif et pratique qui permet aux équipes de conception d'attaquer les problèmes humains complexes, de faire émerger les véritables besoins en favorisant un langage commun et en encourageant de nouveaux comportements qui permettront à des solutions innovantes.

### 2.2.6 Conception stratégique

Elle nécessite d'étendre les connaissances de conception et de production d'une entreprise. Il s'agit d'imaginer comment on peut intégrer cette discipline dans les entreprises, le produit ou l'équipement. Ceci nous permettra d'apporter des nouveaux concepts à notre business et définir de nouvelles opportunités pour l'avenir.

## 2.3 Sûreté de fonctionnement

La sûreté de fonctionnement est un concept générique qui a principalement été définie en 1995 par J.C Laprie comme étant « la propriété qui permet aux utilisateurs du système de placer une confiance justifiée dans le service qui leur délivre » [17]. La sûreté de fonctionnement est « l'aptitude d'une entité à satisfaire à une ou plusieurs fonctions requises dans des conditions données » [39]. On peut dire que la sûreté de fonctionnement est la science des défaillances et des pannes.

La sûreté de fonctionnement consiste aussi à connaître, évoluer, prévoir, mesurer et maîtriser les défaillances de systèmes technologiques et les défaillances humaines pour éviter ces conséquences.

Elle concerne la relation entre la mission ou le service requis d'un bien et le service observé réellement. Un système qui fournit à son utilisateur un service, selon des spécifications, est un système confiant si on a placé une confiance justifiée dans le service délivrée par le système. En revanche, un système considéré défaillant quand on aura une différence entre le service requis et le service délivré réellement. Cette confiance repose sur un ensemble de démarches, des moyens, des outils et des méthodes. Elle se caractérise par l'analyse des défaillances et de leurs conséquences et s'exprime par un ensemble de caractéristiques: la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité et la sécurité. L'évolution des modèles de la sûreté de fonctionnement peut être observée de manières différentes:

- **modèles de tolérances aux fautes**: ils dépendent des distributions des défaillances des systèmes, comme par exemple MTTF le Temps Moyen Avant la Défaillance; l'observation et la surveillance de ces types de grandeurs permettent de caractériser l'évolution de performance des systèmes telle que la capacité de fournir certains services et la capacité de le maintenir.
- **modèles probabilistes**: ils prédisent comment évaluer la sûreté de fonctionnement selon l'estimation de ses attributs.
- **modèles structurés**: ils estiment le hasard relié aux défaillances du système et leurs risques, telle que la méthode des arbres des défaillances et la méthode des arbres des causes et l'AMDEC.
- **d'autres modèles** : ils lient les caractéristiques de la sûreté de fonctionnement avec la structure

et fonctionnalité du système et ces processus.

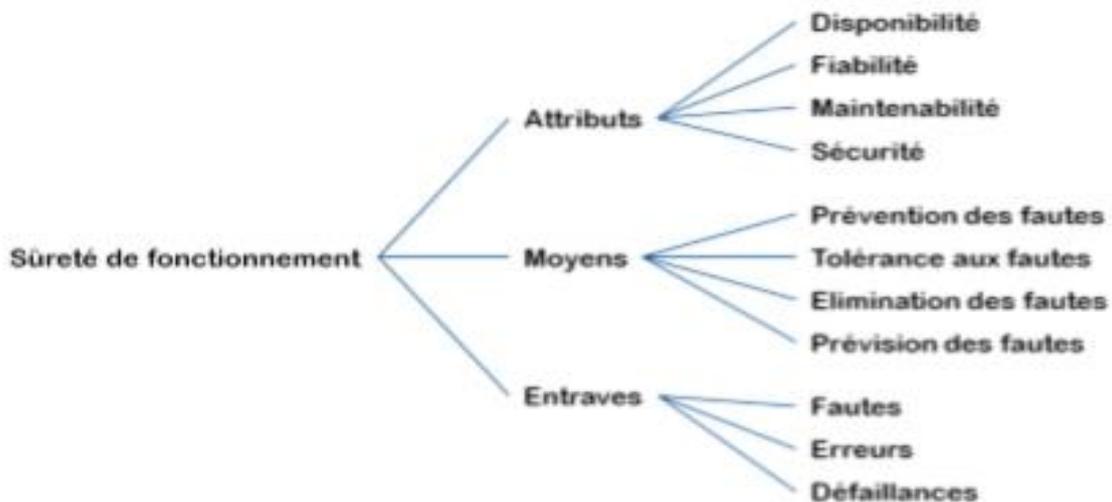
L'évaluation de la sûreté de fonctionnement d'un système peut être considérée d'un niveau élevé, niveau moyen et niveau bas; pour mieux préciser ces niveaux, on peut utiliser une échelle de zéro à 100%. L'amélioration de la sûreté de fonctionnement est basée sur des techniques développées par l'ingénierie de fiabilité et qui comprend les moyens suivants:

**a) prévention des fautes:** empêcher l'occurrence des fautes et diminuer la probabilité de leur apparition.

**b) tolérance aux fautes:** diminuer la probabilité des défaillances malgré la présence éventuelles des fautes.

**c) élimination des fautes:** détecter, identifier et enlever les fautes du système.

**d) prévision des fautes :** dans le sens large, la sûreté de fonctionnement pour Villemeur [39], est la science des défaillances; elle inclut leur connaissance, leur évaluation, leur prévision, leur mesure et leur maîtrise. L'arbre illustré dans le schéma suivant (fig. 2.1) présente l'arbre de sûreté de fonctionnement, il est structuré par trois principales branches ; les attributs (les caractéristiques), les moyens (les méthodes) et les entraves (les menaces).



**Figure 2.1** Arbre de sûreté de fonctionnement [41].

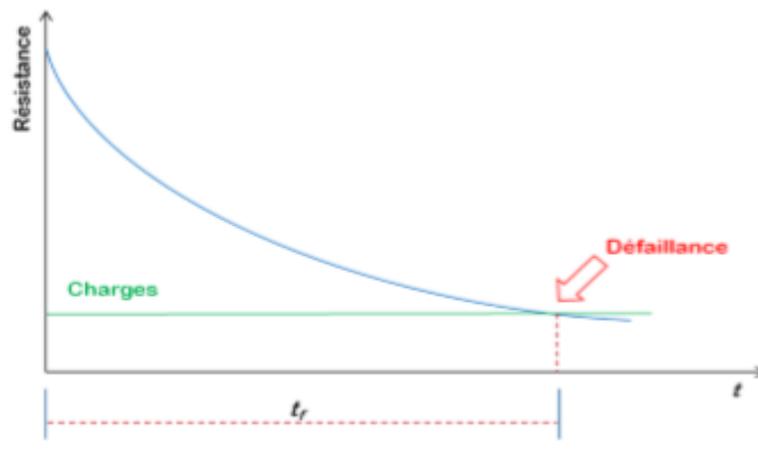
### 2.3.1 Fiabilité

Selon la norme (NF X 60-500), la fiabilité est l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant un intervalle de temps donné. Le sens de la fiabilité vient de la capacité de savoir combien de temps un élément peut fonctionner avant de tomber en panne; en d'autres mots, c'est la probabilité d'être performant. Un système est considéré fiable quand il est capable d'être performant dans des conditions d'utilisation prédéfinies et sur un intervalle de temps donné pour accomplir une fonction requise. La construction de la fiabilité des systèmes s'organise sous trois formes, prévisionnelle, expérimentale et opérationnelle. Ces trois formes consistent à prévoir la fiabilité dès le début de projet à partir d'une analyse qualitative et/ou quantitative et prendre des orientations d'optimisations en matière de conception; puis à quantifier la fiabilité à partir des essais ou des calculs pour connaître la robustesse de la conception; enfin à évaluer la fiabilité en service à partir de données du retour d'expérience et corriger les défauts de conception de processus. D'un point de vue physique, des chercheurs ont défini la fiabilité comme la probabilité que les charges appliquées sur une entité ne dépassent pas sa résistance initiale. Une défaillance se produira si les charges dépassent la résistance comme c'est illustré dans (la figure 2.2)

$$R(t) = \Pr (\text{résistance} < \text{charges}) \quad (2.1)$$

Les charges appliquées sur une entité varient au cours de temps, et peuvent être modélisées comme un variable dépendant du temps; la résistance d'une telle entité est aussi une fonction du temps. Le temps moyen jusqu'à la première défaillance est le temps le plus court avant d'avoir  $Résistance(t) < Charges(t)$ , cela peut être formulé par [39] :

$$T_f = [\min(t) [Résistance(t) < Charges(t)]] \quad (2.2)$$



**Figure 2.2** Résistance, charges, défaillances [41].

D'un point de vue mathématique, la fiabilité est définie par la probabilité qu'une entité soit non défaillante sur une durée prédéfinie  $[0, t]$ , cela veut dire que l'entité doit être en état de bon fonctionnement à  $\tau = t$  sachant qu'elle était en bon état à l'instant d'être mise en service  $\tau = 0$  ; cela représente la période de temps durant laquelle le fonctionnement est assuré. Si on considère  $(t_f)$ ; une variable aléatoire qui représente le temps jusqu'à la première défaillance, et  $(t)$  le temps actuel [41].

### 2.3.2 Maintenabilité

La maintenabilité est une caractéristique qui précise la facilité et la rapidité avec lesquelles un système peut être remis en un état de fonctionnement total avec une fiabilité correspondante à son âge. Selon (AFNOR 2001) : c'est l'aptitude d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état où il peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, en utilisant des procédures et des moyens prescrits. Selon la norme (NF X 60-500): c'est l'ensemble des actions destinées à maintenir ou rétablir une entité dans un état dans laquelle elle peut accomplir une fonction requise [7].

Le bien durable doit être apte à subir des interventions justes nécessaires et suffisantes pour assurer les performances requises pour un coût global optimum. La figure 2.3 schématise le concept de maintenabilité intégré à celui de « sûreté de fonctionnement » et devant répondre à des performances technico-économiques pour un cycle de vie (ou longévité) donné [39].

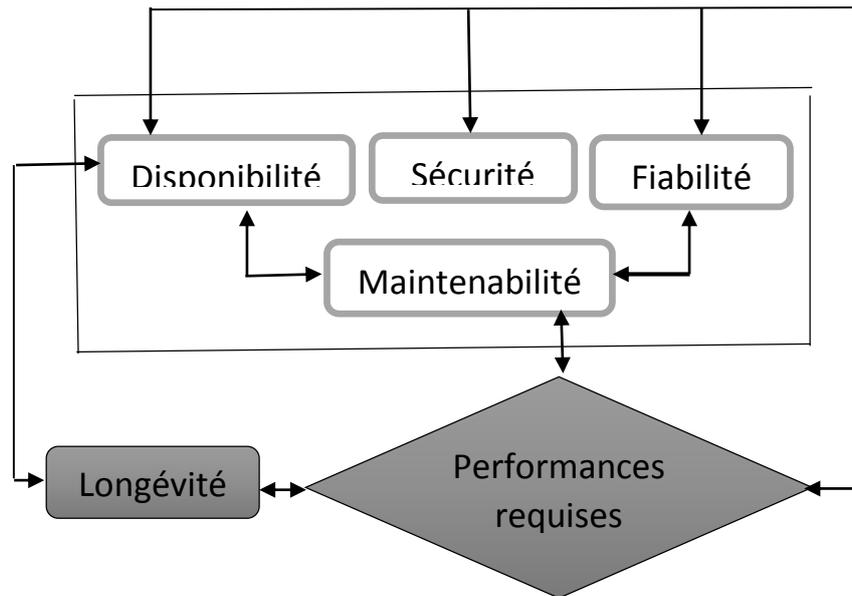


Figure 2.3 Maintenabilité et sûreté de fonctionnement [20].

### 2.3.3 Disponibilité

La disponibilité selon la norme (NF X 60-500) est l'aptitude d'un bien à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou pendant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires soit assurée. Alors que l'indisponibilité  $A(t)$  est l'aptitude contraire, c'est la probabilité que le système soit défaillant à l'instant  $(t)$  [41].

$$A(t) = \text{Pr} (\text{système est non défaillant à l'instant } t) \quad (2.3)$$

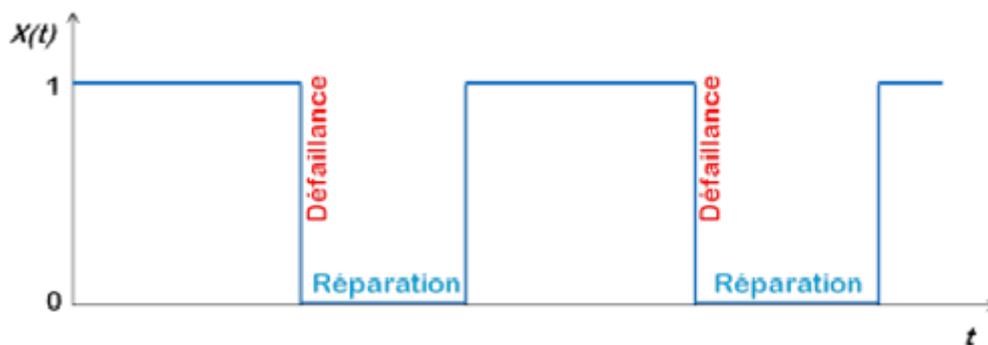
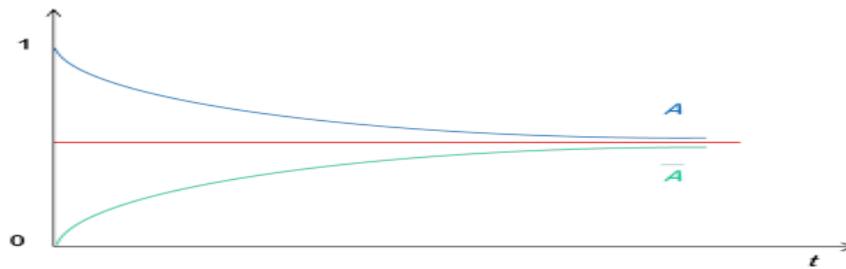


Figure 2.4 Etat du système [41].



**Figure 2.5** Disponibilité, indisponibilité [41].

Si  $X(t)$  était un indicateur qui dénote l'état d'une entité ou d'un système à l'instant  $t$  donc [7]

- $X(t) = 1$  le système est en état de fonctionnement à l'instant  $t$ .
- $X(t) = 0$  le système est en panne.

❖ Relation entre la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité

La fiabilité représente la probabilité de pouvoir fournir certaines fonctions pendant une période de temps requise sans défaillance et dans des conditions spécifiées sans prendre en considération les actions correctives qui peuvent arriver. Le tableau 2.1 est un extrait de l'ouvrage [40], on pourrait remarquer qu'une augmentation de la maintenabilité implique une diminution du temps nécessaire pour les actions de maintenance, donc une disponibilité plus importante ; on remarque aussi qu'une haute disponibilité n'implique pas forcément une haute fiabilité.

Fiabilité	Maintenabilité	Disponibilité
Constante	Diminue	Diminue
Constante	Augmente	Augmente
Augmente	Constante	Augmente
Diminue	Constante	Diminue

**Tableau 2.1** Relation maintenabilité, disponibilité, fiabilité [41].

La majorité des installations industrielles exige un besoin de disponibilité aussi important que le besoin de sécurité, les concepteurs sont donc obligés de choisir des systèmes fortement fiables, ou ils fournissent des systèmes qui sont faciles à être maintenus lors d'une défaillance ; dans les deux choix, leurs produits seront coûteux et il reste la question de comparer avec l'utilité acquise d'un produit. En conséquence, la maintenabilité est un des plus forts acteurs qui permettent aux systèmes de fonctionner en haute disponibilité opérationnelle (grâce au temps d'arrêt réduit) ce qui rend les utilisateurs satisfaits.

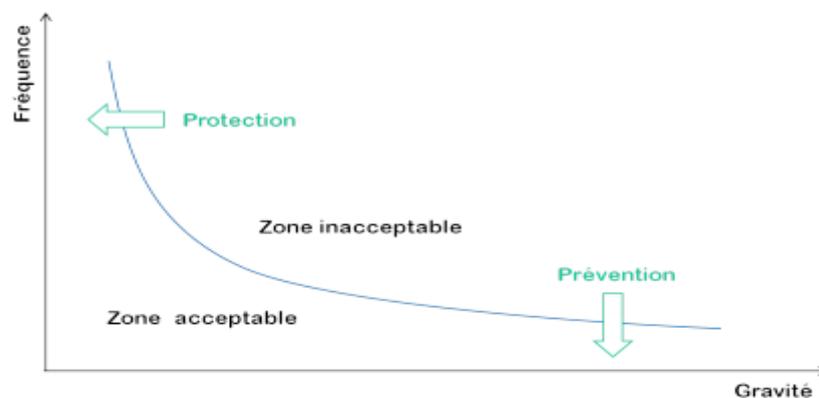
### 2.3.4 Sécurité

Selon la norme AFNOR X-06-010, la sécurité est l'aptitude d'un dispositif à éviter de faire apparaître des événements critiques ou catastrophiques. L'objectif est d'évaluer et de prévoir

l'occurrence des risques potentiels induits par l'existence même du système et qui conduiraient à un endommagement.

$$S(t) = \Pr (\text{Éviter de faire apparaître des événements critiques ou catastrophiques sur } [0, t]) \quad (2.4)$$

Lorsqu'on parle des dommages par rapport à la personne, on pourrait définir le danger comme la capacité d'un dispositif ou d'une méthode de travail de causer un dommage pour la santé, et une situation dangereuse. Selon ISO 12100-1, est la situation dans laquelle une personne est exposée à, au moins, un phénomène dangereux qui est une source potentielle de dommage. L'exposition peut entraîner un dommage, immédiatement ou à plus long terme. Alors que le risque est l'éventualité d'une rencontre entre l'homme et un danger, selon (ISO 73) c'est la combinaison de la probabilité d'un événement et de ses conséquences. Le graphe suivant (Fig. 2.6) montre les mesures de prévention des risques selon une évaluation et une analyse des risques pour connaître les modalités d'exposition. Deux possibilités de mesures peuvent être pratiquées pour réduire les risques : la protection sera obtenue par la diminution de la gravité des risques en agissant sur l'effet; alors que la prévention sera effectuée par la diminution de la fréquence d'occurrence ou la probabilité d'occurrence des risques en agissant sur leurs causes; cela peut définir deux zones différentes où certains risques peuvent être dans le niveau acceptable.



**Figure 2.6** Réduction des risques [41].

Il est impératif de distinguer entre la sécurité dans le sens innocuité et la sécurité qui signifie la confidentialité; le premier sens veut dire éviter les effets catastrophiques sur l'environnement et il est utilisé traditionnellement dans le domaine des systèmes tolérants aux fautes : c'est le fait d'être protégé ou loin de danger, alors que le deuxième sens est d'éviter la divulgation non autorisée et la modification des données, qui est une action normalement planifiée.

La présence d'un danger seul n'est pas suffisante pour définir une condition de risque, mais par contre il y aura une incertitude amenée par le danger lui-même, comme un état potentiel, se traduit en un état actuel d'endommagement. La définition qualitative du risque implique les deux notions:

$$\text{Risque} = \text{Endommagement} + \text{Incertitude} \quad (2.5)$$

En considérant  $x$  comme un endommagement donné,  $Pr$  est la probabilité d'avoir un tel endommagement, la définition quantitative d'un à risque est la suivante :

$$\text{Risque} = x.Pr \quad (2.6)$$

L'évaluation des risques se réalise par l'analyse et l'estimation des probabilités et la potentialité des risques; ces procédures sont entourées et gérées par la gestion des risques. La notion du "contrôle et de maîtrise des risques" dépend complètement du processus de prise de certaines décisions souvent concernant la gestion de ces procédures. L'objectif majeur qui caractérise le processus d'évaluation des risques est d'identifier le paramètre principal qui augmente la potentialité des risques ; de plus, il est important de comparer la performance actuelle et les exigences concernées. Les méthodes d'analyses des risques sont nombreuses, on peut citer HAZOP (Hazard and Operability study), une méthode qualitative d'analyses des risques industriels qui est une des méthodes les plus utilisées : dans ce domaine; le ETA (Event Tree Analysis), une méthode quantitative qui dépend d'un modèle logique graphique, elle est utilisée dans les scénarios des accidents dans des domaines divers; le FMEA (Failure Modes Effect Analysis) ou bien le terme français AMDE (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets) est une méthode d'analyse qualitative et de gestion de qualité de produit et de processus. Il existe encore d'autres méthodes qui traitent l'analyse de fréquences et de conséquences.

### 2.3.5 Règles de sûreté de fonctionnement

Les règles de sûreté de fonctionnement présentent une démarche élaborant les paramètres agissant sur la disponibilité et la fiabilité d'un équipement de production, présentées comme suit [7]:

a) collecter les éléments de retour d'expériences antérieures :

- des concepteurs d'ouvrage,
- des fournisseurs d'équipements,
- des exploitants internes et externes,
- de technologues et spécialistes de maintenance,

b) définir la disponibilité requise des équipements vitaux en fonction :

- des programmes de production,
- des contraintes saisonnières,
- des exigences réglementaires,

c) définir la fiabilité, par exemple :

- l'acceptation d'une certaine probabilité de défaillance générale du bien,
- la répartition dans le temps de défaillances de composants critiques,
- la densité acceptable de défaillances élémentaires,
- la fiabilité intrinsèque des organes et composants,

d) définir les règles générales de sécurité et de prévention :

- les technologies sécurisantes (spécifications particulières des équipements),
- la sécurité en exploitation,
- la protection, la sécurité des personnes,
- la sécurité des interventions de maintenance,

e) définir les règles générales de protection de l'environnement concernant :

- les rejets atmosphériques,
- les effluents, leurs évacuations,
- les déchets,

f) définir les options d'opérabilité :

- les sources d'énergies et d'utilités (électricité, eau, air, vapeur...),
- les grandes options d'architecture (redondances, degré d'automatisation...),
- accessibilité des organes de conduite, facilité d'utilisation et de réglages,
- les systèmes redondants, surcapacités.....,
- la définition des manuels d'exploitation exigibles,

g) définir les options de maintenabilité :

- les choix des matériaux et matériels adaptés aux services,
- les règles de standardisation des équipements, composants et pièces de rechange spécifiques et banales (à l'intérieur du projet et par rapport aux biens existants),
- la définition des manuels de maintenance exigibles,
- l'accessibilité générale des équipements à maintenir, de leurs composants, l'aptitude à leur démontage et remontage, les moyens de manutention, intégrés ou non...,
- la disponibilité des données documentaires et informatives,
- les préconisations des constructeurs (pièces de rechange, maintenance systématique, dépannages...),
- le degré d'assistance à la fiabilité (capteurs de surveillance des équipements, redondances, sécurités opératoires.....),

- la définition des moyens intégrés (ateliers, magasins et aires de stockage, manutention, levage, etc.),
- les engagements contractuels des fournisseurs sur des garanties de fonctionnement, de fourniture de pièces de rechange ; le suivi du bien : et de ses évolutions par le fabricant et/ou le revendeur : le service après-vente ; la disponibilité des pièces de rechanges,
- les appareils de contrôle des performances et de l'état des équipements (températures, débits, vibrations, etc.) ou assistance à la fiabilité,
- les moyens de gestion du bien (Systèmes informatiques intégrés, contrôles d'états de performances),

h) définir la durée de vie prévisionnelle, en fonction :

- du marché des produits fabriqués,
- du retour sur investissement,
- des prévisions des constructeurs,
- des expériences antérieures,

### 2.3.6 Démarches de Sûreté De Fonctionnement(SDF)

Pour obtenir des produits de qualité, fiables sur une durée déterminée, il faut s'occuper de la fiabilité à tout moment de la vie du produit : de sa gestation en bureau d'études jusqu'à son utilisation en passant par les phases de productions. Pour boucler le tout, il faut également envisager la fiabilité des méthodes assurant la qualité du produit [9].

a) Analyse du besoin/préconception /analyse de faisabilité

Utilisation de l'analyse fonctionnelle : pour obtenir un produit fiable, ce souci de fiabilité doit intervenir dès les premières études. Avant d'entreprendre la conception d'un produit, on détermine toutes ses fonctions et les critères de sûreté de fiabilité auxquels il doit répondre. L'analyse fonctionnelle conforte dès ce stade préliminaire toutes les fonctions, performances, contraintes et caractéristiques que le produit devra satisfaire.

b) Conception

Au stade de la conception, on effectue une analyse prévisionnelle de risques. Elle permet de prévoir à quels problèmes on peut être confronté dans la phase d'utilisation ou de production du produit, et de trouver dès lors des solutions assurant une sécurité et la fiabilité optimale. Les principales méthodes employées dans ce cadre sont l'Analyse Préliminaire de Risque (A.P.R), la méthode HAZOP (HAZard OPerability study), surtout utilisé dans le domaine chimique, et l'A.M.D.E.C (Analyse des Modes de Défaillances et de leur Criticité) qui sert principalement au niveau des

composantes. La sûreté de fonctionnement intègre également l'étude de la disponibilité et de maintenabilité du produit dans sa phase d'utilisation. Elle utilise des théories statistiques et probabilistes qui permettent la prévision des défaillances et les corrections à apporter au projet pour rendre le produit plus sûr.

#### c) Qualification

Elle comprend la programmation et l'exploitation des essais. Au stade de la qualification du produit, on réalise des essais qui valident les étapes précédentes ou permettent d'améliorer sa qualité. Les essais étant souvent coûteux, il est nécessaire d'utiliser une méthode planifiant de façon rationnelle. Ces essais mettent en œuvre également les techniques de conduite d'expertise en vue de déterminer les causes de la détérioration du produit. L'analyse de ces causes permet d'envisager par la suite (phase de production) des actions correctives empêchant la réapparition des détériorations. L'expertise est un outil d'amélioration de la fiabilité, nécessaire pour la qualification d'un produit.

#### d) Production

Pour assurer la stabilité de la fabrication des produits, on met en œuvre des outils statistiques qui permettent de prévenir les phénomènes de dérive en maîtrisant les procédés de fabrications. C'est l'objet de la MSP (Maîtrise Statistique des Procédés). Cette méthode assure la fiabilité du produit en assurant la fiabilité des procédés. D'autre part, la méthode du « Juste à temps », en permettant de gérer le temps réel la production, temps de réaction sont minimisés et la flexibilité très importante.

### 2.3.7 Méthodes principales d'analyse de la sûreté de fonctionnement

L'analyse est l'évaluation de la sûreté de fonctionnement se fait à l'aide de plusieurs méthodes présentes dans la littérature. En fait, ces méthodes peuvent être classées en deux catégories ; méthodes classiques (AMDEC, APR, AMDE,...) nous les avons présentés dans le tableau (2.2), et des méthodes qui prennent en compte de manière satisfaisante la dynamique des variables continues et répondent essentiellement à des méthodes classiques [30].

Méthodes	Inductive/déductive	Quantitative/Qualitative	Phase- clé
Analyse Préliminaire des Risques(APR)	Inductive	Qualitative	Repérer a priori les risques à étudier
Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE)	Inductive	Qualitative	Recenser les conséquences des défaillances
Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leurs Criticités (AMDEC)	Inductive	Quantitative	Evaluer les conséquences des défaillances
Arbre de causes	Déductive	Qualitative	Organiser les éléments ayant contribué à un accident
Arbre d'évènement	Inductive	Quantitative	Évaluer les conséquences possibles d'un évènement
Arbre de défaillances	Déductive	Quantitative	Évaluer les scénarios d'un accident potentiel

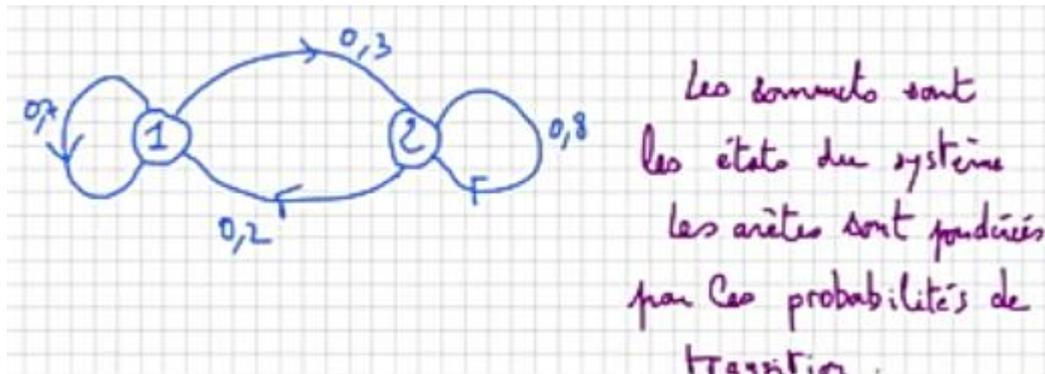
**Tableau 2.2** Méthodes classiques d'analyse de la sûreté de fonctionnement [29].

La deuxième catégorie des méthodes de modélisation sont aussi classées en deux points de vue : des méthodes qui permettent de décrire les aspects de dysfonctionnement (les réparations et les défaillances) et le comportement des équipements en présence de dysfonctionnement, et les méthodes qui permettent la description comportementale des systèmes dynamiques.

### 2.3.7.1 Graphes de Markov

La modélisation avec cette méthode permet de prendre en compte les dépendances temporelles et fonctionnelles beaucoup plus que les méthodes classiques. En effet, l'existence d'une défaillance de mode commun entre composants en redondance s'exprimera simplement par l'ajout d'arcs supplémentaires entre états du système correspondant au fonctionnement simultané de ces deux composants et les états où ils sont tous les deux défaillants, quant aux réseaux de Pétri stochastiques, l'utilisation de cette méthode permet de prendre en compte, de manière plus structurée que dans les graphes de Markov, l'occurrence des défaillances et leur influence sur le comportement

du système. Ils sont obtenus à partir des réseaux de Pétri classiques [39] en associant des durées de franchissement aléatoires aux transitions [21].



**Figure 2.7** Graphe de Markov.

### 2.3.7.2 Simulation de Monte Carlo

C'est une méthode numérique basée sur le tirage de nombres aléatoires [16]. Elle permet d'estimer l'espérance mathématique d'une variable aléatoire qui est une fonction de plusieurs paramètres. Son utilisation dans les études de sûreté de fonctionnement permet de lever l'hypothèse markovienne et permet ainsi de traiter des systèmes à l'échelle industrielle.

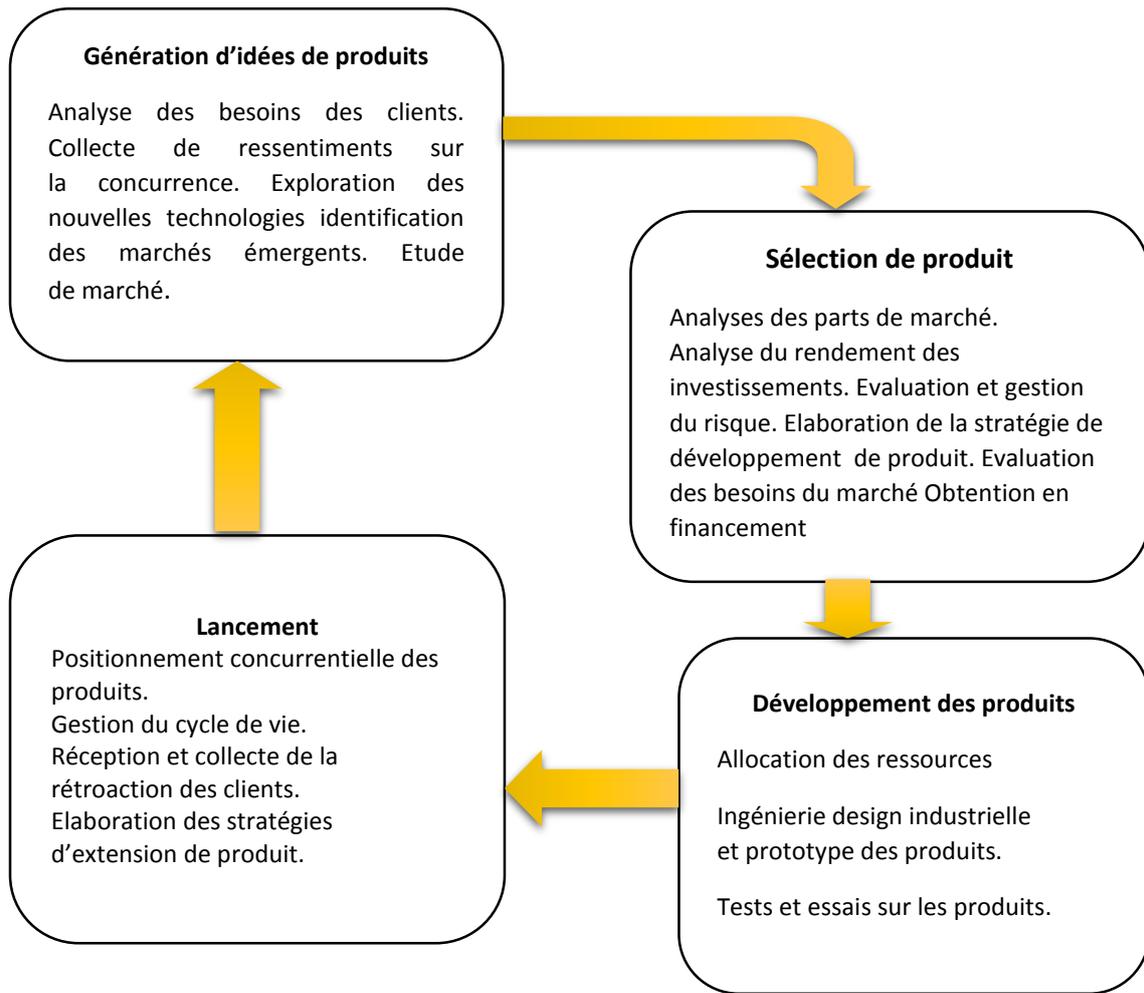
### 2.3.7.3 Méthode des graphes de flux dynamiques DFM (Dynamic Flowgraph Methodology)

C'est une technique de modélisation et d'analyse pour étudier les risques des systèmes embarqués (systèmes de contrôle numérique). Elle a été utilisée dans les études de risque des systèmes aérospatiaux et nucléaires. Cette approche a pour but d'identifier les scénarios redoutés et d'élaborer une stratégie de test des systèmes étudiés. Elle permet de prendre en compte l'aspect dynamique des systèmes embarqués et l'interaction entre la partie logicielle et la partie matérielle des systèmes [13].

## 2.4 Processus de conception

L'activité de conception va de l'émergence de l'idée à la définition détaillée du produit ou du procédé en incluant une phase en conception préliminaire.

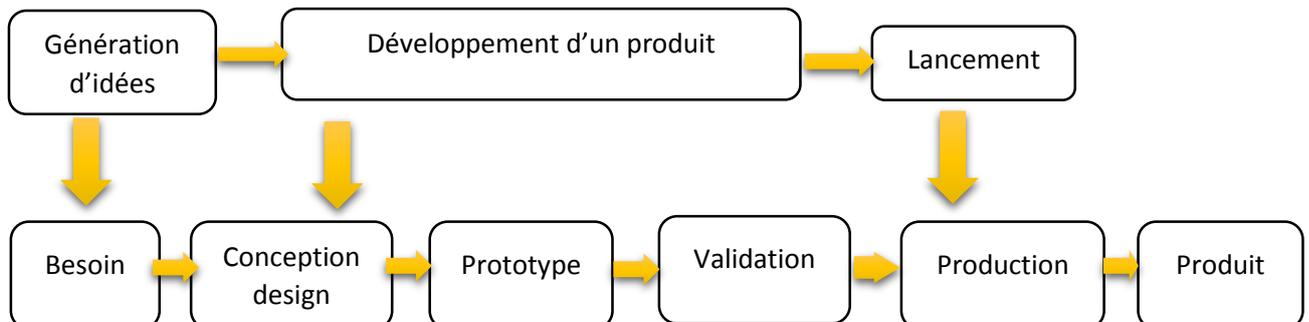
Le processus de conception, recherche le développement de produits comporte quatre étapes : la génération d'idées de produits, la sélection de produits, le développement de produits et le lancement [44].



**Figure 2.8** Processus de conception [43].

Une approche schématique de la démarche de conception d'un produit industriel est basée sur quatre étapes clés précédant l'industrialisation :

- étude du besoin ;
- étude de faisabilité ;
- études préliminaires (proposition d'un maximum de solutions répondant au problème ou à une partie) ;
- études détaillées (optimisation, validation du concept et réalisation du produit).



**Figure 2.9** Pérennisation de la chaîne de production [44].

### 2.4.1 Paramètres de conception

Concevoir suppose de définir le problème. Une part importante de l'activité de conception est consacrée généralement à la structuration du problème et le reste, à la recherche de la solution.

Cette participation du concepteur à la structuration du problème et à sa reformulation provient du fait que les données de base du problème sont rarement complètes, insuffisantes, et pertinentes.

Les réponses à un problème de conception sont souvent multiples. Les concepteurs travaillant en groupe ont alors à faire des choix de solutions alternatives qu'ils devront évaluer en fonction de critères validés par le demandeur du produit, et du poids de ces critères. Ce processus d'évaluation intervient tout au long du cycle de conception d'un produit. Parmi ces techniques d'évaluation pondérée des solutions par rapport aux besoins du client, on peut citer par exemple, le Quality Function Deployment (Q.F.D). Le déploiement des fonctions qualité, se compose d'un ensemble de programmes de planification et de communication. Cette méthode est née dans les entreprises japonaises au début des années 70. Le déploiement de la fonction qualité se compose de trois éléments indissociables [9] :

- une équipe pluridisciplinaire ayant en charge le projet du début à la fin.
- l'écoute du marché visant à témoigner des besoins des "clients – futurs utilisateurs", ainsi que des exigences du type réglementations, standards, législation des et options stratégique, contraintes d'entreprise d'autre part.
- de supports graphique, appelés "Maison de qualité" s'enchainant les uns aux autres. Ces supports graphiques permettent de mettre en correspondance deux séries de données devant répondre les unes aux autres et d'évaluer la qualité de cette réponse.

Son utilisation facilite la communication de l'information, au sein d'une équipe chargée d'un projet et dans l'entreprise. Sa mise en œuvre exige cependant de gros efforts et une grande disponibilité des esprits, car la masse, à la nouveauté et la précision des informations requises pour alimenter efficacement la "première Maison" est important.

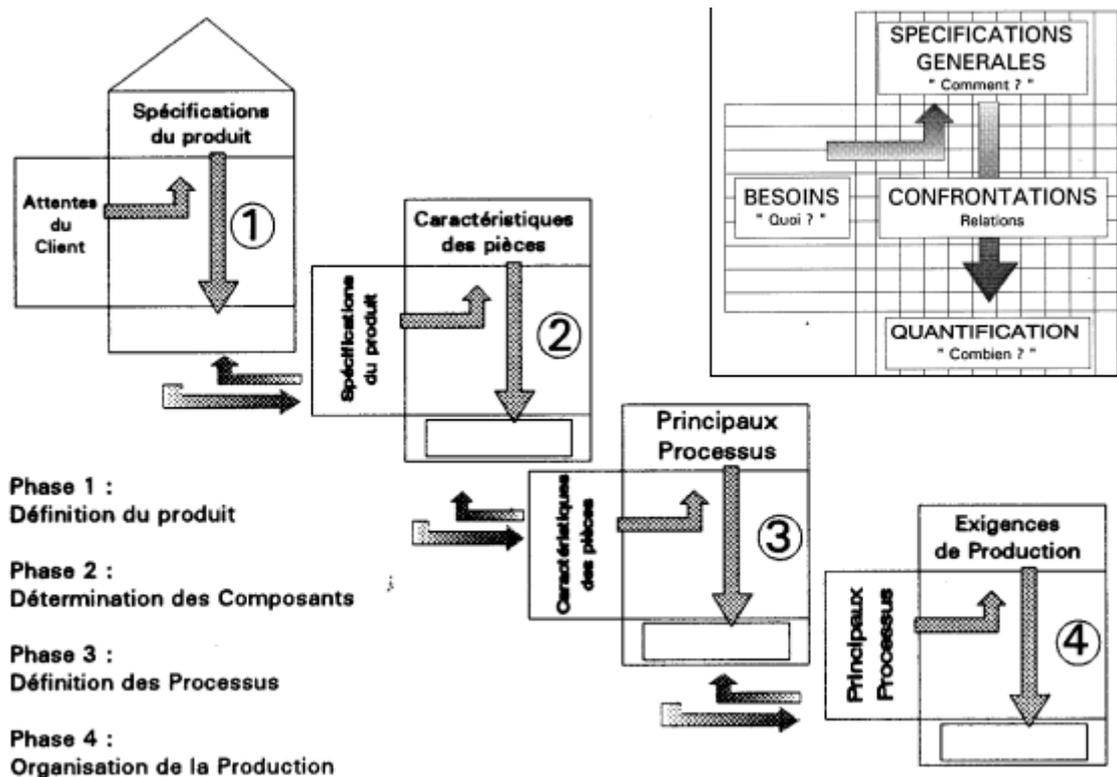


Figure 2.10 Schéma du « Quality Function Deployment » (QFD) [9].

## 2.4.2 Phases et démarche pour la conception d'un équipement

Dès qu'un investissement est décidé par un industriel, une démarche doit immédiatement être entreprise pour que le futur équipement soit conçu, réalisé, environné et exploité dans les conditions optimales de disponibilité et de coût, il s'agit donc de préparer et de mettre en œuvre les moyens en personnels, matériels, organisationnels et logistiques nécessaires et suffisants pour favoriser un niveau de maintenabilité et opérabilité requis, les performances attendues sur une durée de vie optimale [7].

Les démarches de conception d'un produit sont nombreuses de cette diversité, on peut déterminer deux classes de démarches :

- démarches cartésiennes : linéaires, séquentielles.
- démarches systémiques : simultanéité, globalité.

De même que pour la modélisation d'un produit, ces deux approches cohabitent souvent dans les entreprises et sont facteur d'ambiguïté et d'incompréhension entre les différents acteurs de la conception de produits. Ces deux classes de démarches puisqu'elles participent à la complexité du processus de conception, et illustrent les difficultés de communication que l'on peut rencontrer dans une entreprise lorsque l'on parle de démarche de conception.

### 2.4.2.1 Démarches « cartésiennes » : linéaires, séquentielles

Les démarches cartésiennes sont basées sur la décomposition des travaux de conception en éléments simples. Ces éléments sont étudiés séparément puis réunis de nouveau dans une synthèse. Cette approche aboutit à proposer une démarche de conception décomposée en phases. Ces phases sont-elles même décomposés en étapes, voire en sous-étapes jusqu'à la définition de tâches élémentaires. Cette démarche descendante propose une planification du projet de type hiérarchique.

### 2.4.2.2 Démarches systémiques : simultanée et globalité

Les démarches systémiques proposent de modéliser l'activité de conception en vue d'apporter la connaissance sur la réalité organisationnelle de l'entreprise. Cette activité est comprise comme étant un système s'insérant dans l'ensemble des autres systèmes de l'organisation. Selon les chercheurs, un système est « un ensemble d'éléments en interaction dynamique organisé en fonction d'un but » [9].

L'approche systémique est une démarche intellectuelle de réflexion et de synthèse, contrairement à l'analyse qui est une démarche intellectuelle de connaissance. L'analyse aide à distinguer les choses qui ont une nature (aspect) apparemment identique alors que l'approche systémique permet de mettre en évidence ce qui rassemble des choses de nature différentes, en dégagant ce qui les lie et les hiérarchise. Elle aide à trouver les « ensembles » et est complémentaire à l'analyse en mettant en évidence ce sur quoi l'analyse doit porter et les limites de l'analyse. L'approche systémique s'intéresse au « quoi faire » plutôt qu'au « comment faire » [8].

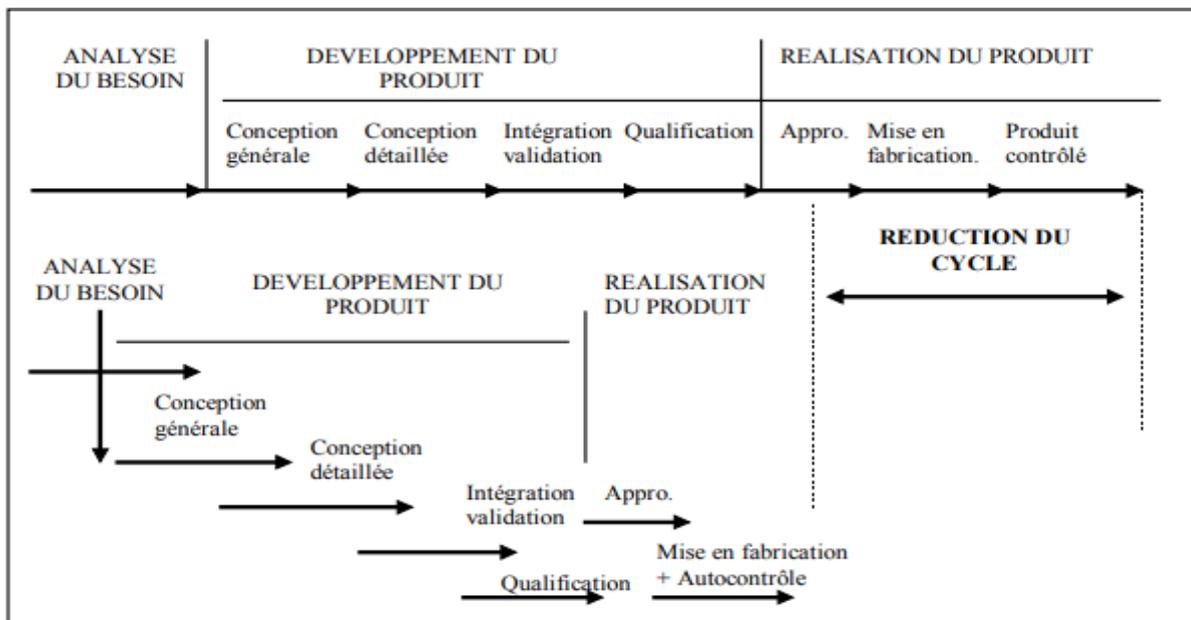


Figure 2.11 Du séquentiel vers le simultané [9].

## 2.5 Connaissance des équipements et leurs comportements

### 2.5.1 Méthodologie du diagnostic

#### a) Définitions relatives au diagnostic AFNOR

- Diagnostic de panne : « action menées pour la détection de la panne, sa localisation et l'identification de la cause ».

- Localisation de panne : « action menées en vue d'identifier le bien en panne au niveau de l'arborescence appropriée ».

- Panne : « état d'un bien inapte à accomplir une fonction requise ».

#### b) Autres définitions

Rappel de la définition AFNOR du diagnostic : « identification de la cause d'une défaillance à l'aide d'un raisonnement logique ».

Rappel de la définition de l'expertise : « identification du mécanisme d'une défaillance ».

A partir des définitions, on peut dire :

- l'aspect cognitif du diagnostic « activité cérébrale »

La définition AFNOR servira notre propos par sa référence à l'aspect cognitif du diagnostic qu'est un « raisonnement logique » et par son caractère généralisé : le diagnostic ne concerne pas uniquement les pannes, mais n'importe quelle « anomalie » constatée (en gestion de maintenance en particulier).

- l'enjeu lié à la réalisation d'un diagnostic

Le diagnostic permet une amélioration : c'est une panne résolue. Cela est fondamental en maintenance : le diagnostic contient et dépasse la localisation, mais lui seul contient une potentialité de progrès par des actions sur la ou les causes.

- l'arborescence des causes

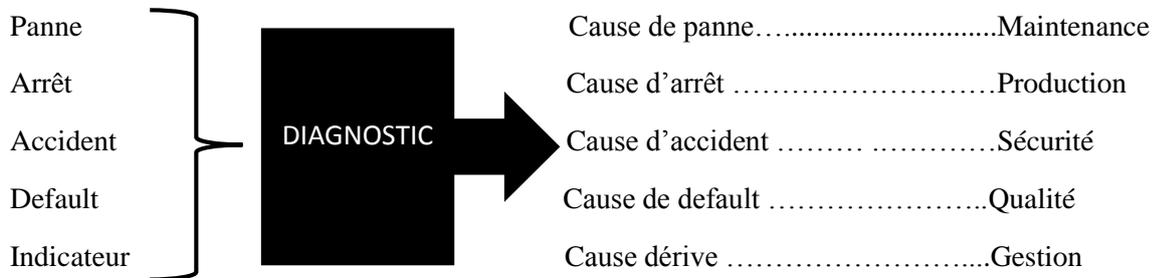
A partir d'une défaillance, il est possible de construire un arbre des causes conjuguées, intrinsèque et extrinsèques, par niveaux successifs : quelles sont les causes de la cause ?

- expertise et diagnostic :

Le diagnostic concerne la recherche des causes des niveaux bas de l'arborescence. L'expertise est la recherche des causes « premières » par approfondissement des niveaux supérieurs de l'arbre des causes [21].

### 2.5.2 Champ d'application de la méthode du diagnostic

Il est facile de vérifier la similitude de tous les outils d'analyses liés à la compréhension ou à la prévision des anomalies des domaines listés à la figure 2.11. Il en est de même pour la méthodologie du diagnostic.



**Figure 2.12** Champ d'application du diagnostic [20].

### 2.5.3 Environnement des équipements

D'abord dès l'école maternelle, l'enfant trouve normal que la salle de classe qu'il a laissée sale et en désordre le soir soit clair et nette le matin. Il est normal qu'on fasse ce travail en se levant à cinq heures du matin. On ne concerne même pas l'enfant : il l'ignore... et la suite de notre histoire éducative, sauf exception, est dans la même logique.

Par la longue histoire industrielle, ensuite : le niveau d'exigence à cet égard ayant longtemps été maintenu au strict minimum : éponger une fuite d'huile sur le sol, remplacer un carreau cassé.

Les habitudes corporatistes sont intéressantes à observer, dans le cadre de la relation homme/machine, car elles sont très contrastées, allant du : «Je suis payé pour fraiser, pas pour nettoyer la fraiseuse » au respect de l'outil, voire à l'appropriation de la machine. Pensons au rail, à « la bête humaine », à ces locomotives à vapeur, salissantes mais souvent maintenues rutilantes par la fierté de leurs conducteurs.

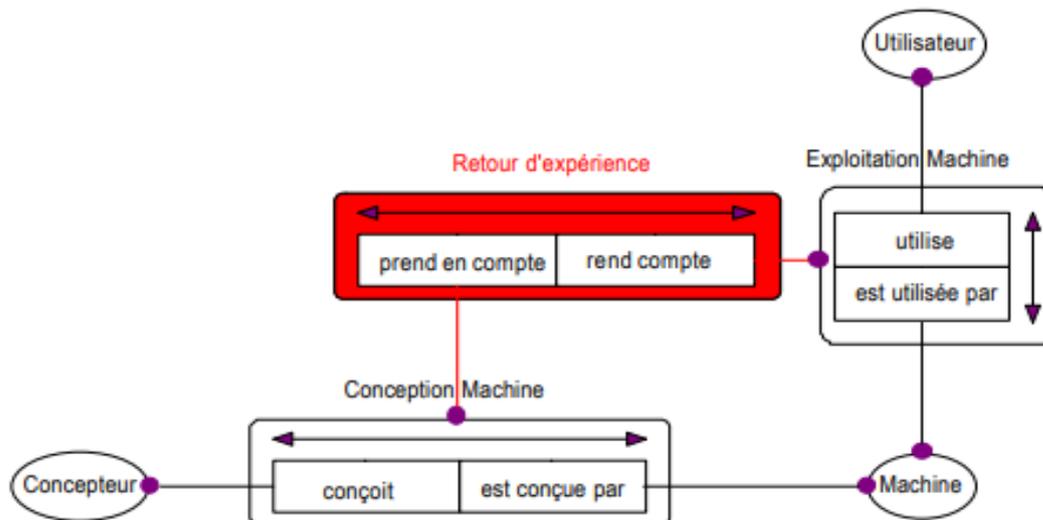
En voile de compétition, la performance passe par un plan de pont simple, clair et fonctionnel, par une carène très propre et par un rangement soigné de tous les accessoires en attente [7].

Suite à cette discussion on peut penser :

- que la qualité de l'environnement d'un équipement de production conditionne sa performance.
- que l'obtention de cette qualité d'environnement passe par la motivation, le soin et la rigueur des utilisateurs de cet équipement.

### 2.5.4 Notion de Retour d'Expérience (REX)

La notion de cahier des charges n'étant pas suffisants ; les bureaux d'études en développe le principe de retour expérience direct afin de mieux comprendre comment une machine est exploitée. Ce retour d'expérience permet de déceler quelles sont les erreurs à ne plus commettre et de prendre en compte tout au long de la conception les attentes en exploitation.



**Figure 2.13** Emergence d'une relation (Conception machine / Exploitation machine) [2].

Chaque concepteur conçoit une ou plusieurs machines. Chaque machine est conçue par un ou plusieurs concepteur, chaque machine est utilisée par un ou plusieurs utilisateur, chaque utilisateur utilise une ou plusieurs machines, une conception de machine est définie de manière unique par le couple « concepteur / machine ». Une exploitation de machine est définie de manière unique par le couple (utilisateur machine) chaque conception de machine prend en compte une ou plusieurs exploitation de machine chaque exploitation de machine rend compte d'une ou plusieurs conception de machine un retour d'expérience est définie de manière unique par le couple (conception de machine exploitation de machine) [2].

Cette activité permet donc de prendre en compte les erreurs répétables ainsi que les oublis dans le but de capitaliser les corrections afin de les prendre en compte dès la conception. Chaque nouvelle conception d'équipement montre l'intérêt de la capitalisation de la connaissance dans un but de réutilisation et illustre sa proposition pour l'aide à la supervision des procédés automatisés complexes. Toutefois, ce domaine du retour

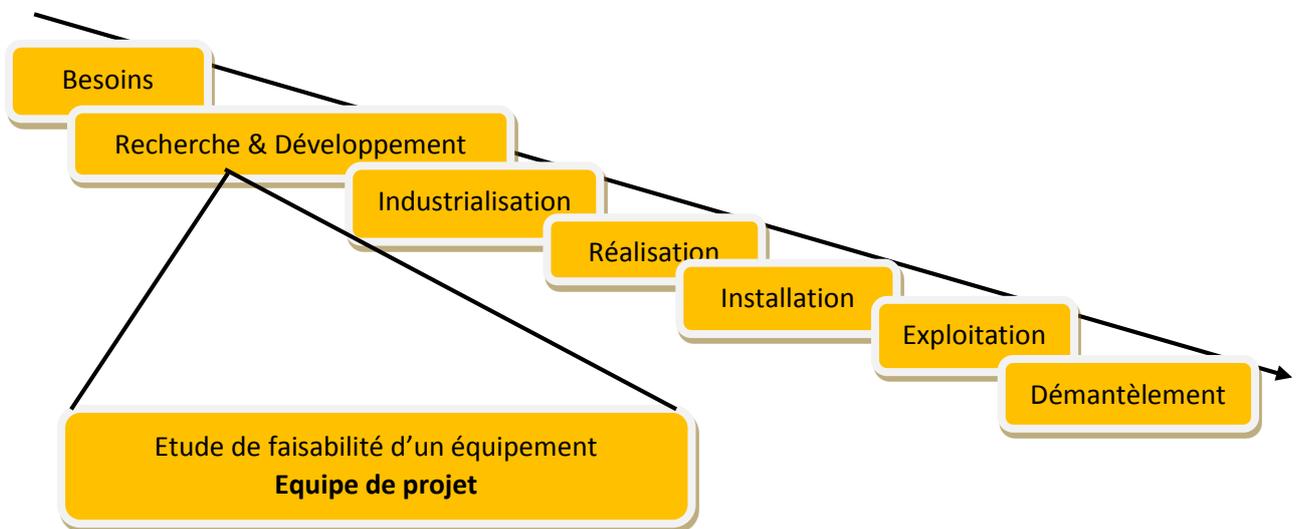
d'expérience n'est pas clairement identifiable car, bien souvent, il fait partie intégrante du domaine de la conception donc réalisé par l'équipe de conception.

Toutes ces activités, intégration des besoins utilisateurs, rédaction commune de cahier des charges et retour d'expérience, démontrent une volonté d'intégrer au plus tôt dans la conception les contraintes mises en évidence par l'exploitation [2].

### 2.5.5 Analyse de cycle de vie d'un équipement

Le cycle de vie d'un équipement se décompose en sept phases principales [18]:

- expression du besoin d'un équipement
- recherche et le développement de l'équipement
- industrialisation
- réalisation
- installation et la mise en service
- exploitation
- démantèlement



**Figure 2.14** Phases de cycle de vie d'un équipement [18].

### 2.5.5.1 Expression du besoin

C'est l'étape de départ où sont spécifiés les besoins exprimés par le demandeur ou client. Ces besoins correspondent à des objectifs associés à des critères qualitatifs. Il est souhaitable d'avoir le plus de précisions sur les critères quantitatifs de performance. Lorsque ce n'est pas le cas, c'est à l'étude de faisabilité de les fournir. Les besoins concernent des actions des cinq fonctions de base: Transformation, déplacement, stockage, contrôle et attente.

Les actions sont souvent exprimées par des verbes. Un verbe représente la fonction globale du système à étudier. Les besoins sont formalisés dans un cahier des charges fonctionnel. Ce document va s'enrichir jusqu'au démantèlement du système.

La juste détermination des besoins est la condition sine qua non à un juste coût. Un des objectifs donc par itération et par projection de définir ces stricts besoins.

L'analyse des besoins nécessite la comparaison avec des systèmes existants proches de celui à concevoir. Une mesure des gains attendus du nouveau système permet également de les comparer.

L'outil connu sous le nom de (benchmarking) est souvent employé dans cette phase. Nous empruntons la définition du (benchmarking) [18] : action continue de comparaison d'un processus, produit ou service avec une activité similaire réputée la meilleure, afin de fixer des objectifs et des actions d'amélioration ambitieux mais réalistes, pour devenir et rester les meilleurs des meilleurs en un temps raisonnable.

Le benchmarking permet de valider l'intérêt de la conception d'un nouveau système et fournit les solutions existantes avec les contraintes de coût et de performance.

### 2.5.5.2 Recherche et le développement du système

Dans ces activités, nous cherchons des principes et des procédés qui permettent avec une technologie existante ou à créer de réaliser techniquement les fonctions du système issues des besoins du client. Ces fonctions associées à des critères de performances, deviennent des contraintes plus ou moins importantes du problème posé.

Lorsqu'une solution est envisagée, une vérification de propriétés ou de protection est faite en consultant différentes bases de données de brevets, pour ne pas exploiter commercialement des solutions protégées. Le cas échéant, une protection de la solution trouvée est déposée.

Dans cette recherche, il est nécessaire en fonction des principes et des procédés capables de satisfaire aux besoins, de tester, de démontrer la faisabilité industrielle de ces solutions.

Cette faisabilité est une étude particulière où le temps est un paramètre difficile à quantifier. Les travaux de spécifications, de dessins, de calculs... sont des tâches évaluables en temps par habitude, par référence, par comparaison, où par détermination à l'aide d'outils de gestion de projet, mais là où interviennent la créativité, l'association d'idées, la recherche dans des bases de données, dans des systèmes plus ou moins informatisés, les délais ne sont pas évaluables par calcul, il faut déterminer une enveloppe de temps et augmenter les chances de trouver en négociant avec le client (augmentation des ressources humaines, appel et des experts).

Ce dimensionnement peut faire appel au partenariat entre le client et l'équipe d'ingénierie pour pouvoir éventuellement être élastique. Néanmoins, il serait intéressant de disposer de données permettant de prévoir un montant des ressources et un planning.

Dans le cas où plusieurs solutions sont proposées par la recherche ; il est nécessaire de choisir la plus adéquate à développer [7]. Il faut donc des critères de choix. La phase finale de la recherche est la suite de la rédaction du cahier des charges pour pouvoir aborder le développement.

Le développement s'effectue ensuite à partir de ce cahier des charges. Cette phase est également appelée études. Un certain nombre de travaux de calcul, de détermination géométrique, d'optimisation, de dimensionnement vont être réalisés par le bureau d'études. Au cours de la recherche et du développement, il est nécessaire de valider un certain nombre de solutions, il faut donc réaliser des simulations, fabriquer des maquettes ou des prototypes [18].

### 2.5.5.3 Méthodes et Industrialisation

Elles consistent à transformer des résultats des études en un système réel, supportant les contraintes de la production. D'autres études de faisabilité sont alors réalisées dans des domaines spécifiques tels que: coût de réalisation, maintenance, fiabilité....

### 2.5.5.4 Réalisation

Elle comprend la réalisation des pièces de structures et de mécanisme puis le montage ou l'assemblage des éléments avec des composants achetés et enfin les câblages, la programmation de la partie commande.

Un certain nombre d'outils et de méthodes de suivi de projet sont utilisés par les clients pour s'assurer du respect des cahiers des charges et surtout des détails spécifiés [18].

### 2.5.5.5 Installation, exploitation et démantèlement

Elles suivent la validation de la réalisation avec une montée en cadence progressive ; souvent les critères employés sont liés aux pièces réalisées en présérie. D'autres fonctions telles que la maintenance, la qualité, le suivi de production prennent une importance croissante.

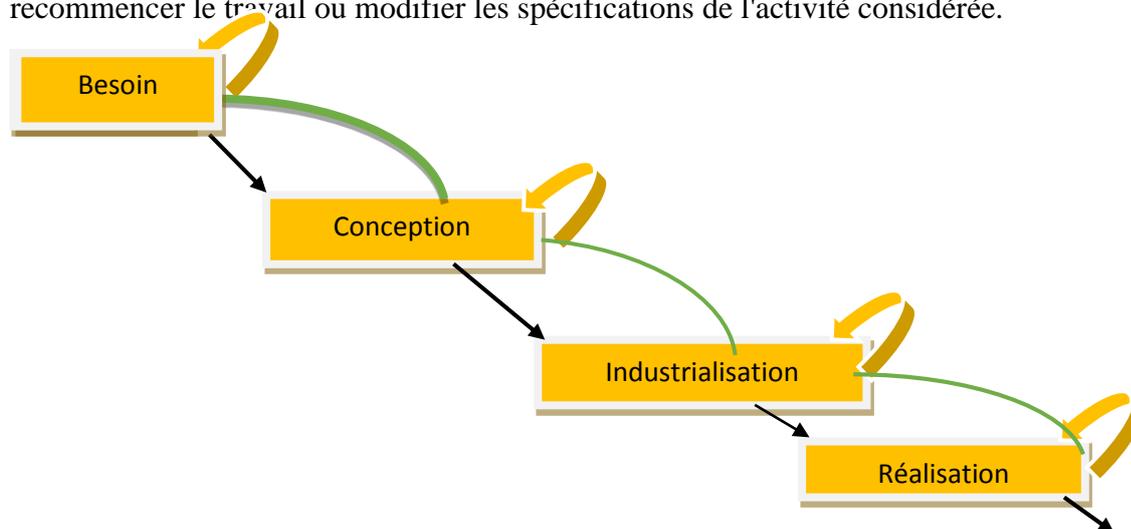
## 2.6 Modèles de cycle de vie

Des modèles de cycle de vie existent et présentent certains intérêts vis à vis des différents métiers nécessaires à la réalisation d'un système de fabrication ou des différentes phases des cycles de vie. Ces modèles décrivent les différentes phases depuis la demande par un client jusqu'à la réalisation du système.

Il est important d'analyser les différents cycles pour déterminer leur adéquation avec la phase de faisabilité et leur réutilisation en conduite d'étude [18].

### 2.6.1 Modèle en cascade Waterfall

Ce modèle déroule les étapes successives de la vie d'un système suivant la représentation d'une cascade. Dans les cas de corrections sur une étape ou sur l'étape précédente, il faut recommencer le travail ou modifier les spécifications de l'activité considérée.



**Figure 2.15** Modèle Waterfall [18].

C'est un principe de base avec une démarche linéaire qui n'est pas adapté à l'ingénierie de systèmes de fabrication, dans lesquels travaillent plusieurs métiers sur plusieurs sous-ensembles. Par contre sa représentation est simple et limitée.

Les intérêts de cette démarche pour la conception des équipements sont:

- la similitude entre la linéarité et le déroulement réel des travaux réalisés par une seule personne.

- la simplicité de mise en œuvre.

### 2.6.2 Cycle de vie en V

C'est en fait un cycle en cascade possédant deux parties. L'une descendante qui détaille le développement des phases principales de spécifications et de conception. L'autre partie ascendante où sont mises en vis à vis les étapes de test, d'évaluation et d'implantation. C'est la phase de réalisation. C'est une approche d'activités à mener en parallèle puis à intégrer au système. L'axe horizontal est l'axe du temps et correspond à l'ordre des phases principales.

Ce modèle est adapté à la conception-réalisation de parties de commande comportant des développements des logiciels. Des tests des évaluations sont réalisés en plate-forme avec une partie opérative simulée. Ce cycle présente un double parallélisme:

- un parallélisme dans certaines phases de la partie commande,
- un parallélisme entre la conception-réalisation de la partie opérative et de la partie commande.

Cependant que le parallélisme ne démarre qu'en phase de conception, c'est-à-dire après la phase de faisabilité. Ce modèle dédié à la partie commande, ne détaille pas le cycle de conception de la partie opérative qui est le principal souci en étude de faisabilité de fonctionnement [18].

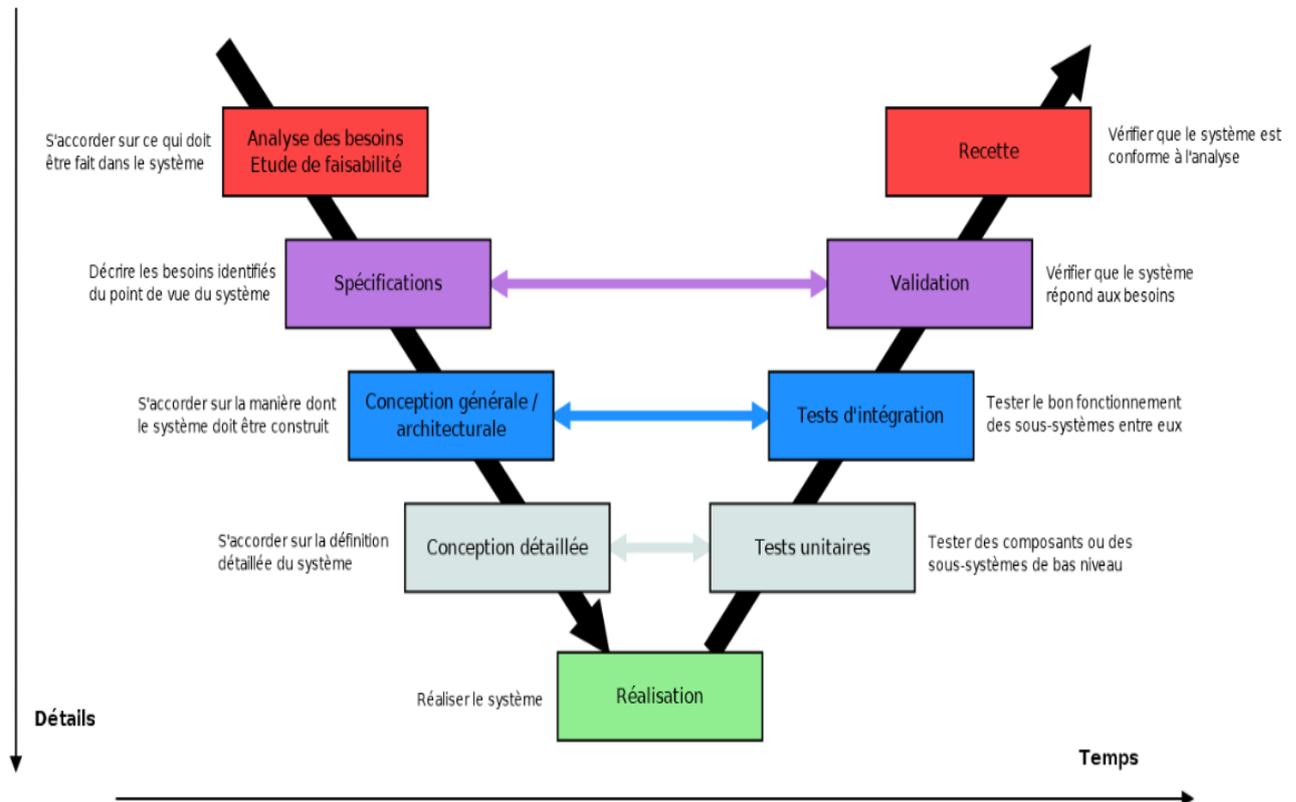


Figure 2.16 Cycle de vie en V [18].

### 2.6.3 Modèle contractuel

Ce modèle est issu des relations entre un client et un fournisseur dans le cadre d'un développement de produit. Ces relations sont nécessaires lors de l'expression de besoins mais également tout au long du processus de développement.

La validation d'une phase par le client permet de passer à la phase suivante, c'est la satisfaction aux termes du contrat. Cette satisfaction passe par la réalisation de preuve de la part du fournisseur, et pose le problème de l'évaluation. Ce sont des tâches difficiles dans les étapes de formalisations, de spécifications, de dessins ou autre activité virtuelle. Un partenariat entre client et fournisseur doit atténuer ce besoin de preuve. Cette représentation ne permet pas de visualiser les différents métiers ainsi que les différentes Sous-parties d'un système de fabrication. D'autre part, l'aspect faisabilité n'est pas mis en évidence [18].

### 2.6.4 Modèle spirale

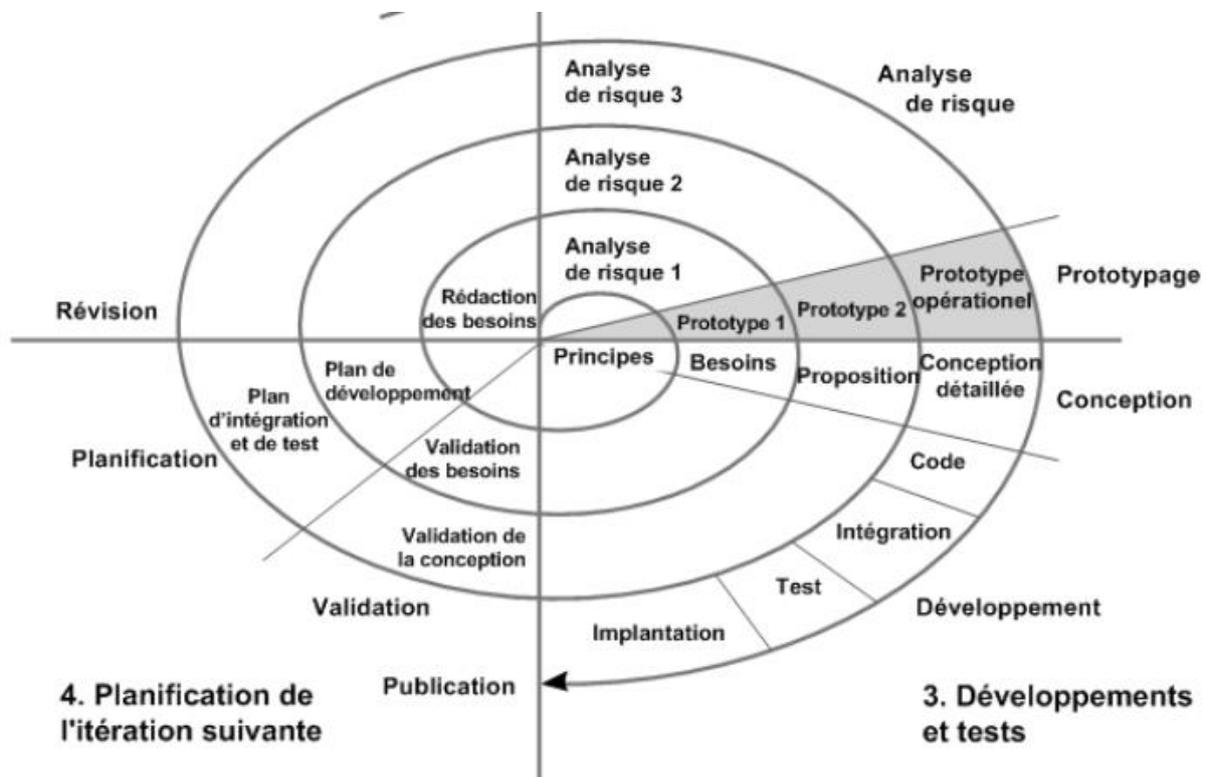
Ce modèle est un processus itératif décrivant le développement en quatre phases et montrant les différentes approches: expression des besoins, faisabilité, prototypage

et développement qui n'étaient pas vue dans les autres modèles. Chaque quadrant correspond à une phase [18] :

- la planification des phases ultérieures,
- la définition des objectifs, des variantes et des contraintes,
- l'évaluation de solutions et l'analyse des risques,
- le développement et la vérification du produit.

La distance d'un point de la courbe au centre représente le coût cumulé à ce stade du développement.

L'évaluation de la solution est faite systématiquement par la réalisation d'un prototype, ce qui n'est pas possible dans tous les cas de système de fabrication.



**Figure 2.17** Modèle spirale [18].

Le modèle spirale est bien adapté à la conception de produit mais ne présente pas tous les aspects métiers et sous-ensembles d'un système.

## 2.7 Calcul du coût global

On appelle un coût global d'un équipement c'est le résultat d'addition de deux critères [31] :

- coûts d'exploitation : ils sont constitués par le coût de toutes les dispositions prises par le propriétaire du bien pour assurer une production ou la satisfaction d'une clientèle. On isole généralement :

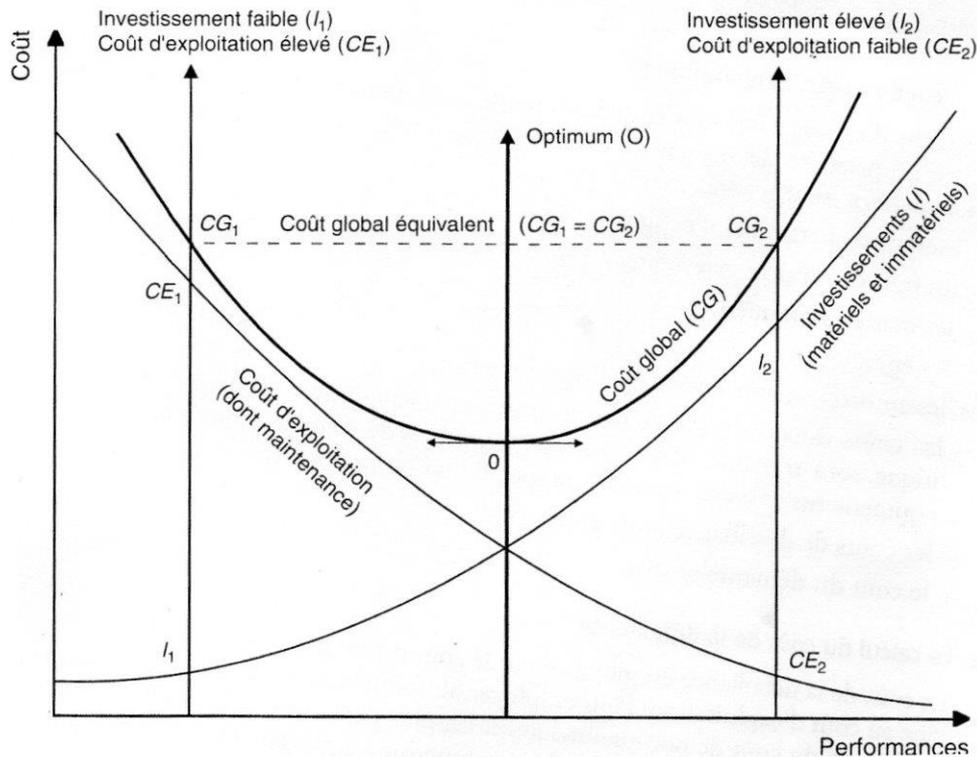
- faits de personnel d'exploitation.
- faits de services extérieurs, y compris les assurances.
- matières premières.
- énergies.
- amortissements des biens équipements, etc.

- coûts de défaillances : le coût de défaillance est globalement le coût d'indisponibilité du bien. Il participe au coût d'exploitation, il s'agit aussi du coût de non-maintenance. En plus des pertes subies, il faut y rajouter le coût de rétablissement du bien dans sa fonction. Le coût peut être ramené à l'unité de temps ou de l'unité d'usage du bien. Il peut se décomposer en :

- coût immédiat mesurable
- frais fixes ou part des frais généraux d'entreprise (temps d'indisponibilité)
- coût induit (impact d'accident, absentéisme...)
- coût direct de la maintenance curative pour rétablir le bien
- coût indirect difficile à mesurer mais souvent majeurs (impact sur l'environnement, effets médiatique...).

Le coût global du cycle de vie est l'ensemble des coûts engendrés pendant la vie d'un bien pour un usage donné, c'est la somme des coûts d'exploitation et de défaillances :

- les valeurs d'investissement : achat du bien proprement dit, y compris études et installation ;
- les investissements immatériels : études et méthodes justifiées par la sûreté de fonctionnement.
- les coûts d'exploitation incluant celles de maintenance, des défaillances et du démantèlement.



**Figure 2.18** Maîtrise du coût global [7].

## 2.8 Logiciels de Conception Assistée par Ordinateur (CAO)

### 2.8.1 Positionnement des logiciels de CAO

Les logiciels comme AutoCAD sont très connus du fait de leur ancienneté sur le marché de la CAO. AutoCAD a permis, il y a 30 ans, de passer de la planche à dessin à la conception de plans sur ordinateur. De fait, AutoCAD est encore aujourd'hui un logiciel très utilisé dans la conception de plans 2D bien qu'il intègre des fonctions 3D nativement depuis plusieurs années.

D'autres logiciels de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) sont également très présents sur le marché avec un positionnement différent d'AutoCAD. La représentation 3D d'un équipement est donc très accessible sans effort de projection mentale.

Enfin des logiciels comme (DraftSight) se positionnent sur un prix plus agressif afin de séduire les agences et cabinets au budget plus modeste [52].

### 2.8.2 Utilité d'un logiciel de CAO

Avec la DAO, on réalise de simples plans avec une assistance par ordinateur. Le logiciel de CAO est un outil plus complet car il simule en ne négligeant pas les contraintes de poids, de résistance ou encore l'aspect pratique d'un objet. La CAO est incontournable dans le domaine industriel mais ne se cantonne pas à cet univers. Très utilisé dans le design, on peut également imaginer un logiciel de CAO pour la conception d'objets à destination médicale. Il est utilisable par toutes les entreprises qui réalisent des dessins techniques et qui ont besoin d'interagir avec des contraintes et des matériaux variés [52].

### 2.8.3 Avantages d'un logiciel CAO

Le logiciel de conception 3D n'a plus tellement ses preuves à faire tant il a su faire sa place dans le domaine professionnel. Un logiciel CAO, c'est [52]:

- un gain de temps pour la conception d'un produit.
- la précision des côtes qui s'adaptent automatiquement lorsqu'on change d'échelles.
- la possibilité de sélectionner des matériaux variés dont les contraintes sont incluses dans une bibliothèque étendue de formes prédéfinies qu'on adapte à nos besoins.
- des textures diverses avec des jeux d'ombres et de lumière.
- la possibilité de visualiser l'objet sous tous les angles.
- des calculs précis et la possibilité d'estimer les coûts de fabrication d'un produit.
- gérer de grands assemblages pas toujours aisés à manipuler dans la réalité.

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les différents types de conception ainsi que les règles de sûreté de fonctionnement qui sont indispensables dans le processus de conception. Nous avons analysé le cycle de vie d'un équipement et précisé que le retour d'expérience (REX) permettant de déceler les erreurs à ne plus commettre, le cycle de vie doit être pris en compte tout au long de la conception. De même, des différents modèles de conception ont été présentés.

Nous pouvons affirmer que la conception d'un équipement est meilleure et optimale, si la durée de vie utile de cet équipement est plus longue, si l'équipement a un niveau élevé de fiabilité, si les coûts de production et de maintenance ne sont pas très élevés et si elle est respectueuse de l'environnement

Nous avons vu enfin, que les logiciels informatiques sont d'un apport précieux dans le processus de conception.

# Chapitre 3

Analyse fonctionnelle, analyse de la valeur  
et conception

## Introduction

Lors de la conception d'un équipement, il est nécessaire de recenser, de caractériser, d'ordonner, de hiérarchiser et de valoriser toutes les fonctions de ce dernier afin de faciliter sa maintenance.

Pour ce faire, plusieurs outils, méthodes et diagrammes sont disponibles, parmi lesquels nous pouvons utiliser l'analyse fonctionnelle et l'analyse de la valeur. La première a pour but de concrétiser les tâches énumérées précédemment. La deuxième, a pour objet d'augmenter la valeur d'un produit (de l'équipement) en réduisant le coût et en améliorant la qualité et les performances de cet équipement.

D'autre part, un des facteurs déterminants dans une démarche rationnelle de conception d'un équipement est l'établissement d'un cahier des charges fonctionnel. C'est aussi un outil méthodologique nécessaire pour détecter les formules fonctionnelles d'un besoin de l'utilisateur.

## 3.1 Analyse fonctionnelle

### 3.1.1 Définition

Selon la norme française X50-150 – NF X 50-153 ; l'analyse fonctionnelle consiste à recenser, caractériser, ordonner, hiérarchiser et valoriser les fonctions offertes par un équipement placé dans un système pour satisfaire les besoins de son utilisateur [25].

### 3.1.2 Besoin de l'utilisateur

Les besoins peuvent être de plusieurs natures [1] :

- objectifs,
- subjectifs.

### 3.1.3 Validation du besoin

On s'assure de la validité du besoin, en se posant les questions [12] :

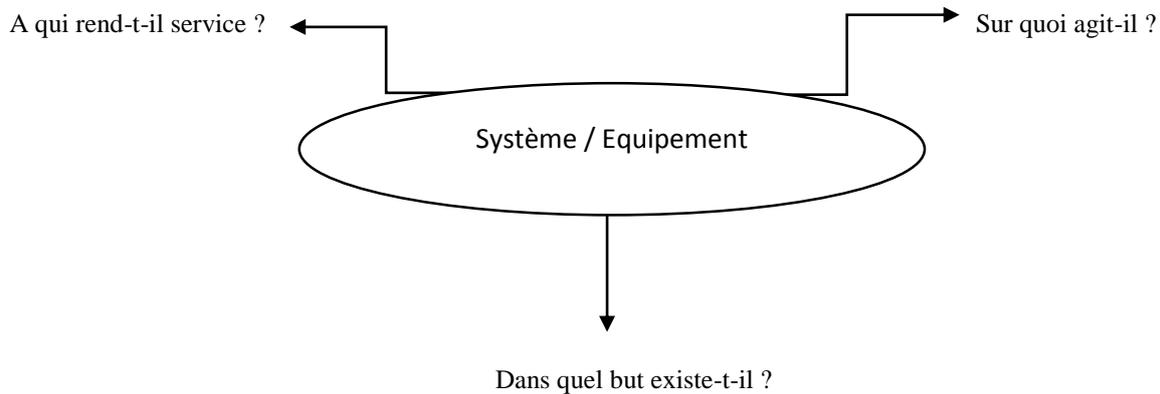
- pourquoi ce besoin existe-il ?
- qu'est-ce qui pourrait le faire disparaître ?
- quelle est la possibilité de cette disparition ?

### 3.1.4 Service à satisfaire

On se pose les questions [12]:

- pourquoi le service rend-t-il service à un élément extérieur en agissant sur un autre élément extérieur ?
- à quoi ou à qui rend-t-il service ?

- sur qui ou sur quoi agit-il ?



**Figure 3.1** Bête à corne [12].

### 3.1.5 Système, équipement

Un système est un ensemble d'éléments formant un tout structuré satisfaisant plusieurs besoins cohérents. C'est un ensemble vaste où l'on trouve souvent tous les types de produits représentés (matériel, processus, service). Cela peut être par exemple une usine (granulateur, chaîne de production, etc.)

Le mot produit est pris au sens large du terme. Il peut s'agir [1] :

- d'un objet,
- d'un service,
- d'un matériel, équipement,
- d'un logiciel, d'un système,
- d'un processus administratif ou technique, etc.

### 3.1.6 Analyse fonctionnelle externe

Lorsque l'analyse fonctionnelle concerne l'usage d'un équipement, c'est à dire les fonctions qu'il doit assurer pour satisfaire le besoin du client ou de l'entreprise, le produit peut être considéré comme une boîte noire et seules les fonctions qui « sortent » de la boîte vers l'extérieur sont à prendre en considération.

Cette forme d'analyse est intitulée analyse fonctionnelle externe ou expression fonctionnelle du besoin. Elle exprime le point de vue du client utilisateur et met en évidence les fonctions de service ou d'estime [1].

### 3.1.7 Analyse fonctionnelle interne

Lorsque l'analyse porte sur l'équipement lui-même, pour [1] :

- améliorer son comportement
- améliorer sa fiabilité
- diminuer son coût, etc.

Il n'est plus considéré comme une boîte noire, mais au contraire l'analyse va porter sur intérieur de la boîte pour comprendre ses fonctionnalités internes.

L'équipement est considéré comme un assemblage de constituants dont chacun remplit certaines fonctions vis-à-vis des autres.

L'analyse est alors intitulée analyse fonctionnelle interne. Elle exprime le point de vue du concepteur réalisateur de l'équipement. Elle met en évidence les fonctions techniques :

- système de mise à disposition des Produits.
- système de suivi de l'utilisation recyclage de l'équipement.

### 3.1.8 Identification des fonctions

Le milieu environnant d'un produit est l'ensemble des composantes physique, humain, économique, en relation avec le produit pendant son cycle de vie (énergie, utilisateur, dépanneur, atmosphère...).

Afin de préciser exactement le support de l'analyse fonctionnelle, on a une définition d'une frontière qui délimite la zone de l'étude. On dit que l'on a isolé l'équipement étudié de son milieu environnant.

Les fonctions nécessaires à la satisfaction des besoins peuvent être [25] :

- des fonctions de service ou d'estime
- des contraintes imposées par un client, un milieu environnant particulier ou par certains règlements.

Il ne faut pas confondre une fonction avec une solution :

- la fonction exprime un résultat à atteindre
  - la solution indique le moyen pour l'atteindre.
- ✓ Graphes d'association

Les graphes d'association ou « diagramme pieuvre » sont constitués par l'ensemble des éléments du milieu environnant qui ont une relation avec le produit étudié pendant son cycle de vie.

- ✓ Fonctions de service

Une fonction du service se traduit par une relation entre le produit et une ou plusieurs composantes du milieu environnant.

- ✓ Recensement des fonctions de service

Méthode d'inventaire systématique du milieu environnant le produit

- 1- Identifier toutes les composantes du milieu environnant le produit.
- 2- Etablir toutes les relations entre le produit et les composantes du milieu environnant.
- 3- Chaque relation entre le produit et une ou plusieurs composantes du milieu environnant détermine une fonction de service.

- ✓ Classification des fonctions de service

Suivant l'objet de l'analyse fonctionnelle, on peut classer les fonctions de service :

- soit par leur nature
- soit par leur importance

**Par leur nature :**

les fonctions de service peuvent correspondre à des fonctions d'usage ou à des fonctions d'estime.

**Par importance :**

les fonctions de service peuvent être hiérarchisées en fonctions principales et en fonctions complémentaires.

- ✓ Fonctions principales

Ce sont les fonctions qui justifient la création du produit. Pour un récepteur de radiodiffusion :

**FP1.** Transformer les ondes électromagnétiques en ondes sonores.

- ✓ Fonctions complémentaires

Toutes les fonctions autres que les fonctions principales sont complémentaires.

Prenant l'exemple d'un récepteur de radiodiffusion.

**FC2.** S'adapter avec l'énergie électrique du secteur.

- ✓ Formulation des fonctions.

La fonction est exprimée par un verbe à l'infinitif suivi d'un complément.

- ✓ Critères d'appréciation.

Les critères permettent d'apprécier la manière dont une fonction doit être respectée.

- ✓ Contraintes

Les contraintes sont des limitations à la liberté du concepteur-réalisateur d'un produit.

Les contraintes peuvent être dues aux plusieurs critères :

- Sécurité,
  - l'environnement (législation, standardisation, ambiance, corrosive...),
  - au matériau (mise en œuvre nécessitant des moyens particuliers),
  - au délai,
  - délai pour l'étude,
  - interchangeabilité,
  - respect de normes ou de règlement,
  - marché, etc.
- ✓ Fonctions techniques

Une fonction technique est une action interne entre les constituants d'un produit défini par le concepteur-réalisateur dans le cadre d'une solution pour assurer la fonction de service.

✓ Diagramme FAST

Pour une solution technologique donnée, ce diagramme permet de représenter de façon synthétique un enchaînement hiérarchisé des fonctions techniques [25].

À partir d'une fonction donnée, il s'établit en répondant aux questions : Pourquoi ? Quand ? Comment?

- POURQUOI ? Cette question concerne la fonction précédente. La réponse commence par «pour ».
- QUAND ? Cette question s'applique à une ou à des fonctions situées au même niveau. La réponse commence par « si simultanément ».
- COMMENT ? Cette question s'adresse à la fonction suivante. La réponse commence par «en».

Le diagramme FAST est applicable pour tout équipement ou outils satisfaisant un besoin ou une fonction ; comme un simple exemple d'explication le (tableau 3.1) illustre le diagramme FAST d'une pince de manipulateur.

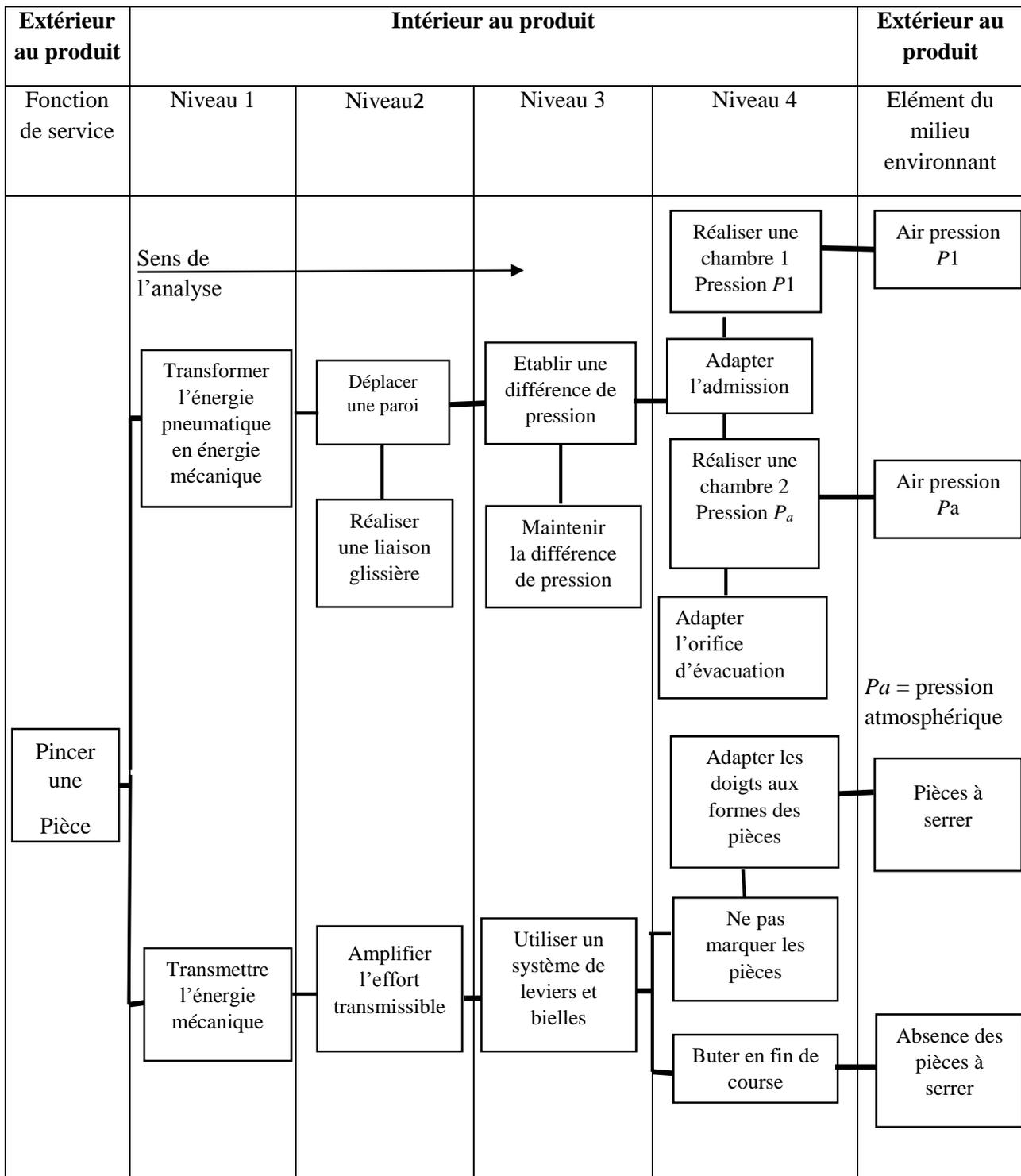


Tableau 3.1 Diagramme FAST d'une pince de manipulateur [25].

### 3.2 Recherche d'idées et familles de solutions

Le brainstorming (remue méninges) qui consiste à aborder en groupe le problème par la production d'un grand nombre d'idées dans un temps très court permet de produire des idées de solutions.

La phase de réflexion qui fait suite à un brainstorming permet de proposer des solutions.

Les propositions sont regroupées par familles qui en facilitent l'analyse.

On cherche à obtenir le juste nécessaire [12].

### 3.2.1 Etude et évaluation des solutions

Chaque solution est caractérisée et évaluée en fonction de [12] :

- a) critères techniques
  - inventorier les principes physiques, technologiques, de conception et de développement utilisés,
  - répertorier les contraintes de production et de distribution,
- b) critères financiers
  - évaluer le coût de chaque solution,
  - estimer les ventes prévisionnelles,
  - prévoir l'implication du réseau de distribution,
  - déterminer les investissements nécessaires.
- c) critères particuliers
  - tenir en compte des objectifs spécifiques et des contraintes,
  - vérifier la possibilité de respecter les délais,
  - estimer l'impact de la concurrence,

## 3.3 Analyse de la valeur

### 3.3.1 Historique

Au sein de la filiale de Général Electric aux USA, L.D Miles a créé une méthode qui va générer un développement énorme dans l'industrie connu sous le nom de l'analyse de la valeur (AV).

Après une dizaine d'années, exactement en 1955, la méthode est proposée au Département de Défense (D.O.D) qui va l'imposer dans tout les contrats, vis-à-vis à l'importance de la méthode, la S.A.V.E (Society of American Value Engineers) été créée en 1959, après deux ans, L.D Miles fait le premier ouvrage présentant la méthode. A partir des années 70, la méthode est généralisée un peu partout, l'exemple de l'Association Française de l'Analyse de la Valeur (A.F.A.V).

D'après des résultats expérimentaux, généralement l'utilisation de la démarche (AV) peut générer des gains 30 fois supérieurs aux dépenses engagées, ce qui amène les entreprises à l'utiliser de plus en plus [12].

### 3.3.2 Définition

L'analyse de la valeur (AV) a pour but d'offrir sur le marché, des produits donnant entière satisfaction aux clients, réalisés au moindre coût pour l'entreprise. Autrement, c'est une méthode de compétitivité organisée et créative, visant la satisfaction du besoin de l'utilisateur.

Elle se caractérise par une démarche de conception [12]:

- fonctionnelle,
- économique,
- pluridisciplinaire,

Bien que les plans de travail soient les mêmes, on distingue généralement l'analyse de la valeur de conception et l'analyse de la valeur d'amélioration.

Dans l'analyse de la valeur, un produit est considéré comme un assemblage de fonction au lieu d'un assemblage de pièces, et l'objet de ce type d'analyse a comme objet d'augmenter la valeur d'un produit :

- en réduisant les coûts,
- en améliorant la qualité ou les performances de produit.

Une planification normalisée est proposée dans le (tableau 3.2)

Phase 1	Orienter l'action	Phase 4	Rechercher les idées et évolution de la solution
<p><b>Objet et cause de l'analyse de la valeur</b></p> <p><b>Données du problème :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- besoin à satisfaire</li> <li>- définition du milieu environnant</li> <li>- produit de la même famille et principale insatisfaction relevée</li> </ul> <p><b>Enjeu économique</b> (rédaction des coûts...)</p> <p><b>Contraintes diverses</b> (règlementations, normalisation, interchangeabilité et approvisionnement)</p> <p><b>Objectif</b> (performance coût)</p> <p><b>Moyen</b> (budget délais)</p> <p><b>Constitution d'un groupe de travail</b> (démarche pluridisciplinaire faisant appel à un animateur et à un décideur)</p>		<p>Rechercher, fonction par fonction, un nombre maximal d'idées, en innovant ou à partir de solutions existantes.</p> <p>Classer les idées en utilisant les critères les plus adaptés (coûts, délais.)</p>	
		Phase 5	Etudier et évaluer les solutions
		<p>Étudier les solutions qui répondent le mieux aux orientations de l'action (définies en phase 1).</p> <p>Évaluer, pour les solutions les plus intéressantes, les faisabilités, les coûts, les risques, la maintenabilité.</p>	
		Phase 6	Bilan prévisionnel et proposition du choix
		<p><b>Dresser un bilan prévisionnel des solutions retenues.</b></p> <p>Etablir pour chaque solution notamment :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- motifs de sélection</li> <li>- estimation du coût</li> <li>- principales conditions d'application (délais, conséquences sur les hommes et sur l'entreprise }</li> </ul> <p>Proposer au décideur.</p>	
Phase 2	Rechercher l'information		
<p>Recherche technique ; économique commerciale, réglementer et effectuer par chaque un des membres du groupe et diffusée à tous (inventaire et classification de l'information)</p>			
Phase 3	Analyser fonctionnellement		
<p>Déterminer et analyser les fonctions à assurer en élaborant le cahier des charges fonctionnel.</p> <p>Classer les fonctions par coûts.</p> <p>Les possibilités de réduction de coût sur les fonctions les plus onéreuses.</p> <p>Préparer la recherche de solutions répondant aux seuls besoins réels.</p>		Phase 7	Suivre la réalisation
		<p>Le suivi est généralement effectué par l'animateur du groupe.</p> <p>En rend compte au décideur.</p>	

**Tableau 3.2** Plan de travail d'une action « analyse de la valeur » [25].

### 3.3.3 Notion de fonction

Pour que le produit satisfasse le besoin du client, il faut considérer son utilité. L'AV impose de considérer le produit ou bien l'équipement comme une entité qui rend des services ; un ensemble de fonctions. Selon la norme X 50-150, la fonction est l'action d'un produit ou l'un de ses constituants exprimée exclusivement en termes de finalité.

Selon le point de vue concerné, on trouve trois types de fonctions [12] :

- fonctions d'usage qui définissent l'utilité matérielle du produit pour le client (indiquer un niveau, transporter...).
- fonctions d'estime qui font choisir par le client, un produit particulier parmi tous ceux qui présentent les mêmes fonctions d'usage (esthétique, image de marque,...)
- fonctions de conception (ou de construction) qui permettent à l'entreprise de réaliser les fonctions d'usage et d'estime attendues du produit.

On cherche donc systématiquement à valoriser le produit en agissant sur les fonctions d'usage et d'estime et à réduire simultanément le coût en simplifiant les fonctions en construction.

### 3.3.4 Notions de valeur

La valeur est le jugement porté sur l'équipement sur la base des attentes et des motivations de l'utilisateur. La valeur d'un équipement est liée directement à la satisfaction qu'en éprouve son utilisateur. Elle varie selon les points de vue et selon les circonstances et repose sur 3 composantes [12] :

- valeur d'usage, une valeur objective qui traduit l'utilité du produit,
- valeur d'estime, est une valeur subjective correspond à l'estime porté au produit,
- valeur d'échange, est une valeur économique qui traduit le sentiment éprouvé à l'égard des coûts d'acquisition, d'utilisation et de maintenance de produit.

Bien qu'il soit impossible de quantifier le jugement global du client, il faut l'intégrer sous une forme ou une autre lors d'une étude AV.

- ✓ Analyse fonctionnelle descendante

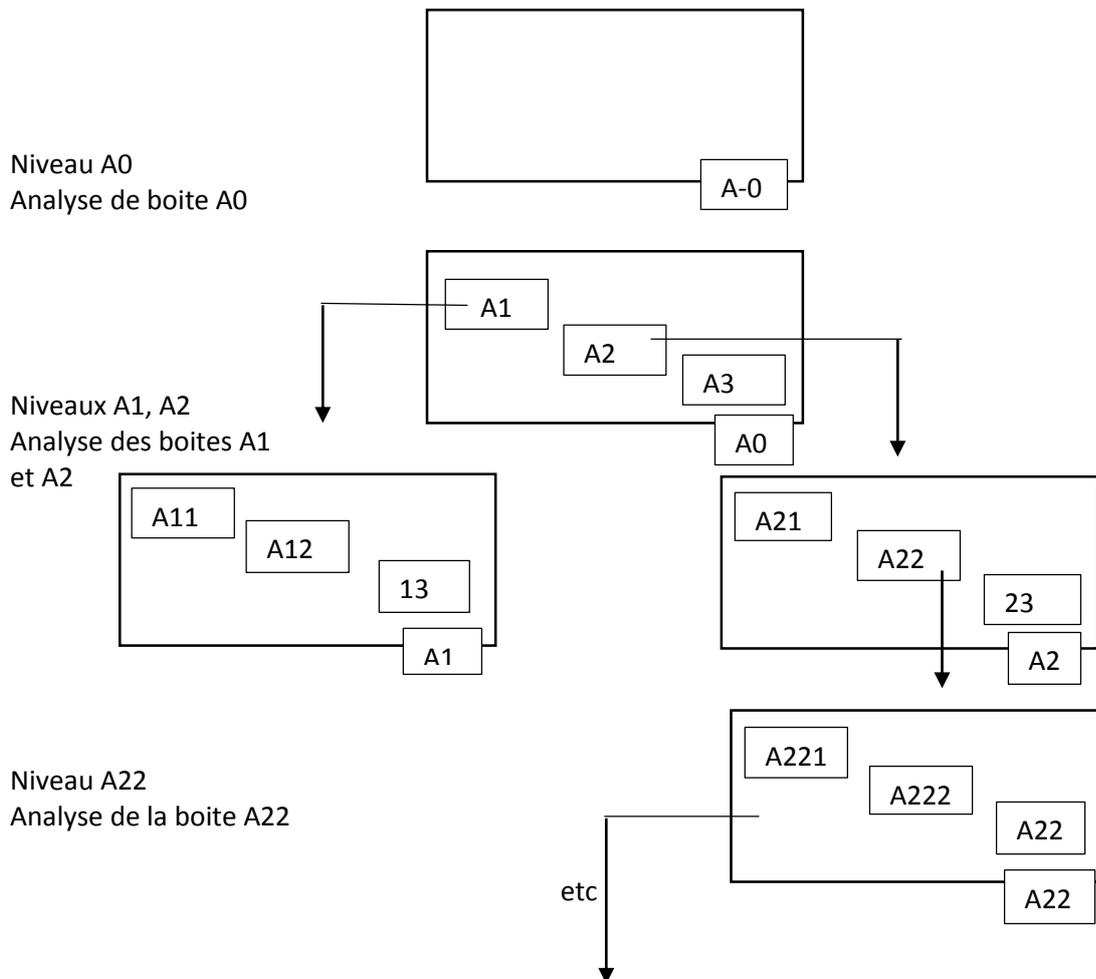
Ce type d'analyse permet de modéliser et de décrire graphiquement des systèmes.

On procède par analyses successives descendantes, c'est à-dire en allant du plus général vers le plus détaillé en fonction des besoins [25].

- Représentation graphique
  - ✓ représentation graphique, elle s'effectue à partir de boîtes modélisant des fonctions,
  - ✓ Chaque côté de la boîte a une signification particulière,
  - ✓ Chaque diagramme de niveau inférieur est issu d'une boîte du niveau supérieur et il en conserve toutes les relations,
  - ✓ Pour chaque diagramme, on précise, en fonction de l'objectif de communication, le point de vue qui a conduit à son élaboration (point de vue concepteur, point de vue utilisateur, point de vue maintenance, etc.)

Défini par une boîte :

- la frontière d'isolement et les relations du système avec les éléments du milieu environnant
- la globalité des fonctions du système (fonction globale ou fonction d'usage).



**Figure 3.2** Principe de hiérarchisation des diagrammes [25].

Niveau A-0\*\*

Il définit par une boîte

- la frontière d'isolement et les relations de l'équipement avec le milieu environnant ;
- la globalité des fonctions de l'équipement ;

Niveau A0

Il représente, en diverses boîtes, les fonctions principales de l'équipement pour satisfaire la fonction énoncée dans la boîte A-0. Ces boîtes sont reliées entre elles par des lignes fléchées qui indiquent les divers flux de la matière d'œuvre et des contraintes.

## Niveaux A1, A2

Chaque boîte du premier niveau peut se décomposer en diverses boîtes représentant les sous-fonctions principales qui doivent satisfaire la fonction principale énoncée dans cette boîte...

1. Les flèches qui entrent dans une boîte montrent de quoi la boîte a besoin pour effectuer les exigences spécifiées en sortie.	4. Le dessous de la boîte est utilisé pour montrer l'élément qui réalise l'activité, c'est-à-dire le « comment » ou le « qui » de celle-ci (objet, mécanisme, service).
2. Les données d'entrée sont modifiées en données de sortie par la fonction exprimée dans la boîte	5. Chaque flèche entrant ou " sortant d'une boîte d'un niveau donné doit se retrouver sur le diagramme du niveau inférieur.
3. Les contraintes régissent les consignes données aux modifications (transformations, déplacement, stockage	6. Pour faciliter la compréhension, ne pas dépasser six boîtes par diagramme.

**Tableau 3.3** Principales règles d'élaboration [25].

### 3.4 Cahier des charges fonctionnel

Selon la norme X 50-151, le CdCF est un document par lequel le demandeur exprime son besoin en termes de fonctions de services ou de contraintes. Pour chacune d'elles sont définis des critères d'appréciation et leurs niveaux. Chacun de ces niveaux doit être assorti d'une flexibilité. Le CdCF débouche sur une analyse des coûts et une validation des besoins et des objectifs. Il permet également de définir le juste nécessaire qui présente l'idéale vers lequel il faudra tendre.

Dans la littérature, le CdCF est défini comme un des facteurs déterminants dans une démarche rationnelle de conception de produits est l'établissement d'un cahier des charges fonctionnel (CdCF).

C'est un outil méthodologique nécessaire pour détecter et formuler fonctionnellement le besoin (ce que veut l'utilisateur).

Il incite à s'exprimer en termes d'obligations de résultats de préférence aux obligations de moyens [25].

Présentation générale du problème	Le produit et son marché. Les objectifs. Le milieu environnant.	Appel à variantes	Au-delà. de propositions. répondant au CdCF, il peut être demandé au concepteur-réalisateur d'autres solutions répondant à sa propre perception" du besoin
Expression fonctionnelle du besoin	Les fonctions de service et les contraintes. Critères d'appréciation Coût objectif	Cadre de réponse	Donner les éléments pour évaluer les propositions et les comparer

**Tableau 3.4** Elément constitutifs du CdCF [25].

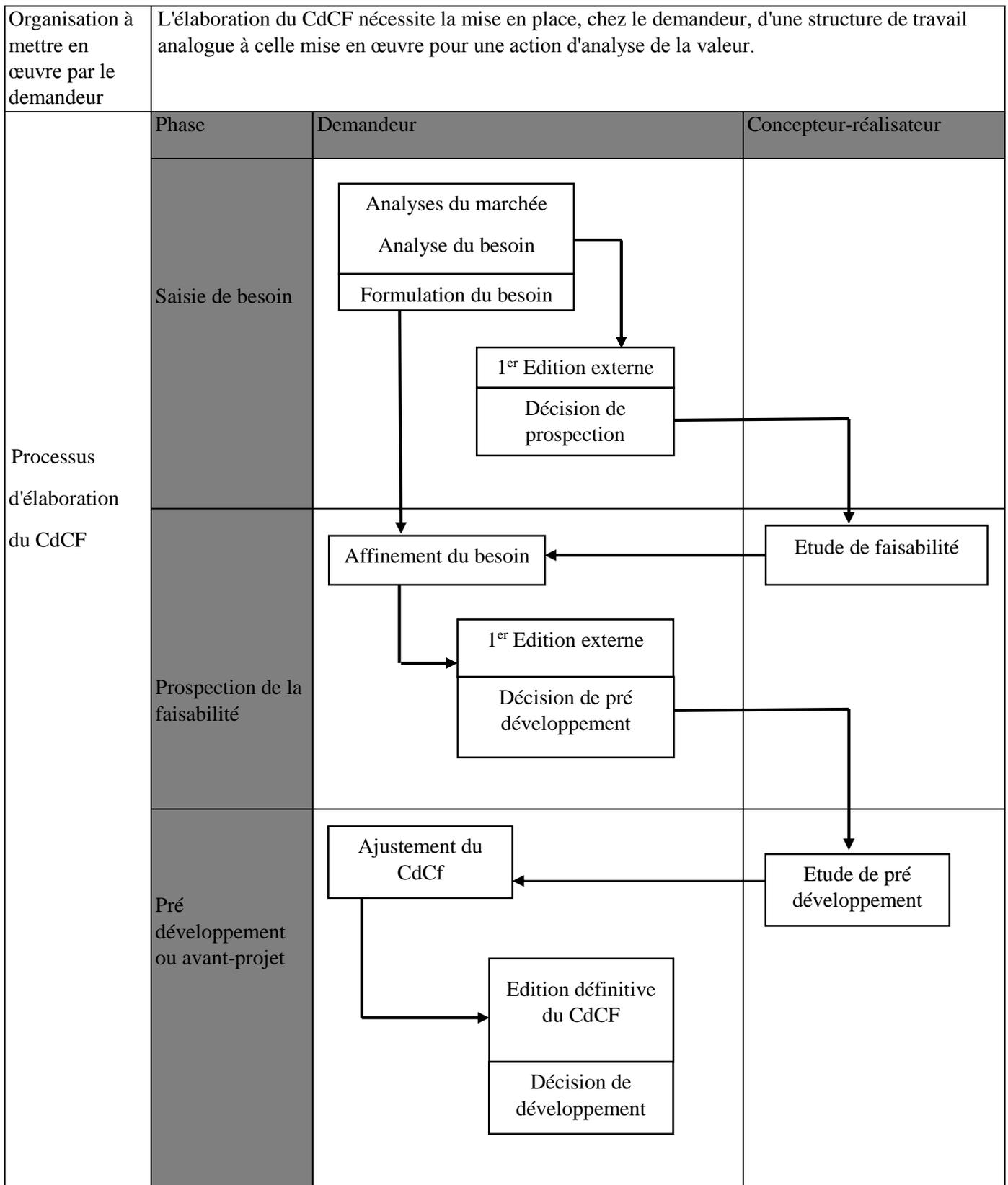


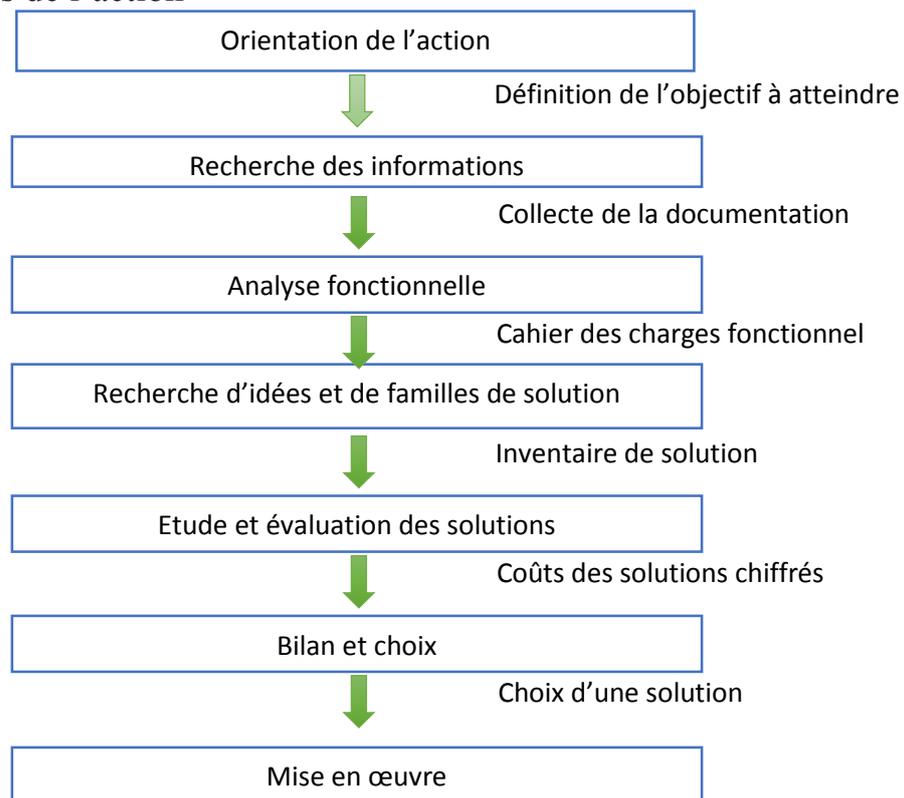
Tableau 3.5Elaboration du CdCF [25].

Définition	Remarque
<p>Méthode de gestion fondée par :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- la fixation d'un prix ou coût plafond prédéterminé.</li> <li>- la mise en œuvre, dès le départ du projet, d'une organisation de procédures et de règles d'arbitrage spécifiques.</li> </ul> <p>Un CdCF négociable</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- L'objectif du coût est la contrainte essentiel (la possibilité d'infléchir : le coût est quasi nul)</li> <li>- Une décision d'arrêt ou de réorientation du projet est prise systématiquement, par le décideur, S'il apparait que le coût objectif ne peut être respecté.</li> </ul> <p>CCO est à rapprocher du « Design-To-Cost ; (DTC) américain.</p>

**Tableau 3.6** Conception pour un Coût Objectif (CCO) [25].

### 3.4.1 Méthodologie

#### 3.4.1.1 Phases de l'action



**Figure3.2** Sept phases de l'action [12].

- **Orientation de l'action**

## a) Cadre général

Définir l'orientation des services et leurs caractéristiques.

Choisir une politique de gestion prenant en compte les savoir-faire particuliers de l'entreprise.

Caractériser l'environnement concurrentiel.

## b) Orientations générales

- répartir les responsabilités et on accorde une enveloppe budgétaire,
- fixer le délai accordé pour l'action AV,
- préciser le délai souhaité pour la mise à disposition des produits,

## c) Orientations spécifiques

- Définir la nature et les limites de l'action AV,
- Caractériser la qualité souhaitée avec un objectif de coût,
- Inventorier les normes imposées, les brevets déposés ...etc.

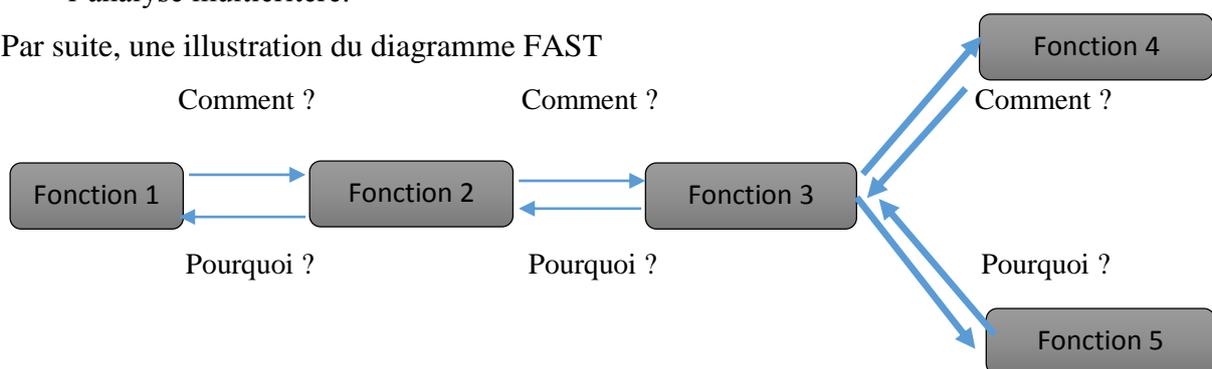
## d) Recherche des informations

### 3.5 Méthodes utilisées en analyse de la valeur

Nous abordons les méthodes d'analyses suivantes [9] :

- parmi les méthodes utilisées comme outils d'analyse on site, la pieuvre, la bête à cornes le bloc-diagramme fonctionnel et le tableau d'analyse fonctionnelle,
- les diagrammes FAST (Fonction Analyses System Technique),
- l'analyse de la valeur,
- l'analyse multicritère.

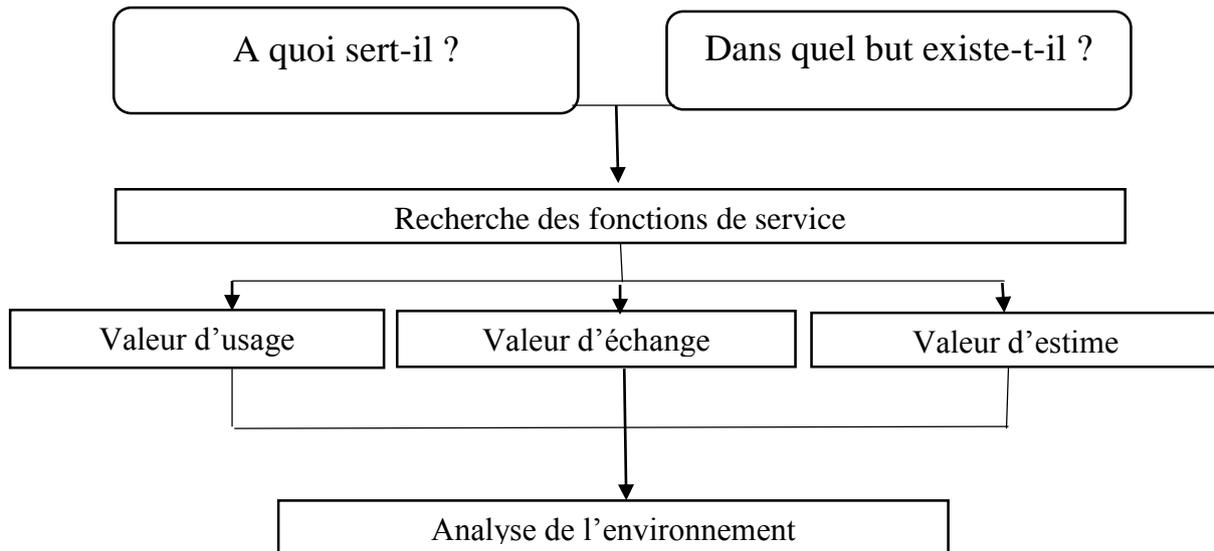
Par suite, une illustration du diagramme FAST



**Figure 3.3** Diagramme FAST [9].

### 3.5.1 Méthode intuitive

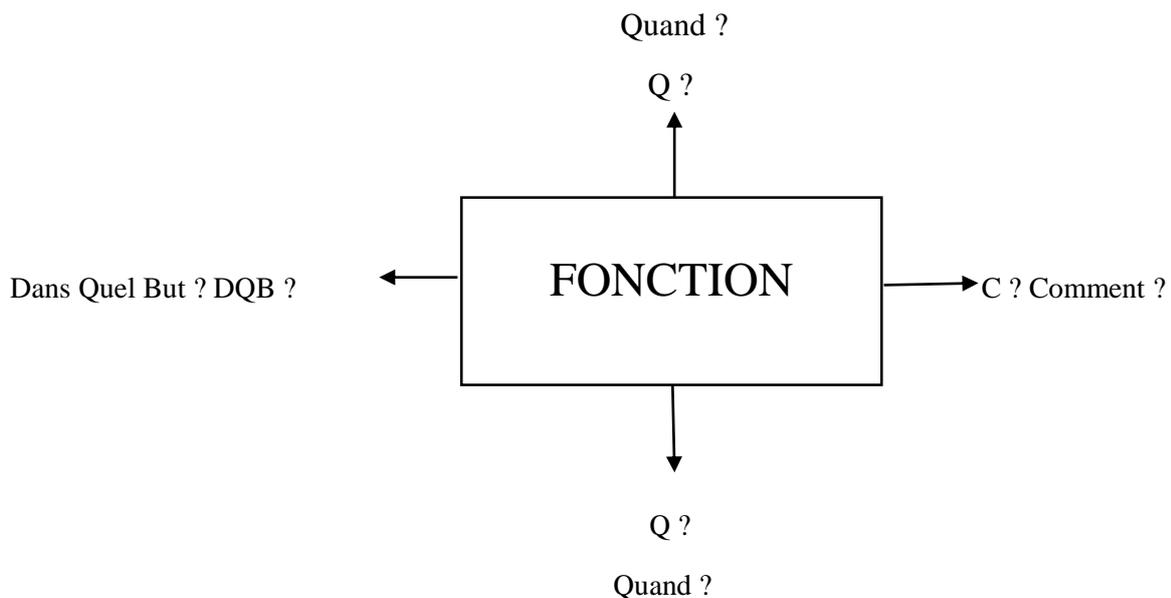
On valide le besoin, puis on caractérise les fonctions de service en chiffrant la valeur d'usage, la valeur d'échange et la valeur d'estime de chaque partie étudiée. On termine sur une analyse de l'environnement qui permet de contrôler la validité de l'étude [12].



**Figure 3.4** Méthode intuitive [12].

### 3.5.2 Méthode FAST (Function Analysis System Technique)

Le diagramme répond à des questions différentes selon le sens de lecture



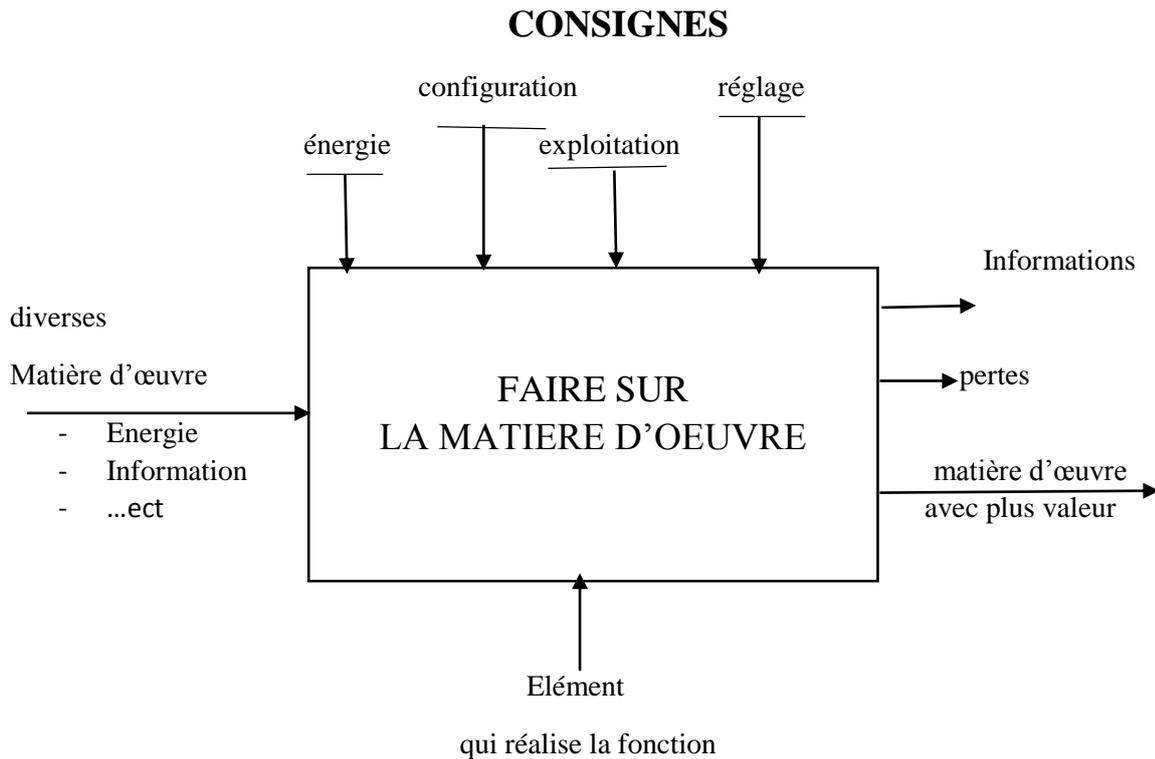
**Figure 3.5** Diagramme FAST [12].

### 3.5.3 Méthode SADT (Structured Analysis and Design Technic)

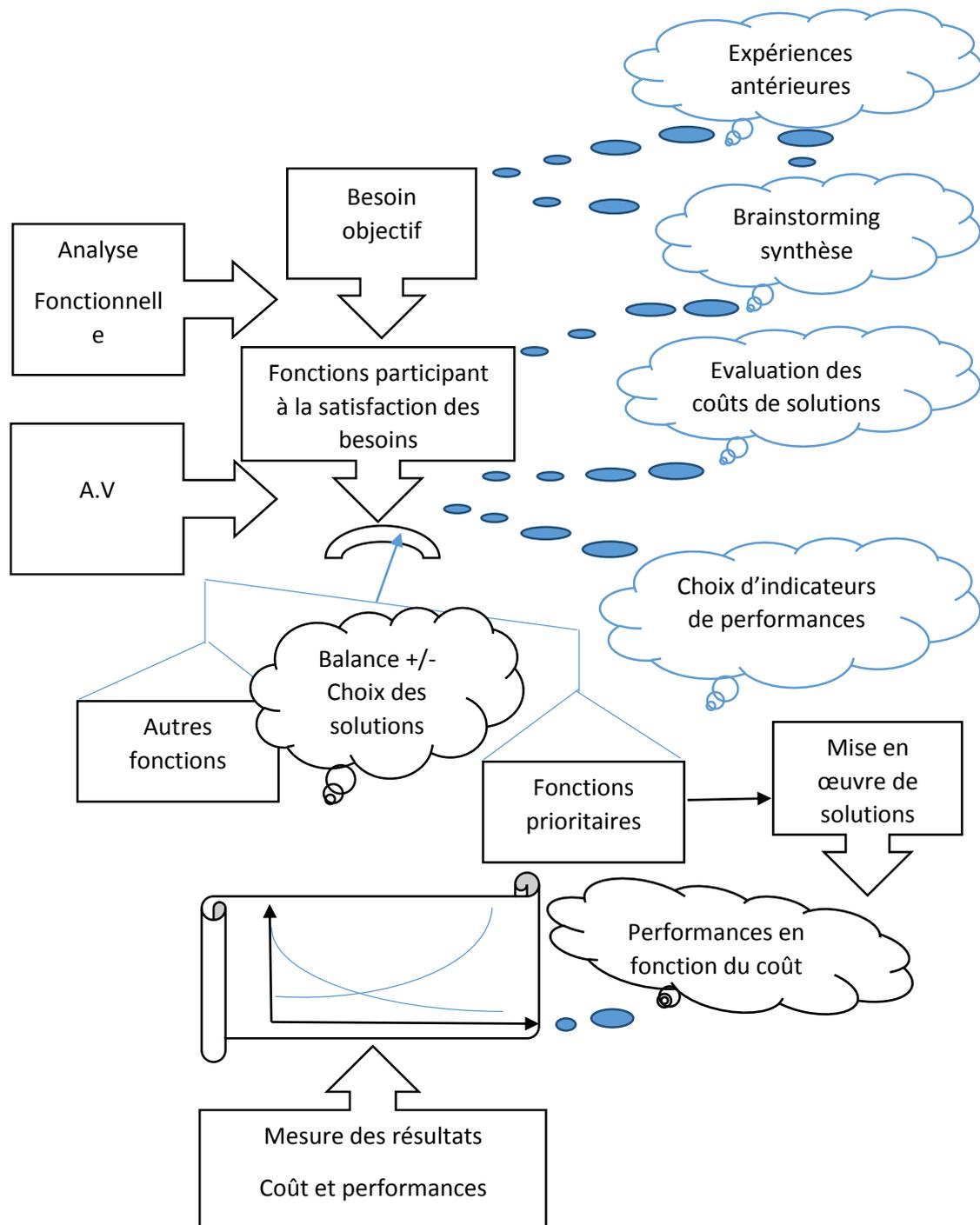
Cette méthode est très utile pour effectuer une analyse fonctionnelle, elle se prête bien à tous les systèmes automatiques [12].

– Principe

C'est un diagramme qui présente un même système selon différents degrés de finesse.



**Figure 3.6** Méthode SADT [12].



**Figure 3.7** Analyse fonctionnelle et analyse de la valeur [12].

L'application des principes de l'analyse de la valeur demande un plan de travail en sept phases proposé par la norme NF X 50-152 :

Phase 1 - orienter l'action de l'analyse de la valeur : elle est ici entièrement dirigée vers la fonction « maintenance » telle qu'elle est définie par la norme NF X 60-010

Phase 2 - rechercher l'information : en s'appuyant sur les expériences antérieures à compléter et valider par le groupe de travail A.V.

Phase 3 - analyser les fonctions : le cahier des charges fonctionnelle de la maintenance.

Phase 4 - rechercher les voies de solutions.

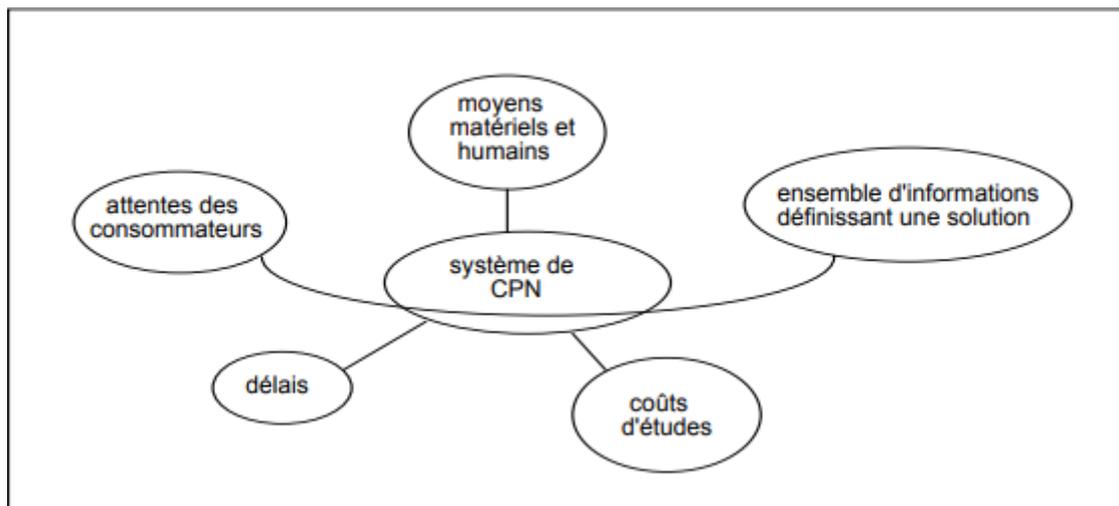
Phase 5 - évaluer les solutions : la valeur des solutions s'exprime en terme de coûts et de satisfaction.

Phase 6 - effectuer des bilans prévisionnels des gisements d'économies sont mis en évidence et proposés au groupes de travail et aux décideurs.

Phase 7 - réaliser et assurer le suivi du projet.

### 3.6 Analyse fonctionnelle du système de conception des équipements nouveaux

On peut maintenant déterminer les fonctions principales et contraintes, ou d'adaptation, du sous-système : le sous-système de conception d'équipements nouveaux.



**Figure 3.8** Analyse fonctionnelle du système de conception des équipements nouveaux [9].

Fonction principale du système de conception des équipements nouveaux :

- Fp1 : le système de conception de produits nouveaux permet de « transformer des informations reçues/perçue sur les attentes des utilisateurs en informations définissant une solution qualifiée comme étant apte à répondre à l'expression de ces« attentes ».

Fonctions d'adaptation du système de conception de produits nouveaux :

- Fa1 : le système de conception de produits nouveaux permet de gérer les moyens (humains, matériels...)
- Fa2 : le système de conception de produits nouveaux permet de gérer des délais

- Fa3 : le système de conception de produits nouveaux permet de gérer des coûts

Ce travail d'analyse et de modélisation du processus de conception d'équipements nous amène à distinguer deux types de fonctions du système de conception d'équipements nouveaux.

- une fonction « management d'informations liées au couple besoin/équipement »
- Une fonction gestion de ressources : moyens (humains, matériels.....), coûts, délais [9].

### 3.7 Analyse de la valeur et conception à coût objectif

L'analyse de la valeur (AV) est une méthode d'optimisation de la conception des produits, services et organisations qui permettent de mobiliser les compétences requises dans une démarche structurée. Sa spécification tient dans la mise en œuvre de raisonnement (valeur) qui vise à augmenter l'utilité et/ou diminuer les coûts pour ses parties prenantes tout au long du cycle de vie.

La Conception à Coût Objectif (CCO ou Design To Cost, DTC) suit la même démarche, après la définition d'un « coût objectif » plafond prédéterminé et un cahier des charges fonctionnel. Elle vise à supprimer toutes les ressources qui ne contribuent pas directement aux fonctions du produit ou service final.

La réduction des coûts des déchets passe donc par l'élimination des matières inutilement consommées pour la production et la réduction des coûts de gestion de ces déchets [32].

#### 3.7.1 Objectif de la méthode

L'objectif de l'Analyse de la Valeur est de réduire les coûts d'un produit/service ou d'une Organisation, ou de « concevoir une solution parfaitement adaptée aux besoins de son utilisateur et, ceci, au coût le plus faible ».

La Conception à Coût Objectif (Design To Cost) vise à réduire les coûts à un niveau défini comme Optimal. Cette méthode est souvent appliquée dans le cadre d'une démarche d'optimisation des achats, ou de recherche d'innovation.

On parle de Préconception à Coût Objectif (Redésigné To Cost) lorsque cette démarche est utilisée pour améliorer une solution existante.

#### 3.7.2 Déroulement de l'organisation

La spécificité des méthodes d'analyse de la valeur et conception à coût objectif tient dans la mise en œuvre du raisonnement « valeur », qui vise, à travers un questionnement spécifique, à augmenter l'utilité et/ou diminuer les coûts pour les parties prenantes.

À la (re) conception optimale d'un produit ou service avec la méthode d'Analyse de la Valeur (AV), présentée par les normes AFNOR NF X50-100, 151 et 152, se fait en plusieurs étapes :

**a)** lancement du projet est une étape essentielle pour orienter l'action. Il permet de définir le périmètre, l'objectif (augmenter les revenus ou la qualité, réduire les coûts, les délais ou les risques). Cette étape sert également à rechercher l'information sur la solution actuelle et les alternatives déjà connues. En cas de (Re) Conception à Coût Objectif, un objectif de coût-cible est défini.

**b)** analyse fonctionnelle (« à quoi ça sert ? ») vise à faciliter et guider l'expression des besoins, indépendamment des solutions, en exprimant dans un Cahier des Charges Fonctionnel les performances requises et les contraintes à respecter à chaque étape du cycle de vie du produit ou service.

**c)** l'analyse de la valeur (« pourquoi ça coûte ? ») relie les coûts de la solution actuelle aux besoins pour à repérer les coûts inutiles ou besoins trop coûteux et prioriser les changements, en incluant les ressources consommées à chaque étape du cycle de vie.

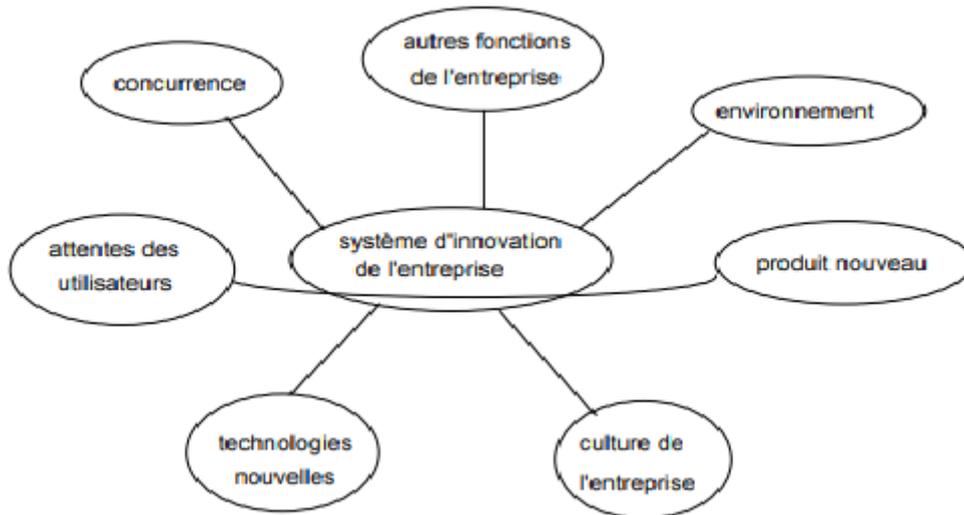
**d)** étape suivante fait appel à la créativité (« changer quoi ? »), pour rechercher et évaluer les idées et voies de solutions, sur la base des étapes précédentes. Il s'agit d'optimiser la valeur, c'est-à-dire de choisir les solutions répondant aux besoins au moindre coût, avec le meilleur rapport « coûts/bénéfices ».

**e)** enfin, la réflexion aboutit au choix d'une solution et au suivi de sa réalisation, par un plan de mise en œuvre

Ces étapes peuvent être répétées pour affiner la conception de détail ou de variantes (sur le périmètre considéré par exemple).

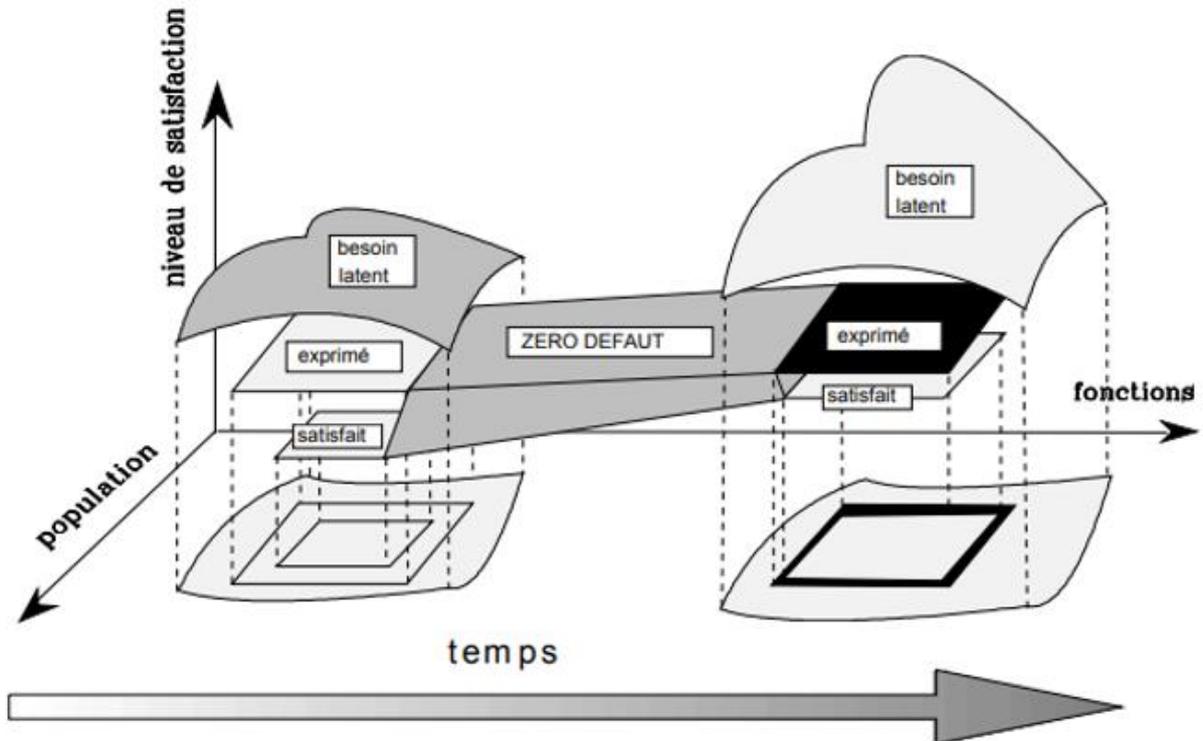
### 3.8 Analyse fonctionnelle du système d'innovation des équipements

Le système d'innovation est étudié par rapport aux éléments de son milieu extérieur, qui interagissent par son intermédiaire (fonctions principales) ou qui agissent directement sur lui (fonctions contraintes ou d'adaptation) [9].



**Figure 3.9** Analyse fonctionnelle du système d’innovation des équipements [9].

La concurrence recouvre les produits, les marchés. Les stratégies des entreprises concurrentes au sens large (concurrence directe et indirecte).



**Figure 3.10** Evolution des besoins / équipements [9].

### - **Fonction principale du système d'innovation de l'entreprise**

Fp1 : le système d'innovation de l'entreprise permet à l'entreprise de mettre à la disposition de ses clients, des produits répondant à leurs attentes « besoins latents », dans l'intérêt de l'entreprise (avoir un portefeuille produit qui maintient la rentabilité etc.).

Fonctions contraintes ou d'adaptation de l'entreprise à son milieu extérieur :

Fa1 : le système d'Innovation de l'entreprise doit permettre de « surveiller et développer des technologies nouvelles »

Fa2 : le système d'innovation de l'entreprise doit permettre de « surveiller la concurrence »

Fa3 : le système d'innovation de l'entreprise doit s'adapter à la culture de l'entreprise

Fa4 : le système d'innovation de l'entreprise doit s'adapter aux contraintes liées au respect de l'environnement.

## 3.8.1 Décomposition du système d'innovation en sous-systèmes

Le système d'innovation peut se décomposer en sous-systèmes.

On peut définir les sous-systèmes suivants [9] :

- système d'écoute et d'analyse des attentes des utilisateurs,
- système de surveillance de la concurrence système de surveillance et de développement de technologies nouvelles,
- système de conception de produits,
- système de production/fabrication,
- système de mise à disposition des produits nouveaux aux clients,
- système de suivi de l'utilisation/recyclage du produit.

Des connaissances pertinentes sur les relations entre elles sont disponibles dans les littératures et dans la pratique. Il est essentiel d'intégrer ces connaissances dans le processus de conception des équipements, mais le support de conception approprié pour cela reste inexistant. Par conséquent, des chercheurs ont mené des recherches sur ces connaissances peuvent être systématiquement intégrées dans le processus de conception [9].

## 3.8.2 Analyse Fiabilité, Disponibilité, Maintenabilité(FDM)

### des systèmes réparables

Signe du « maintenancier » et du « fiabiliste », ces deux métiers sont différents : le maintenancier est un gestionnaire des activités techniques du terrain, le fiabiliste est un scientifique concepteur des systèmes « sûrs » ou un exploitant des nombreux retours d'expérience mise en place dans quelques grands groupes industriels (automobiles, nucléaire, aéronautique, etc.).

Le premier a toujours trop de pannes, le second n'en a jamais assez dans son retour d'expérience. Le premier est spécialement concerné par la « disponibilité opérationnelle » des équipements, le second par la « fiabilité prévisionnelle » des composantes et des systèmes [20]. Loin de les opposer, l'objectif consiste à combler le fossé qui les sépare trop souvent en mettant à la disposition du premier quelques outils du second. Des outils applicables sur le terrain industriel, leur approche théorique n'étant là que pour justifier le bien-fondé de leur mise en application.

#### - Manipulation de l'analyse FDM

Dans cette analyse, le système ne peut prendre que deux états : 0 = il n'est pas opérationnel, ou indisponible, 1 = il est opérationnel, ou disponible.

Des analyses plus fines et plus complexes permettent d'intégrer un état intermédiaire nommé « mode dégradé », très utilisé en sûreté de fonctionnement. En maintenance, le choix d'un seuil d'admissibilité permet de basculer de 1 à 0 face à une dégradation.

MTTF est utilisée dans les systèmes « monocoup » ou non réparables. Dans ce cas :

$MTTF = MTBF$  dans les systèmes réparables, MTTF est un indicateur de qualité.

Le premier TTF est à intégrer à la collecte des TBF

Des spécialistes proposent d'utiliser MTA (Moyenne des Temps d'Arrêt) pour les temps d'arrêt relevés sous ce nom par la production, et d'utiliser MTI (Moyenne des Temps d'Indisponibilité propre) plutôt que MDT pour les temps d'arrêt de production imputable à la maintenance, l'équipement étant requis, sachant que MTI est important en gestion de la durée le coût de maintenance.

L'extension de MTTF et MUT suivant les techniques déjà proposées va strictement tendre vers des résultats satisfaisant le client et l'entreprise simultanément [7].

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'analyse fonctionnelle et l'analyse de la valeur comme des outils, agissant dans le processus de conception d'un équipement. Nous avons défini les fonctions nécessaires de la satisfaction du besoin et procédé à leur identification. Nous avons décrit également comment élaborer un cahier des charges fonctionnel et nous avons remarqué que, dans l'analyse de la valeur est considéré comme un ensemble de fonctions et non comme un assemblage de pièces.

# Chapitre 4

Intégration de la qualité  
et la sécurité en conception

## Introduction

Il n'est pas facile de concevoir une méthodologie multidisciplinaire pour l'intégration des différents paramètres en conception, mais face au développement concurrentiel dans l'industrie, cela devient impératif.

Lors, le produit émerge graduellement grâce à l'interaction des différents métiers et fonctions. L'intégration de la fonction maintenance implique des critères et des paramètres, parmi lesquelles nous distinguons la qualité et la sécurité.

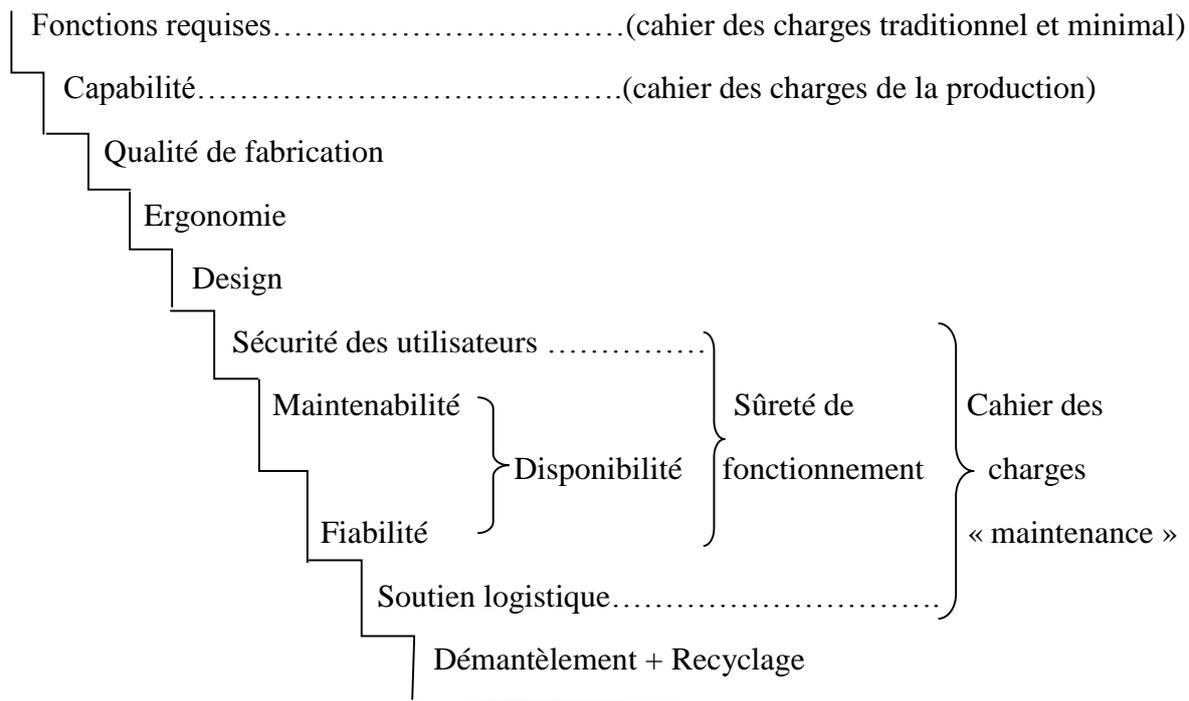
Dans ce chapitre, une démarche d'intégration de ces critères qui donnent une vision systématique intégrée des aspects fonctionnels, structurels et comportementaux du produit est présentée.

### 4.1 Critères intégrés à la conception d'un équipement

La figure 4.1 montre une liste des critères qu'il est possible et souhaitable d'envisager dès les premières phases de conception d'un équipement.

En ce qui concerne la maintenance, il s'agit de concevoir l'aptitude de l'équipement à la maintenance interne pré-existante par le cahier des charges « maintenance » qui se rapportera [7] :

- à l'évaluation des performances de fiabilité requise (taux de défaillance ou disponibilité contractuelle).
- à la définition des critères de maintenabilité.
- aux éléments utiles de soutien logistique.
- aux facteurs de mise en sécurité et en conformité.



**Figure 4.1** Critères intégrés à la conception d'un équipement [7].

## 4.2 Mise en sécurité en conformité et en disponibilité du futur équipement

### 4.2.1 Sécurité en conception

L'amélioration de la sécurité se fait encore dans de nombreux projets par essais et erreurs : le comportement des matériaux aux caractéristiques techniques connues est calculable lorsqu'ils sont soumis à des contraintes connues ; pour les systèmes techniques complexes, on est souvent obligé de procéder à des évaluations probabilistes de fonctionnement ; en matière de facteur humain ; le raisonnement probabiliste ne peut pas donner de résultats capables de guider le concepteur dans ses choix techniques et organisationnels. Le concepteur semble contraint d'utiliser le seul retour d'expérience, après l'accident, en fonction des résultats observés, ce qui ne peut être acceptable pour des systèmes dans lesquels les enjeux de sécurité sont importants, c'est-à-dire à peu près tous.

Pour la sécurité, les nouvelles techniques de modélisation et de simulation permettent de calculer et de vérifier de nombreuses hypothèses à coût réduit, par rapport au développement réel et de nombreux défauts de sécurité sont repérés et corrigés dès cette phase de conception. Les difficultés qui demeurent sont les "détails" mais qui peuvent s'avérer catastrophiques dans

des états particuliers du système.

#### 4.2.1.1 Différentes logiques de la sécurité

Plusieurs approches de la sécurité coexistent aujourd'hui. Elles ne sont pas équivalentes, du point de vue de leur capacité à prévoir et à priori les risques réels auxquels seront exposés les exploitants, le consommateur ou le public [59].

##### a) Sécurité fondée sur la réglementation et l'application des normes

Cette approche fondée sur l'application stricte des lois et règlements peut être coûteuse et inefficace. Elle visait quelquefois à dégager la responsabilité de l'entreprise, ce qui n'est plus vrai aujourd'hui, mais à s'assurer qu'il n'existe pas de risques pour les opérateurs, ce qui est différent. Le respect à la lettre de la réglementation pose quelquefois des problèmes insolubles aux exploitants.

##### b) Sécurité fondée sur la seule participation des opérateurs

La participation des opérateurs peut surtout être source d'effets pervers, lorsque par exemple, les participants à la conception, sur la base de leur expérience, multiplient les alarmes qui leur permettront, de mieux contrôler l'atelier dangereux qu'ils ont à exploiter, alors que cette multiplication des alarmes "atomise" leur vision de l'atelier et leur fait perdre de vue la tendance de fond, l'image globale du système, ce qui a conduit dans un processus dangereux à un accident grave, les opérateurs n'ayant pas anticipé la dérive du système.

##### c) Sécurité fondée sur la connaissance de l'activité réelle des opérateurs

Les spécialistes du facteur humain : en appliquant des connaissances générales sur le fonctionnement de l'homme à ces cas particuliers que constituent les systèmes à concevoir, postes de conduite ou machines, peuvent élaborer des modèles limités, mais rigoureusement validés dans leur domaine, pour prévoir les comportements futurs des opérateurs, à partir de l'analyse de systèmes existants, dits sites de référence prendre en compte la sécurité dès la conception.

Il ne s'agit pas de dire que la sécurité ne doit pas être une préoccupation en exploitation, mais la fiabilité d'un équipement est déterminée en grande partie lors de la conception, et ne pourra généralement plus être améliorée radicalement après mise en exploitation sans de nouveaux investissements : les marges de manœuvres seront étroites, entre les difficultés techniques, économiques et réglementaires certificatifs.

On pourra agir sur la formation des opérateurs, mais les limites humaines peuvent dans certains domaines être rapidement atteintes (par exemple si les variables à maîtriser en instantané sont

nombreuses en interactions non linéaires, si l'on doit toujours réagir en urgence) ; dans de nombreux cas, la formation n'apportera pas de gain perceptible. On pourra agir aussi sur l'organisation du travail ; les marges de manœuvres sont parfois considérables, mais avec des coûts très variables d'un cas à l'autre. Les interfaces « homme-machine », lorsqu'elles sont informatisées, donnent de nouvelles marges de manœuvre intéressantes ; dans ce cas, il faut compter avec la difficulté à changer des habitudes les procédures peuvent être changées, mais on risque là aussi de mettre en difficulté des opérateurs qui avaient fait un effort conscient ou non de mémorisation de procédures qui vont devenir obsolètes.

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

#### 4.2.1.2 Principes de prévention

La prévention des risques professionnels repose sur les principes suivants [53]:

**a) éviter les risques**

Supprimer le danger ou l'exposition à celui-ci.

**b) évaluer les risques qui ne peuvent pas être évités**

Apprécier leur nature et leur importance afin de déterminer les actions à mener pour assurer la sécurité et garantir la santé des travailleurs.

**c) combattre les risques à la source**

Intégrer la prévention le plus en amont possible, notamment dès la conception des lieux de travail, des équipements ou des modes opératoires.

**d) adapter le travail à l'homme**

Concevoir les postes de travail et choisir les équipements, les méthodes de travail et de production pour limiter notamment le travail monotone, cadencé ou pénible. Par exemple, la phase d'évaluation des risques peut permettre de repérer des plans de travail d'une hauteur inadaptée pour les salariés (entraînant des contraintes importantes et des efforts inutiles).

**e) tenir compte de l'évolution de la technique**

Assurer une veille pour mettre en place des moyens de prévention en phase avec les évolutions techniques et organisationnelles

**f) remplacer ce qui est dangereux par ce qui ne l'est pas ou par ce qui l'est moins**

Éviter l'utilisation de procédés ou de produits dangereux lorsqu'un même résultat peut être obtenu avec une méthode présentant des dangers moindres.

**g) planifier la prévention**

Intégrer dans un ensemble cohérent la technique, l'organisation du travail, les conditions de travail, les relations sociales et l'environnement. En cas d'intervention de plusieurs entreprises sur un même lieu, organiser la prévention en commun.

**h) prendre des mesures de protection collective**

L'employeur doit donner la priorité aux mesures de protection collective. L'utilisation des équipements de protection individuelle intervient uniquement en complément des protections collectives si elles se révèlent insuffisantes.

**i) donner les instructions appropriées aux travailleurs**

Donner aux salariés les informations nécessaires à l'exécution de leurs tâches dans des conditions de sécurité optimales. Il s'agit notamment de leur fournir les éléments nécessaires à la bonne compréhension des risques encourus et ainsi de les associer à la démarche de prévention.

Ces principes doivent être mis en œuvre en respectant les valeurs essentielles et les bonnes pratiques de prévention. Ces principes montrent le caractère plurifactoriel (organisationnel, humain, technique...) des risques professionnels.

## 4.2.2 Qualité optimale en conception

Lorsqu'un consommateur parle de qualité, il veut dire beaucoup de choses différentes ; aussi est-il difficile de concevoir des équipements satisfaisant toutes les exigences en même temps». Si cette notion de qualité est floue et subjective pour le consommateur commun, il en est tout autrement pour les entreprises.

Le concept « qualité » a été défini dans le cadre de la norme internationale ISO 8402 et par la norme AFNOR NFX50-120 comme étant : « l'ensemble des propriétés et caractéristiques d'un équipement ou service qui lui confèrent l'aptitude à satisfaire des besoins exprimés ou implicites de l'utilisateur» [20].

La norme précise de plus [9] :

« Dans le contexte contractuel, les besoins sont spécifiés tandis que dans d'autres contextes les besoins implicites devraient être identifiés et définis, les besoins peuvent changer avec le temps. Le terme qualité n'est pas utilisé pour exprimer un degré d'excellence dans un sens comparatif non plus dans un sens quantitatif pour des évaluations techniques ; la qualité d'un équipement est influencée par de nombreuses phases d'activités interdépendantes, telle que la conception, la production, le service après-vente et la maintenance.... ».

La qualité est un résultat qui se constate en utilisation, donc en général, quand il est trop tard pour faire quelque chose. Aussi est-il important de mettre en place, tout au long du processus d'élaboration d'un nouveau équipement, des méthodes et outils de travail pour construire et assurer sa qualité.

#### 4.2.2.1 Assurance qualité en conception

Selon ISO 8402 l'assurance qualité peut être définie comme « Ensemble des activités préétablies et systématiques mises en œuvre dans le cadre du système qualité, et démontrées en tant que besoin, pour donner la confiance appropriée en ce qu'une entité satisfera aux exigences pour la qualité. »

La relations industrielles entre clients et fournisseurs évoluent favorablement à partir de relations de défiance vers des relations de confiance. Ceci est le résultat de la mise en place de système d'assurance de la qualité. En écrivant ce que l'entreprise fait, en faisant ce qu'elle écrit, et en donnant la possibilité de se faire auditer en interne et en externe par rapport à ce référentiel écrit, l'entreprise se donne les moyens de mériter la confiance de ces clients.

Un mouvement important de normalisation de ces références a donné naissance en 1987 à la série des normes ISO 9000. Ces normes internationales donnent des directives pour construire l'assurance de la qualité. Elle exprime également des exigences au travers des référentiels ISO 9001, 9002, 9003, par rapport auxquels une entreprise peut se faire certifier. Le choix référentiel est fonction de son domaine d'activité et du « périmètre de certification ». Les entreprises ayant, par exemple, une fonction de conception de produit et souhaitant être en « assurance qualité » pour cette fonction peuvent se faire certifier par organisme accrédité. Dans certains secteurs industriels, ces exigences sont considérées comme insuffisantes et font l'objet de compléments. Quel que soit le référentiel, la démarche est globalement la même : elle établit un lien logique entre le fait que si le système qualité d'une activité est formalisé et est réputé efficace, le produit de cette activité sera de « qualité ». Ce mouvement de certification connaît une ampleur qui dépasse les attentes de ses initiateurs, et bien que faisant l'objet de nombreuses critiques il semble être une tendance lourde pour les années à venir. Dans ce contexte les équipes concernées par la conception de produit nouveaux, et en particulier les chefs de projet, vont devoir formaliser leurs pratiques de manière à donner confiance a priori en leur capacité à anticiper et à gérer les risques.

Au-delà de la confiance, les démarches qualité autorisent les équipes de conception à sortir des sentiers battus et peuvent être un stimulant très efficace pour la créativité. Une équipe projet mettant en œuvre une démarche qualité dans le cadre de la conception d'un produit nouveau,

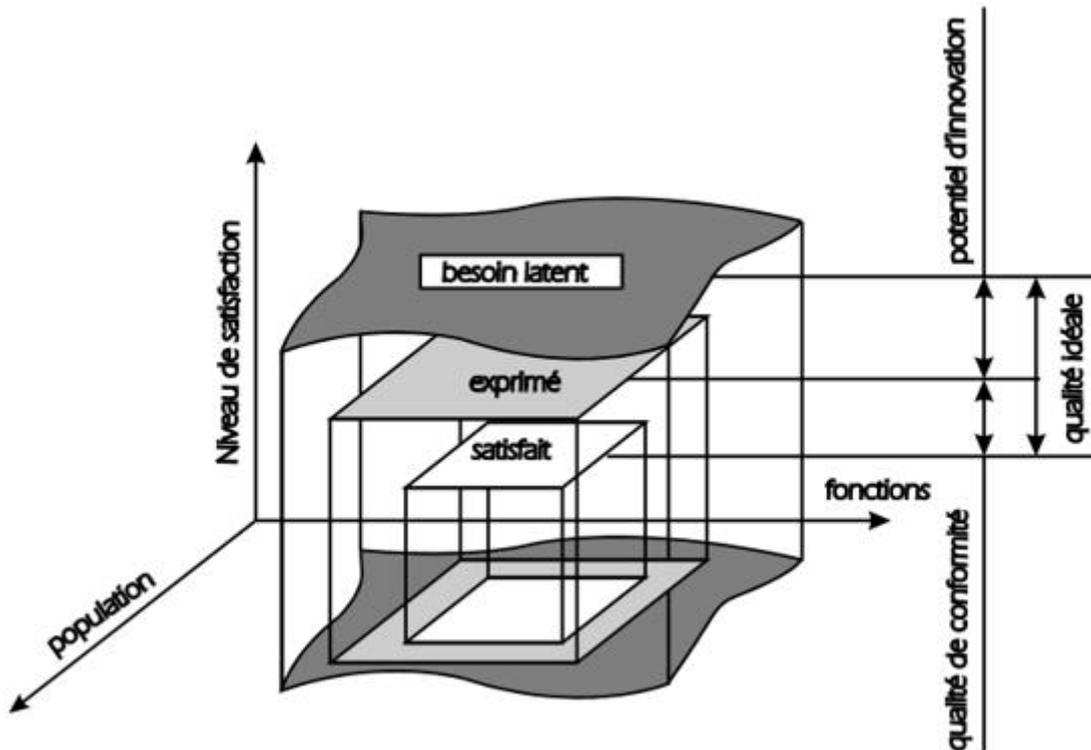
peut bénéficier d'une synergie entre la créativité des concepteurs et la rigueur d'une démarche qualité.

#### 4.2.2.2 Synergie entre qualité et conception

La conception d'un équipement suppose de la créativité. La qualité demande de la rigueur. Rigueur et créativité sont deux aptitudes humaines qui, en général, s'opposent. Pour que cette opposition puisse être positive il est nécessaire que l'entreprise favorise la synergie entre ces deux capacités. Une modélisation de la relation entre la qualité et la conception de produit nouveaux peut se faire au travers des relations entre besoin latent. Besoin exprimé et besoin satisfait. Dans un espace à trois dimensions faisant intervenir [9] :

- la dimension population que l'on peut caractériser, par exemple, par des socio-styles ;
- la dimension fonction (au sens de l'analyse fonctionnelle) ;
- la dimension « niveau de satisfaction », pouvant être associée aux performances, à la « qualité perçue ». (figure 4.2)

Dans ce schéma, le potentiel d'amélioration d'un produit, situé entre le besoin satisfait et le besoin exprimé, peut être appelé « qualité de conformité ». La part entre le besoin exprimé et le besoin latent représente le potentiel d'innovation. L'écart entre le besoin satisfait et le besoin latent est un idéal impossible à atteindre mais qui doit être un objectif de progrès pour les concepteurs.

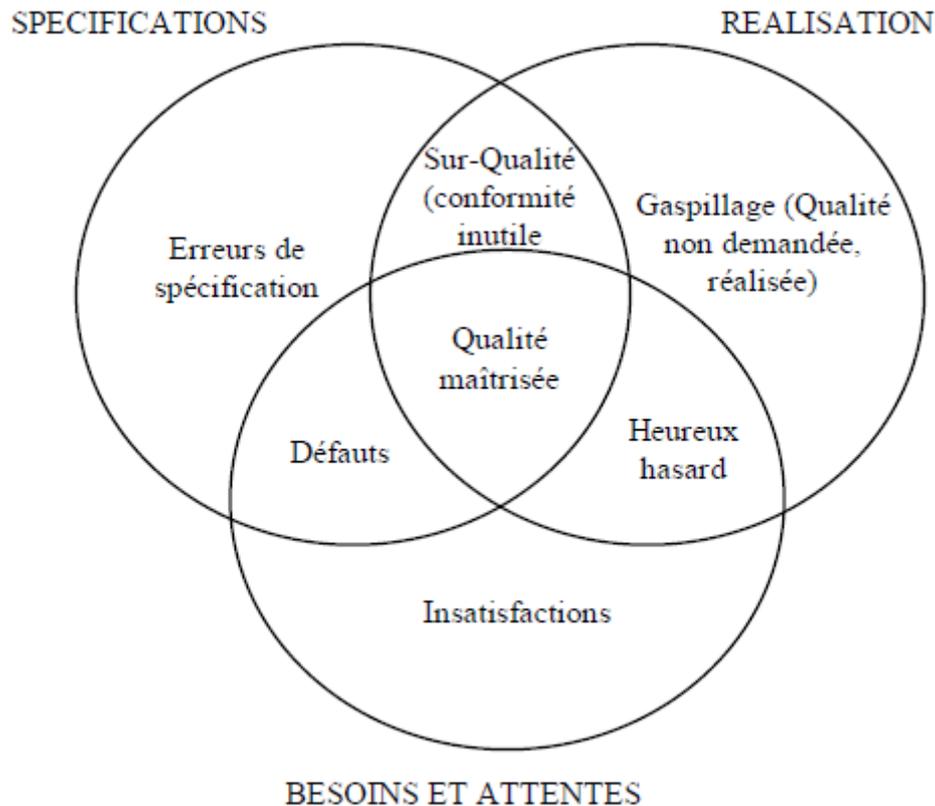


**Figure 4.2** Synergie entre qualité et conception de produits nouveaux [9].

Une autre modélisation de cette synergie est proposée par l'AFNOR : les domaines correspondants aux besoins et attentes, aux spécifications, et à la réalisation sont représentées par trois cercles (figure 4.3)

- Dans la zone centrale : les trois domaines se recouvrent : la qualité est maîtrisée (au sens zéro défaut)

Dans les autres zones, sont définis la « sur-qualité », « les défauts », « gaspillage » et en fin une notion « d'heureux hasard ». Cette notion d'heureux hasard correspond à la satisfaction de besoins non spécifiés.



**Figure 4.3** Synergie entre qualité et conception de produits nouveaux [9].

Dans une démarche de conception d'un produit nouveau, la qualité intervient essentiellement comme génératrice de procédure visant à garantir que le besoin satisfait par le produit sera la plus proche possible du besoin exprimé. La conception de produits nouveaux s'intéresse à développer de nouveaux concepts de produit les plus proches possible des besoins des utilisateurs.

La qualité d'un produit innovant doit donc se construire tout au long de son développement industriel : de la définition du besoin, à la conception puis lors de sa fabrication, de son utilisation et enfin son recyclage. Ce pilotage par l'aval (le besoin du client) met l'entreprise dans une position d'échange permanente avec son environnement : l'entreprise n'est plus un système fermé, mais une entité en contact avec un ensemble de partenaires dans un environnement en permanente évolution. La démarche qualité aide à définir dans le cadre de la conception d'un produit innovant, le processus de pilotage de l'ensemble des transactions entre tous les acteurs, internes et externe de l'entreprise.

### 4.2.2.3 Maitrise du processus de la maitrise des risques

La mise en place d'une démarche qualité en gestion de projet de conception de produits nouveaux pouvait être une nécessité, à la fois contrainte et aide. On distingue deux grandes étapes dans l'histoire de l'évolution de la qualité dans les entreprises industrielles : le passage de contrôle de produit fabriqué, à la maitrise du processus de production, puis la généralisation de la démarche à l'ensemble des fonctions de l'entreprise.

Dans une vision globale du fonctionnement de l'entreprise, la prise en compte de la qualité dès l'expression des besoins du client et tout au long de la conception du produit est fondamentale pour construire la qualité du produit. La mise en place de la démarche qualité en conception de produits nouveaux doit suivre la même évolution que celle de la qualité en production : après avoir mis en place des procédures de contrôle du résultat de l'activité de conception, il faut s'attacher à modéliser le processus de conception de produits nouveaux et mettre en place des moyens de maitrise de ce processus.

Les moyens de contrôle de la conception sont basés sur des activités d'évaluation des solutions par comparaison les états envisagés et ceux obtenus, entre les caractéristiques spécifiées pour le produit et celles calculées. Ces caractéristiques peuvent être justifiées sur des simulations, des maquettes, des prototypes, des calculs de fiabilité.

En ce qui concerne le processus, il est caractérisé par son instabilité, car sujet à défaillance. Dès lors, les chefs de projet ainsi que les responsables sont régulièrement confrontés au problème de l'évaluation des projets [9].

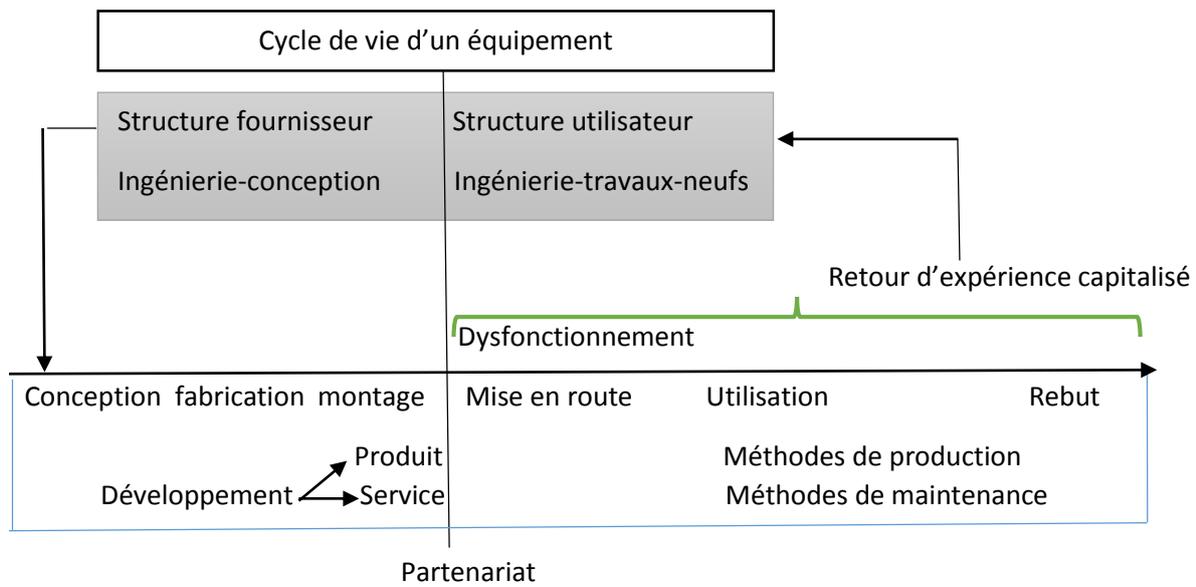
Pour répondre à la problématique de mise en place de la qualité dans le cadre de la gestion de projet de conception de produits nouveaux, nous proposons d'étudier les défaillances potentielles, la nature des risques que l'on peut prendre ainsi que les conséquences de ces défaillances pour tels projets.

### 4.2.3 Service « ingénierie-travaux neufs »

C'est un amont, par les travaux neufs que débute la prise de responsabilité de la maintenance, pour l'entreprise utilisatrice. Le service « ingénierie-travaux neufs » est une structure en liaison directe avec le service « méthodes de maintenance », en exploitation du retour d'expérience. C'est aussi et surtout la structure d'interface avec le fournisseur. En liaison avec la maintenance et la production, il est maître d'œuvre [7]:

- l'exploitation pertinente du retour d'expérience capitalisé en interne ;
- l'élaboration du cahier des charges ;

- l'appel d'offre et du choix du matériel et du fournisseur, en partenariat avec la production ;
- la définition des éléments du soutien logistique et de l'aptitude à la maintenance ;
- l'intégration de ce matériel dans l'infrastructure existante ;
- la formation des futurs utilisateurs (production et maintenance) éventuellement chez le fournisseur.



**Figure 4.4** Investir dans un service de qualité [7].

Les conditions de partenariat fournisseur/utilisateur ainsi que les conditions du retour d'expérience sont à imaginer et à formaliser : c'est un défi important, abordé et résolu pour la fourniture des grands systèmes, mais souvent négligé pour la fourniture de biens d'équipement.

#### 4.2.4 Soutien Logistique Intégré (SLI)

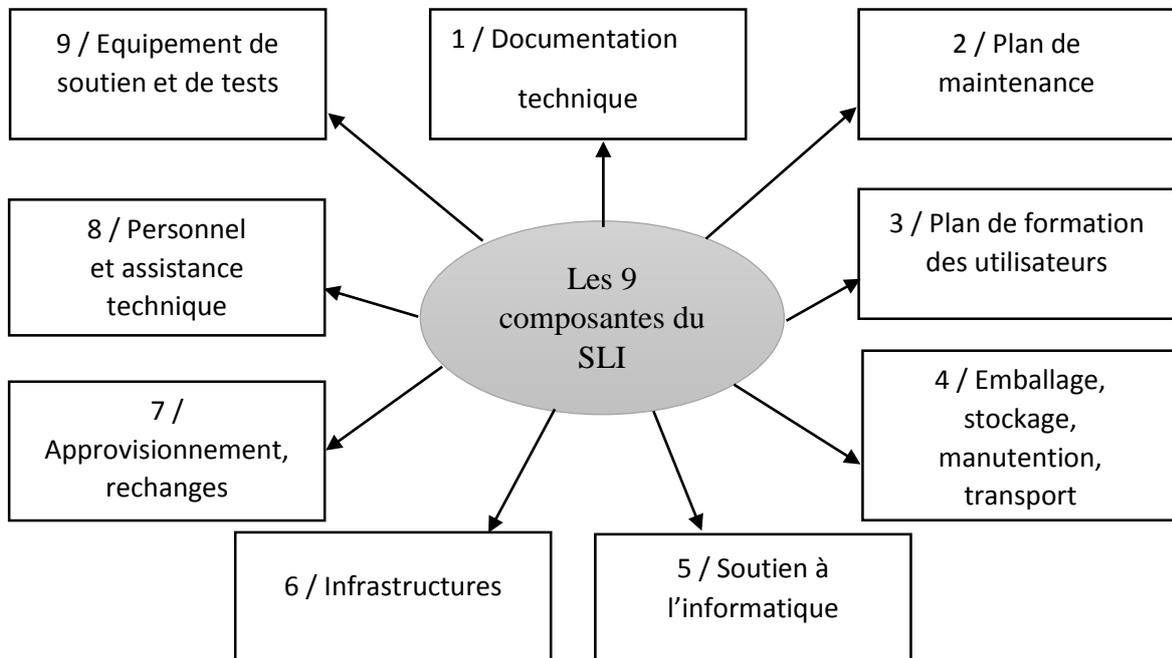
Le soutien logistique intégré consiste à assurer le maintien en conditions opérationnelles d'un équipement afin que ce dernier puisse assurer les missions pour lesquelles il a été conçu, pendant toute sa durée de vie. Il s'agit d'optimiser le couple disponibilité opérationnelle / coût de possession de l'équipement.

Le SLI consiste à intégrer, lors de la conception d'un équipement, les contraintes d'aptitude au soutien et les services associés qui assureront sa disponibilité pendant toute la période d'utilisation jusqu'à la mise au rebut.

La démarche SLI a fait ses preuves en terme d'efficacité ; et donc notre propos est d'adapter chaque élément du SLI à des équipements industriels modestes de façon à proposer une trame de rédaction d'un cahier des charges maintenance à destination des travaux neufs. Cela de façon

satisfaire les exigences d'exploitation et de maintenance d'un équipement en terme de ressources matérielles, humaines et documentaires [7].

- Le SLI est un facteur incontournable de réduction de LCC (coût du cycle de vie)
- Les métiers de SLI sont mal identifiés et dans la plus part des cas non identifiés.



**Figure 4.5** Composantes du SLI [7].

#### 4.2.5 Impact de la conception sur la maintenance

D'après des chercheurs, les activités de maintenance sont influencées par la conception de trois façons [27] :

- **en premier lieu**, le nombre de défaillances pendant le cycle de vie de l'équipement et combien il peut être prédit pour l'entretien. C'est d'habitude mesuré du point de vue de l'intégrité du produit, la probabilité que l'équipement doit être fiable pour une période donnée quand il est utilisé dans les conditions de fonctionnement prédéterminées.

- **Deuxièmement**, c'est la conception qui délimite l'aisance, l'exactitude, la sécurité et l'économie d'exécuter les actions de maintenance. Ceux-ci représentent l'aptitude d'exploitation du produit et ont une forte influence sur le temps et les heures de la main-d'œuvre qui sont exigées pour les tâches d'entretien. Concevoir des décisions sur le matériel choisi, la dimension des composantes et l'architecture de l'équipement détermine l'intégrité de l'équipement et l'aptitude d'exploitation. Une intégrité augmentée peut, par exemple, être accomplie en utilisant des composantes redondantes et en augmentant l'aptitude d'exploitation peut être accomplie en plaçant des points d'entretien aux endroits facilement accessibles.

- **Troisièmement**, la conception d'équipement détermine que les ressources de maintenance sont tenues d'exécuter la tâche d'entretien. Par exemple, il dépend du poids et la grandeur des composantes de l'équipement à combien d'ouvriers d'entretien sont nécessaires pour échanger une composante. Le niveau de difficulté des tâches de maintenance détermine le niveau de l'entraînement exigé pour les techniciens, et quand les détecteurs sont construits pour contrôler les conditions d'installation, pour mieux prédire les activités d'entretien, le personnel et l'équipement sont exigées pour traiter les renseignements récupérés [39].

La sélection des ressources d'entretien fait une partie de conception. Le service conception inclut aussi des tâches comme la sélection d'ateliers, outils, personnel et pièces de rechange. Idéalement, c'est fait simultanément avec la conception de l'équipement. C'est tous les deux la vision dans le concept de Soutien Logistique Intégré et Produit/Service-System (conception (PSS)). Beaucoup de recherches récentes et pertinentes sont réalisés sous le thème de design de PSS. Un PSS combine un bilan de santé le produit et un service non-physique, pour que les systèmes puissent être optimisés pour le résultat désiré, par exemple une production particulière.

### 4.3 Standardisation des composantes et des sous-systèmes

La définition des matériels et matériaux adaptés aux services demandés fait l'objet, en général, d'un cahier des charges spécifique, s'appuyant lui-même sur des normes technologiques (NE EN, ISO, DIN, API, ASTM...). Il est bon que les exigences particulières au titre de la sûreté de fonctionnement, y soient rappelées avec, éventuellement, des précisions concernant les normes à respecter, l'arborescence des recettes à formaliser, en usine.

Les exemples varient à infini ; ils portent sur des matériaux (métalliques, ferreux, non ferreux, non métalliques, calorifuges, réfractaires, etc.), des composants mécaniques standards (roulements, accouplements, joints, boulonnerie...), des organes de liaisons hydrauliques (tuyauteries, robinetterie, raccorderie...), des équipements mécaniques (pompes, compresseurs, moteurs, turbines), des appareils chaudronnés (réservoirs, capacités sous pression, échangeurs, réacteurs.) des équipements électriques (transformateurs, moteurs électriques, organes de distribution, de coupure, de protection, câblerie...), des organes d'automatismes, de commandes numériques, de sécurité, de régulation, de télécommunication... Cette liste n'est évidemment pas exhaustive ; il est rare que ces composants élémentaires ne trouvent pas dans des normes nationales ou internationales leur définition adaptée au service attendu dans des conditions données [22].

### 4.3.1 Règles de standardisation

La standardisation des composants s'inscrit à la fois par rapport à des choix antérieurs sur des installations existantes et par rapport au projet en cours lui-même. Il convient de fixer les règles auxquelles doivent répondre les équipements, organes, pièces de rechange spécifiques ou banales pour respecter une certaine homogénéité. La standardisation n'est pas un but en soi et a ses limites appréciables dans chaque cas ; elle ne doit pas se faire au détriment du bénéfice de l'évolution technologique. Elle doit, par contre, répondre à un souci de réduction des stocks de pièces de rechange et d'opportunité d'interchangeabilité de composants, antérieurs à l'investissement et/ou à choisir lors de l'investissement projeté. C'est un exercice à pratiquer dans l'esprit de l'analyse de la valeur : qu'apporte la standardisation en termes de coût d'investissement? Que doit-elle rapporter en termes de coût d'exploitation/ maintenance pendant n années du cycle de vie pour que le coût global soit optimal ?

Exemples de spécification de standardisation [21] :

1. pour un équipement : l'équipement proposé devra répondre à une norme. De plus, ses composants devront être strictement identiques à un modèle acquis par le maître d'ouvrage ; le fournisseur précisera les éventuelles non-conformités et les justifiera sur des arguments technico-économiques (sûreté de fonctionnement, prix de revient, durée de vie, etc.) et des expériences probantes.
2. Pour des composants standards : le constructeur ou le concepteur proposera une robinetterie standardisée. De plus, pour une dimension donnée, il ne devra proposer qu'une seule marque de robinets, avec garantie d'interchangeabilité des organes, de leurs composants et leurs pièces de rechange. Toute demande de dérogation devra être justifiée par des considérations techniques et économiques probantes et s'appuyer sur des références éprouvées.
3. Pour une famille d'équipements (pompes centrifuges) : le constructeur installera des pompes centrifuges répondant des normes. Il devra, en outre, justifier ses choix en fonction d'une : homogénéité de fourniture : un tableau d'interchangeabilité; faisant apparaître, pour chaque tranche de puissance, les caractéristiques spécifiques (pressions, débits,...), la similitude des équipements proposés, de leurs composants et de leurs pièces de rechange.

## 4.4 Intégration des indicateurs de maintenabilité en conception

### 4.4.1 Evaluation de la maintenabilité en conception

Dans la littérature, une approche pour l'intégration de la maintenance en conception est proposée avec des outils de type « conception pour X » [26]. Ce concept intègre en première partie des outils de types « conception pour l'assemblage », « conception pour la fabrication » et « conception pour la fiabilité » qui sont appliqués dans le but de reconception d'une entité pour analyser a posteriori la solution proposée. Ces deux types intègrent la fabrication dans le processus de la conception alors que notre étude se focalise sur l'intégration de la maintenance qui est portée par le « conception pour la maintenabilité ».

### 4.4.2 Conception pour la maintenabilité

La « conception pour la maintenabilité » est un concept qui vise à assurer au produit dès la phase de conception la capacité d'être maintenu sans difficulté tout au long de son cycle de vie utile avec un coût optimal. La maintenabilité contient plusieurs critères qui sont qualitatifs et quantitatifs, et plusieurs d'entre eux sont à intégrer en phase de conception selon la nature de l'entité. De ce fait, la norme X60-301 et l'institut de Sécurité de fonctionnement proposent onze critères relatifs aux opérations de maintenance [26] : accessibilité ; testabilité ; modularité ; démontabilité ; détectabilité ; visibilité ; nettoyabilité ; réparabilité ; identification et repérage et interchangeabilité.

#### 4.4.2.1 Processus d'évaluation et de validation du MTTR

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

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

Ce processus est appliqué pour l'évaluation de la maintenabilité en conception. On faisant le choix d'évaluer en conception la moyenne des temps techniques de réparation MTTRs comme indicateur pour évaluer le niveau de maintenabilité d'une solution conçu par le

concepteur pendant la phase de conception. En supposant que la solution à évaluer à une structure série, le MTTRs est calculé comme suit [30] :

$$MTTR_s = \sum_i \lambda_i MTTR_i / \sum_i \lambda_i \quad (4.1)$$

$$MTTR_i = \sum_k t_{ik} \quad (4.2)$$

Avec :

- MTTRs: moyenne des temps de réparation de la solution proposée
- MTTRi : moyenne des temps de réparation d'un composant i
- $\lambda_i$  : taux de pannes des composants i
- $t_{ik}$  : durée de l'étape k du processus actif de maintenance corrective du composant (i) d'autre part, nous supposons que le cahier de charge définit un seuil MTTR que le système doit satisfaire.

En somme, le processus générique de validation comporte trois sous-processus : la collecte des données, l'évaluation de l'indicateur et l'analyse des résultats. Une décomposition de chacun des trois sous-processus et la description détaillée de chaque sous-processus jusqu'aux étapes élémentaires est nécessaire. Les données d'entrées, leurs sources d'obtention, les données de sorties et les outils à mettre en œuvre dans chaque étape élémentaire sont indispensables à définir. Le processus proposé permet au concepteur de faire une évaluation du MTTR de la solution conçue. Dans la littérature, nous trouvons plusieurs outils indispensables tels que les modèles de calculs les algorithmes. Mais, d'autres sont encore à développer.

#### 4.4.4 Recommandation d'amélioration de la maintenabilité

En recensant les écrits traitants l'amélioration de la maintenabilité, la recommandation lors de la conception d'un équipement peut être comme suit [26] :

- fabriquer des équipements munis des dispositifs de vérification assurant le suivi du bon fonctionnement des matériels tel les voyants permettant la visualisation des niveaux des huiles,
- repérage et accessibilité des points de mesure,
- qualité de la documentation de maintenance en définissant des manuels exigibles contenant des procédures et méthodes de vérification,
- définir les procédures et l'aptitude au démontage et remontage des équipements et leurs éléments constitutifs avec les moyens de manutention requis,

- définir la nomenclature et la durée de vie de chaque élément du système pour faciliter, la maintenance préventif et l'approvisionnement des pièces de rechange,
- définir les contraintes influençant sur la maintenabilité tel que les contraintes environnementales et les contraintes d'exploitation,
- définir les spécifications des composants tout en précisant le type des matériaux, la nature des composants et les liaisons qui relient chaque composant du système,
- définir au préalable les outillages d'intervention,
- définir des méthodes d'évaluation et d'inspection pour chaque élément.

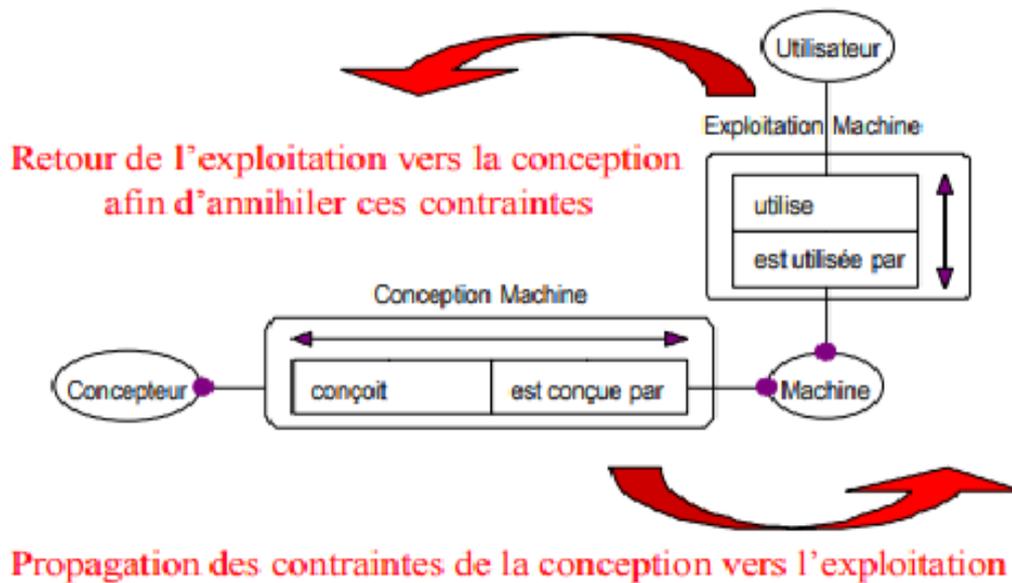
## 4.5 Préconisations d'exploitation et maintenance

L'exploitation du retour d'expérience est à la base des données nécessaires à l'établissement du cahier des charges qui sera rédigé par le service « ingénierie-travaux neufs » en collaboration étroite avec les « méthodes-maintenance » [7].

On doit toujours vérifier les recommandations des constructeurs /fournisseurs pour l'utilisation et l'entretien de l'équipement. Si celle-ci ne constituent pas directement des manuels d'exploitation et de maintenance, elles doivent permettre de les établir. Le meilleur moyen de coercition aura été, naturellement, d'en prévoir la forme et le contenu dans la spécification de sûreté de fonctionnement [7].

### 4.5.1 Intégration des contraintes d'exploitation en conception

La conception contrainte / exploitation de la machine aux seuls critères qu'elle a pris en compte et, de plus, les contraintes d'exploitation de la machine ne sont pas forcément prises en considération dès la conception [2].



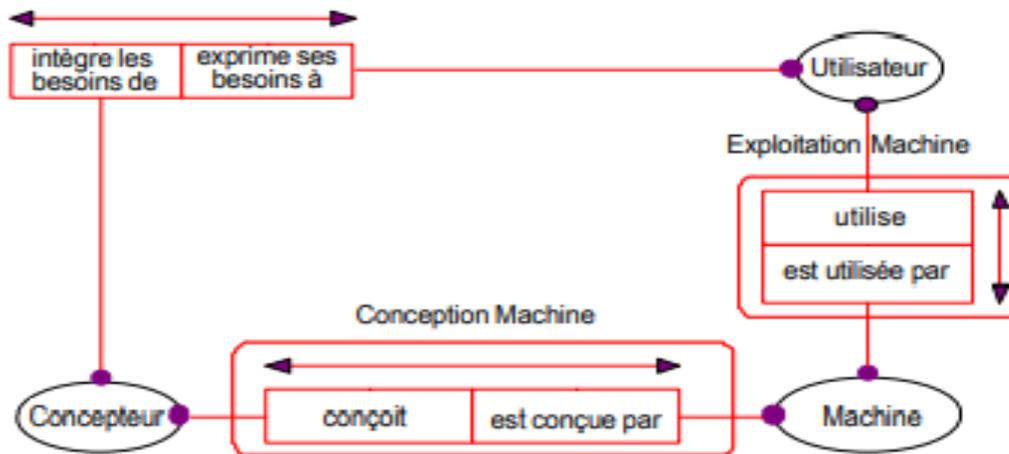
**Figure 4.6** Mise en évidence des contraintes liées à la conception en exploitation des machines [2].

Une des premières réponses à apporter concerne l'intégration des besoins de l'utilisateur en conception. De façon à contraindre le moins possible l'exploitation de la machine en fonction de la conception qui en a été faite, il est nécessaire d'envisager une participation des utilisateurs en conception, ou plus exactement un retour de l'exploitation vers la conception.

L'exploitation peut mettre ainsi en évidence des problèmes de conception, ce qui nécessite une re-conception au moins partielle de la machine. Le but est d'intégrer dès la conception les besoins des utilisateurs.

#### 4.5.2 Prise en compte de l'utilisation en conception

Les concepteurs ont souhaité de plus en plus intégrer les besoins de leurs clients par leur collaboration à la rédaction d'un cahier des charges et dans les premières phases de spécification et de conception. Ainsi s'est instaurée une relation plus directe « Concepteur / Utilisateur ».



**Figure 4.7** Relation utilisateur / concepteur [2].

Une conception de machine est décidée de manière unique par le couple (concepteur / machine). Une exploitation de machine est définie de manière unique par le couple (utilisateur / machine). Chaque concepteur émerge les besoins d'un ou plusieurs utilisateurs, chaque utilisateur exprime ses besoins un ou plusieurs concepteurs. En cette relation entre ces deux acteurs, par le biais de la rédaction d'un cahier des charges.

Cette relation entre ces deux acteurs, par le biais de la rédaction d'un cahier de charge, Permet ainsi d'améliorer la prise en compte en conception de certains aspects attendus en exploitation, tels que les divers comportements et les divers modes de production. Cette rédaction commune en amont de la conception permet de diminuer les erreurs potentielles car les principaux acteurs de l'exploitation émettent leurs attentes dès la conception. Cependant, une telle relation ne permet pas de relier directement l'exploitation de la machine avec la conception qui en a été faite du point de vue du modèle. En effet, cette liaison est basée sur des relations entre acteurs s'exposant ainsi à une fragilité due à des problèmes humains, et elle peut être brisée à tout moment [2].

### 4.6.3 Ergonomie d'exploitation

C'est une combinaison du grec « ergon » qui veut dire (travail) et « nomos » c'est-à-dire (normes) l'ergonomie est la discipline scientifique qui s'occupe de la compréhension des interactions entre le facteur humain et les équipements. C'est aussi une profession qui applique les théories, les principes, les données et les méthodes pour concevoir dans le but d'optimiser le bien-être des utilisateurs et la performance des équipements.

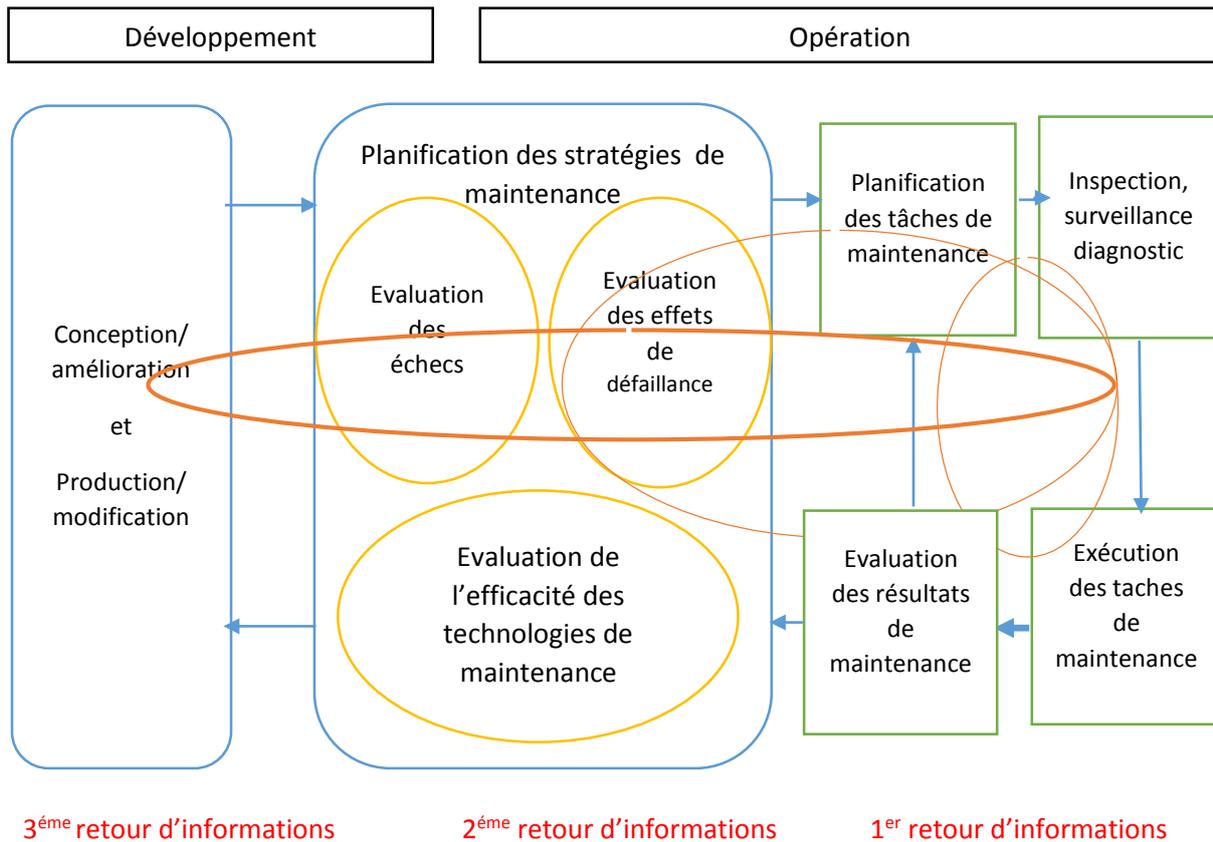
L'ergonomie contribue à la conception et à l'évaluation des tâches, des produits, des conditions de travail et des systèmes pour les rendre compatible avec les besoins, les capacités et les limites des êtres humains.

#### 4.5.4 Utilisation de connaissances de maintenance dans la conception

Il est communément convenu que la connaissance de l'utilisation de produits peut aider à améliorer le courant ou à développer de nouveaux produits et des services. Renseignements et données sur les dessins d'échec et d'utilisation de l'équipement peut aider à obtenir l'aperçu sur le comportement d'échec d'équipement. L'analyse de temps et les heures de la main-d'œuvre exigées pour exécuter des tâches de maintenance peuvent donner une compréhension améliorée du temps consommation d'activités d'entretien et l'efficacité du processus d'entretien. Aussi de valeur les renseignements résident dans les employés de l'entreprise dans la forme de connaissances, savoir-faire, capacités.

On peut se rassembler, conservant et analysant ces renseignements sur les produits et les services, est un thème adressé dans littérature de direction de cycle de vie, dans le contexte de connaissance d'entretien [24].

Des chercheurs ont proposé les trois boucles de retour pour la connaissance d'entretien elles sont représentées dans la figure (figure 4.8) La première boucle est pour contrôler le travail d'entretien de routine, la deuxième pour améliorer la planification de stratégie d'entretien et la troisième pour l'amélioration continue du produit pendant son cycle de vie complet.



**Figure 4.8** Retour d'information pour les connaissances de maintenance [28].

La valeur d'utiliser la connaissance d'entretien sur la conception est aussi démontrée par la recherche d'étude de cas. Dans le contexte de développer la conception (PSS) (Produit Service /Système), ils développent un service de réutilisation de connaissance, dans lequel la connaissance de service s'est entendue tant à l'opération de service qu'à la conception de produit est classifié. Le cadre aide à identifier des tâches de service qui pourraient être rendues plus faciles à jouer, en faisant des changements dans la conception des produits [36].

Il est important de considérer la conception d'équipement et de son service de l'entretien simultanément. Cela aide à créer l'équipement et les services de maintenance qui sont bien alignés et ainsi optimal contribuent à un système de production bien jouant. Créer de tels systèmes, la connaissance qui est disponible de l'utilisation et l'entretien de l'équipement peuvent avoir un rôle clé.

## 4.6 Enjeu opérationnel et économique

Obtenir rapidement un bon TRS et pour ce qui concerne la maintenance, une bonne disponibilité et ça, en fonction des besoins de l'environnement propre à l'utilisateur.

La réflexion économique relative à l'environnement d'un équipement de production repose sur une inéquation simple qui est une vue de l'avenir :

$$\text{Surcoût consenti à l'acquisition} < \text{gain espéré sur le cycle d'exploitation} \quad (4.3)$$

Le surcoût est constitué de l'intelligence mise au service de l'anticipation des problèmes par la mise en œuvre de l'assurance disponibilité et par la génération d'un plan de maintenance. Ces surcoûts d'étude seront complétés par des coûts liés aux exigences de fiabilité de composants sélectionnés comme « sensibles » et au déverminage des systèmes utilisés.

Le gain espéré repose sur une vision à long terme de tous les facteurs constitutifs du LCC. En particulier, sur la mise au point rapide suivie de la diminution du nombre d'indisponibilité de l'équipement, donc sur la réduction des coûts directs et surtout indirectes des défaillances.

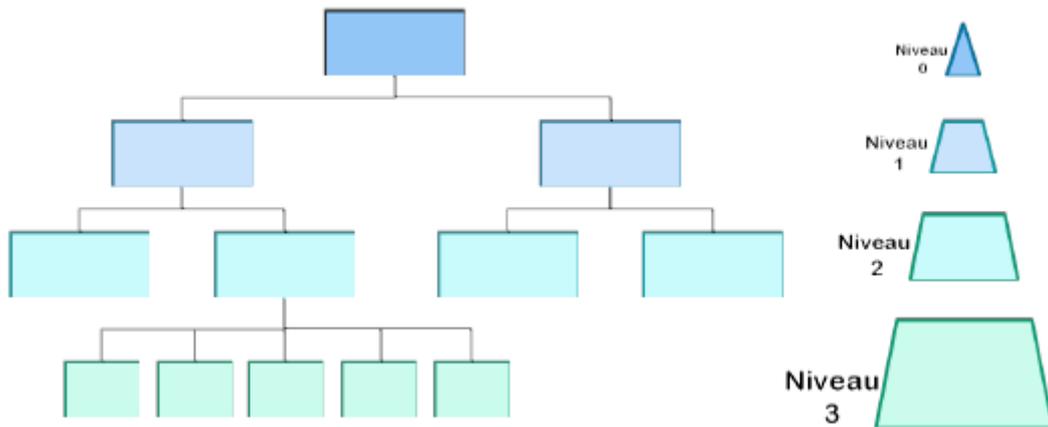
## 4.7 Industrialisation

### 4.7.1 Modélisation et architecture d'un système

La conception d'un équipement passe par la définition et la validation de trois architectures distinctes : l'architecture fonctionnelle, l'architecture matérielle et l'architecture opérationnelle.

- L'architecture fonctionnelle : est un résultat de l'activité de spécification, est une description des solutions envisagées pour répondre aux besoins. Elle exprime l'ensemble des activités de l'équipement.

Le modèle fonctionnel hiérarchique peut être utilisé ; il débute par la fonction ou la mission principale du système ; la mission est décomposée ensuite en un ensemble des nœuds qui correspondent aux fonctions essentielles, puis aux sous-fonctions et enfin aux fonctions élémentaires.



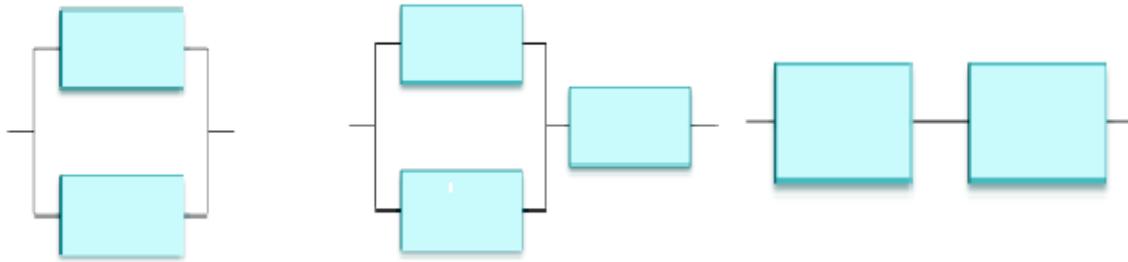
**Figure 4.9** Modèle fonctionnel hiérarchique [39].

Ces dernières forment les feuilles d'une construction d'un arbre qui correspondent à des composants simples primaires. Ce modèle hiérarchique est souvent utilisé pour représenter les équipements de contrôle commande.

- L'architecture matérielle : elle définit l'ensemble des équipements matériels (sous-systèmes, capteurs, actionneurs, ...) nécessaires pour la réalisation des fonctions décrites par l'architecture fonctionnelle. Pour chaque équipement, ces caractéristiques sont connues, et nous utiliserons en particulier celui du coût.
- L'architecture opérationnelle : c'est la projection de l'architecture fonctionnelle sur une architecture matérielle, en affectant des fonctions à un équipement. Les différentes architectures opérationnelles possibles sont évaluées au niveau de leurs coûts, et au niveau de la sûreté de fonctionnement.

Les fonctions "coût" prennent en compte le coût financier de la solution et le coût de maintenance.

L'architecture opérationnelle peut être envisagée selon différentes structures dont une représentation peut être le diagramme des blocs (figure 4.10). Un tel diagramme permet de comprendre et d'anticiper le comportement de l'équipement [39]. Dans cette structure en blocs élémentaires, chaque bloc a une fonction particulière et le diagramme décrit les interactions entre éléments.



**Figure 4.10** Exemples de diagrammes des blocs [39].

Lorsque deux ou plusieurs sous-systèmes sont reliés ensemble, la combinaison des différents blocs produit un sous-système de niveau supérieur.

Ceux-ci sont nécessaires pour la réalisation de la fonction attendue. La structure de l'équipement définit la disposition des composants. Ce qui fait, il faut une stratégie de montage qui permette le bon positionnement des composantes prenant en compte leur qualité, leurs aptitudes de montage et leurs durées de vie,

#### 4.7.2 Méthode de sélection de l'architecture optimale d'un équipement

Puisque la performance des équipements se dégrade progressivement avec l'âge, il est nécessaire de les restaurer et les maintenir à un niveau spécifique, ce qui permet à l'équipement de remplir sa mission définie. Cet objectif pourrait être atteint par la réalisation de certaines opérations de maintenance préventive pendant la durée de vie utile. Ce qui fait, une multiplication des dépenses consacrées à la maintenance surtout si ces opérations n'étaient pas bien planifiées.

La complexité de l'architecture des équipements peut jouer un rôle négatif en ce qui concerne les frais supplémentaires de maintenance, mais en même temps, la complexité est demandée pour surmonter les défis de production et du marché et peut augmenter la sûreté des équipements. La détermination de choisir une telle architecture doit être fortement justifiée ; dans cette section, la méthode de détermination de la structure optimale d'un équipement est expliquée, elle permet d'assurer la mission au niveau de sûreté requis et avec le maximum possible d'économie en ce qui concerne les frais de maintenance. Cette architecture est sélectionnée en fonction de la meilleure contribution de telle structure dans le processus d'optimisation des actions de maintenance sous les mêmes conditions de sûreté et pour la même mission. Le problème consiste à sélectionner l'architecture de l'équipement (Stx) capable de réaliser les missions avec le moindre coût de maintenance sur l'ensemble de sa durée de vie avec [39] :

- **Stx** : architecture de l'équipement ;
- **x** : indice de l'architecture ;
- **CStx** : Coût de l'architecture « x » ;
- **Coûtex** : coût de maintenance sur l'ensemble de la vie utile de l'architecture x estimé à l'aide de la méthode de sélection des actions optimales; il est intéressant de mentionner ici que le coût de l'architecture « **CEtx** » devient négligeable si la durée de vie de l'équipement est convenablement étendue :

$$\left[ \begin{array}{l} \text{St1} \\ \text{CSt1} \\ \text{Coûts}_1 \end{array} \right] \quad \left[ \begin{array}{l} \text{St2} \\ \text{CSt2} \\ \text{Coûts}_2 \end{array} \right]$$

$$\text{Structure optimale} = \min (\text{CStx} + \text{Coûtex}) \quad (4.4)$$

### 4.7.3 Méthode de détermination des activités de maintenance

#### 4.7.3.1 Description du processus

L'objectif de la méthode est de déterminer si, compte tenu de son état actuel, l'équipement est capable d'effectuer une mission sans interruption pour opération de maintenance. Globalement, la méthode proposée procède selon la démarche suivante [39] :

1. estimer la fiabilité de l'équipement pour la prochaine mission selon les informations disponibles sur l'état courant de l'équipement.
2. comparer la fiabilité de l'équipement pour cette mission avec la valeur référence de fiabilité, représentant le niveau de risque pris.
3. inventorier les actions de maintenance possibles à effectuer pour l'équipement et selon les conditions d'intervention.
4. pour chaque action possible, une estimation de la fiabilité de la mission est effectuée, en considérant l'action comme effectuée.
5. sélectionner, entre tous les choix possibles des actions précédentes, l'action de maintenance qui apporte le meilleur rapport du coût par rapport aux fonctions requises de l'équipement, on peut prendre comme paramètre l'augmentation de fiabilité avant et après la maintenance.
6. réaliser l'action de maintenance.
7. comparer de nouveau la fiabilité estimée avec la fiabilité référence.

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé la mise en sécurité, en conformité et en disponibilité du futur équipement. Plusieurs approches de la sécurité ont été décrites, suivies des principes de prévention ainsi que la maîtrise des risques. De même, l'intégration d'un indicateur en conception tel que la maintenabilité et le processus d'évaluation de la MTTR. Nous avons montré également qu'il existe une synergie entre la qualité et la conception des produits. En effet l'assurance qualité en conception et la démarche qualité sont des stimulants très efficaces pour la créativité, aussi la conception de l'équipement influence les activités de maintenance.

Enfin, nous avons mis en évidence la propagation des contraintes de la conception vers l'exploitation en passant par l'étude de la modélisation et l'architecture d'un équipement.

# Chapitre 5

## Maintenance et développement durable

## Introduction

Afin de préserver davantage l'environnement des équipements de production, il est impératif aujourd'hui d'intégrer le Développement Durable et l'éco-conception en entreprise, en particulier dans la fonction maintenance.

L'éco-conception, comme valeur du Développement Durable, est un élément indispensable de ce dernier et n'est plus désormais perçue comme une contrainte mais comme une opportunité de différenciation et d'innovation en intégrant les matériaux innovants.

Elle obéit à des critères précis en vue d'intégrer la maintenance tout au long du cycle de vie de l'équipement pour assurer sa durabilité, sa réutilisation et son éventuel recyclage doivent être pensés déjà en conception.

## 5.1 Développement Durable (DD)

### 5.1.1 Définition

Le Développement Durable ne se réduit pas à la protection de l'environnement. Il est défini comme « un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures ».

Le Développement Durable doit être à la fois économiquement efficace, socialement équitable et écologiquement tolérable. Le social doit être un objectif, l'économie un moyen et l'environnement une condition.

Le développement est « durable » s'il est conçu de manière à en assurer la pérennité du bénéfice pour les générations futures [58].

### 5.1.2 Principes

Parmi les principes qui sous-tendent le Développement Durable, nous pouvons mentionner: la précaution en matière d'environnement, l'intégration de la protection de l'environnement comme partie intégrante du processus de développement, la responsabilité et la solidarité internationale, le principe du pollueur-payeur, la participation pour une nouvelle forme de gouvernance. La mise en œuvre de ces différents principes doit permettre d'atteindre les objectifs de lutte contre la pauvreté, de préservation des équilibres de la biosphère et des ressources environnementales dans une perspective de long terme, de favoriser les modes de production et de consommation durables dotés d'une efficacité énergétique élevée, tout cela dans le respect des générations présentes et futures.

Cependant, malgré cette prise de conscience des problèmes environnementaux et de sous-développement, malgré l'accord sur les principes d'une plus grande défense du patrimoine

naturel alliée à une amélioration de la qualité de la vie pour l'ensemble de l'humanité, les actes qui traduiraient de manière conséquente ces principes sont encore trop peu nombreux, et lorsqu'ils existent, ils relèvent plus d'actes isolés que d'une stratégie politique à grande échelle.

Alors, il n'est pas surprenant que, dix années plus tard, divers indicateurs de Développement Durable montrent combien la pression exercée par l'activité humaine sur l'environnement est sérieuse et croissante, et combien les inégalités n'ont cessé de progresser [52]. Rappelons les principes du développement durable [53] :

**principe 1**

Les êtres humains sont au centre des préoccupations relatives au développement durable. Ils ont droit à une vie saine et productive en harmonie avec la nature .

**principe 2**

Conformément à la charte des nations unies et aux principes du droit international, les Etats ont le droit souverain d'exploiter leurs propres ressources selon leur politique d'environnement et de développement, et ils ont le devoir de faire en sorte que les activités exercées dans les limites de leur juridiction ou sous leur contrôle ne causent pas de dommages à l'environnement dans d'autres Etats ou dans des zones ne relevant d'aucune juridiction nationale.

**principe 3**

Le droit au développement doit être réalisé de façon à satisfaire équitablement les besoins relatifs au développement et à l'environnement des générations présentes et futures.

**principe 4**

Pour parvenir à un développement durable, la protection de l'environnement doit faire partie intégrante du processus de développement et ne peut être considérée isolément.

**principe 5**

Tous les états et tous les peuples doivent coopérer à la tâche essentielle de l'élimination de la pauvreté, qui constitue une condition indispensable du Développement Durable, afin de réduire les différences de niveaux de vie et de mieux répondre aux besoins de la majorité des peuples du monde .

**principe 6**

La situation et les besoins particuliers des pays en développement, en particulier des pays les moins avancés et des pays les plus vulnérables sur le plan de l'environnement, doivent se voir accorder une priorité spéciale. Les actions internationales entreprises en matière d'environnement et de développement devraient également prendre en considération les intérêts et les besoins de tous les pays.

**Principe 7**

Les Etats doivent coopérer dans un esprit de partenariat mondial en vue de conserver, de protéger et de rétablir la santé et l'intégrité de l'écosystème terrestre. Étant donné la diversité des rôles joués dans la dégradation de l'environnement mondial, les Etats ont des responsabilités communes mais différenciées. Les pays développés admettent la responsabilité qui leur incombe dans l'effort international en faveur du développement durable, compte tenu des pressions que leurs sociétés exercent sur l'environnement mondial et des techniques et des ressources financières dont ils disposent .

**principe 8**

Afin de parvenir à un Développement Durable et à une meilleure qualité de vie pour tous les peuples, les Etats devraient réduire et éliminer les modes de production et de consommation non-viables et promouvoir des politiques démographiques appropriées .

**principe 9**

Les Etats devraient coopérer ou intensifier le renforcement des capacités endogènes en matière de Développement Durable en améliorant la compréhension scientifique par des échanges de connaissances scientifiques et techniques et en facilitant la mise au point, l'adaptation, la diffusion et le transfert de techniques, y compris de techniques nouvelles et novatrices.

**principe 10**

La meilleure façon de traiter les questions d'environnement est d'assurer la participation de tous les citoyens concernés, au niveau qui convient. Au niveau national, chaque individu doit avoir dûment accès aux informations relatives à l'environnement que détiennent les autorités publiques, y compris aux informations relatives aux substances et activités dangereuses dans leurs collectivités, et avoir la possibilité de participer aux processus de prise de décision. Les Etats doivent faciliter et encourager la sensibilisation et la participation du public en mettant les informations à la disposition de celui-ci. Un accès effectif à des actions judiciaires et administratives, notamment des réparations et des recours, doit être assuré.

**principe 11**

Les Etats doivent promulguer des mesures législatives efficaces en matière d'environnement. Les normes écologiques et les objectifs et priorités pour la gestion de l'environnement devraient être adaptés à la situation en matière d'environnement et de développement à laquelle ils s'appliquent. Les normes appliquées par certains pays peuvent ne pas convenir à d'autres pays, en particulier à des pays en développement, et leur imposer un coût économique et social injustifié.

**principe 12**

Les Etats devraient coopérer pour promouvoir un système économique international ouvert et favorable, propre à engendrer une croissance économique et un Développement Durable dans tous les pays, qui permettrait de mieux lutter contre les problèmes de dégradation de l'environnement. Les mesures de politique commerciale motivées par des considérations relatives à l'environnement ne devraient pas constituer un moyen de discrimination arbitraire ou injustifiable, ni une restriction déguisée aux échanges internationaux. Toute action unilatérale visant à résoudre les grands problèmes écologiques au-delà de la juridiction du pays importateur devrait être évitée. Les mesures de lutte contre les problèmes écologiques transfrontières ou mondiaux devraient, autant que possible, être fondées sur un consensus international.

**principe 13**

Les Etats doivent élaborer une législation nationale concernant la responsabilité de la pollution et d'autres dommages à l'environnement et l'indemnisation de leurs victimes. Ils doivent aussi coopérer diligemment et plus résolument pour développer le droit international concernant la responsabilité et l'indemnisation en cas d'effets néfastes de dommages causés à l'environnement dans des zones situées au-delà des limites de leur juridiction par des activités menées dans les limites de leur juridiction ou sous leur contrôle .

**principe 14**

Les Etats devraient concerter efficacement leurs efforts pour décourager ou prévenir les déplacements et les transferts dans d'autres états de toutes activités et substances qui provoquent une grave détérioration de l'environnement ou dont on a constaté qu'elles étaient nocives pour la santé de l'homme .

**principe 15**

Pour protéger l'environnement, des mesures de précaution doivent être largement appliquées par les Etats selon leurs capacités. En cas de risque de dommages graves ou irréversibles, l'absence de certitude scientifique absolue ne doit pas servir de prétexte pour remettre à plus tard l'adoption de mesures effectives visant à prévenir la dégradation de l'environnement.

**principe 16**

Les autorités nationales devraient s'efforcer de promouvoir l'internalisation des coûts de protection de l'environnement et l'utilisation d'instruments économiques, en vertu du principe selon lequel c'est le pollueur qui doit, en principe, assumer le coût de la pollution, dans le souci de l'intérêt public et sans fausser le jeu du commerce international et de l'investissement.

**principe 17**

Une étude d'impact sur l'environnement, en tant qu'instrument national, doit être entreprise dans le cas des activités envisagées qui risquent d'avoir des effets nocifs importants sur l'environnement et dépendent de la décision d'une autorité nationale compétente.

**principe 18**

Les Etats doivent notifier immédiatement aux autres Etats toute catastrophe naturelle ou toute autre situation d'urgence qui risque d'avoir des effets néfastes soudains sur l'environnement de ces derniers. La communauté internationale doit faire tout son possible pour aider les Etats sinistrés.

**principe 19**

Les Etats doivent prévenir suffisamment à l'avance les Etats susceptibles d'être affectés et leur communiquer toutes informations pertinentes sur les activités qui peuvent avoir des effets transfrontières sérieusement nocifs sur l'environnement et mener des consultations avec ces Etats rapidement et de bonne foi .

**principe 20**

Les femmes ont un rôle vital dans la gestion de l'environnement et le développement. Leur pleine participation est donc essentielle à la réalisation d'un développement durable.

**principe 21**

Il faut mobiliser la créativité, les idéaux et le courage des jeunes du monde entier afin de forger un partenariat mondial, de manière à assurer un développement durable et à garantir à chacun un avenir meilleur .

**principe 22**

Les populations et communautés autochtones et les autres collectivités locales ont un rôle vital à jouer dans la gestion de l'environnement et le développement du fait de leurs connaissances du milieu et de leurs pratiques traditionnelles. Les états devraient reconnaître leur identité, leur culture et leurs intérêts, leur accorder tout l'appui nécessaire et leur permettre de participer efficacement à la réalisation d'un développement durable.

**Principe 23**

L'environnement et les ressources naturelles des peuples soumis à oppression, domination et occupation doivent être protégés .

**principe 24**

La guerre exerce une action intrinsèquement destructrice sur le développement durable. Les états doivent donc respecter le droit international relatif à la protection de l'environnement

en temps de conflit armé et participer à son développement, selon que de besoin.

**principe 25**

La paix, le développement et la protection de l'environnement sont interdépendants et indissociables .

**principe 26**

Les Etats doivent résoudre pacifiquement tous leurs différends en matière d'environnement, en employant des moyens appropriés conformément à la charte des nations unies.

**principe 27**

Les Etats et les peuples doivent coopérer de bonne foi et dans un esprit de solidarité à l'application des principes consacrés dans la présente déclaration et au développement du droit international dans le domaine du développement durable.

### 5.1.3 Trois piliers du développement durable

Qu'elles soient économiques, sociales ou environnementales, les problématiques soulevées par le Développement Durable sont multiples. La première étape avant d'entreprendre une démarche de développement durable, consiste à bien saisir tous les défis. Acquérir une vision à 360° des enjeux est essentiel pour identifier les meilleures pistes d'actions [57].

**1er défi : préserver l'environnement**

Les ressources naturelles ne sont pas infinies, la faune, la flore, l'eau, l'air et les sols, indispensables à notre survie, sont en voie de dégradation. Ce constat de rareté et de finitude des ressources naturelles se traduit par la nécessité de protéger ces grands équilibres écologiques pour préserver nos sociétés et la vie sur terre. Parmi les principaux enjeux environnementaux, les thématiques suivantes ont été identifiées :

- économiser et préserver les ressources naturelles,
- protéger la biodiversité, c'est-à-dire maintenir la variété des espèces animales et végétales pour préserver les écosystèmes,
- éviter les émissions de CO2 pour lutter contre le changement climatique,
- gérer et valoriser les déchets.

**2ème défi : favoriser la cohésion sociale**

C'est la capacité de notre société à assurer le bien-être de tous ses citoyens. Ce bien-être se traduit par la possibilité pour tout un chacun, d'accéder, quel que soit son niveau de vie, aux besoins essentiels : alimentation, logement, santé, accès égal au travail, sécurité, éducation, droits de l'homme, culture et patrimoine, etc. Parmi les principaux enjeux sociaux, les thématiques suivantes ont été identifiées :

- lutter contre l'exclusion et les discriminations, c'est-à-dire respecter et protéger les personnes les plus faibles (en situation de handicap, âgées, minoritaires...), donner l'accès aux droits sociaux pour tous,
- favoriser la solidarité,
- contribuer au bien-être,
- valoriser les territoires.

### **3ème défi : promouvoir une économie responsable**

Il s'agit de concilier la viabilité d'un projet, d'une organisation (performance économique) avec des principes éthiques, tels que la protection de l'environnement et la préservation du lien social. Selon ce système, le prix des biens et services doit refléter le coût environnemental et social de l'ensemble de leur cycle de vie, c'est-à-dire de l'extraction des ressources à la valorisation, en tenant compte de la fabrication, de la distribution et de l'utilisation.

Les enjeux d'une économie responsable sont nombreux, souvent liés à l'un des deux autres piliers du développement durable, l'environnement et le social, voir aux deux. Voici quelques pistes identifiées :

- développer des pratiques commerciales innovantes et éthiques pour mieux répartir les bénéfices et les richesses: le commerce équitable, le microcrédit, le micro-don,
- répartir les richesses et les bénéfices de façon plus juste,
- intégrer le coût social et environnemental dans le prix des produits,
- chercher à développer le tissu économique local.

## **5.2 Intégration des exigences du développement durable en conception**

### **5.2.1 Eco-conception**

Elle désigne la volonté de concevoir des équipements ou des produits respectant les principes du Développement Durable et de l'environnement, en d'autres mots, c'est une démarche préventive et innovante qui permet de réduire les impacts négatifs sur l'environnement durant l'ensemble du cycle de vie.

L'éco-conception de produits et services n'est plus perçue comme une contrainte mais comme une opportunité de différenciation et d'innovation. De nombreuses entreprises déjà sensibilisées se heurtent à une problématique de mise en œuvre.

L'intérêt d'une intégration des exigences de protection de l'environnement dès la conception des produits n'est plus aujourd'hui à démontrer.

Dans la pratique, la volonté à intégrer ces exigences se traduit par une grande diversité de démarches d'éco-conception. En effet, les entreprises qui pratiquent l'éco-conception ont développé des démarches particulières, adaptées à chacune d'elles, cela s'explique en premier lieu parce que, touchant directement en produits, elles doivent s'inscrire dans la culture de chaque entreprise. En outre, l'éco-conception fait appel à une discipline émergente : l'évaluation de la qualité écologique des produits. Le caractère récent de cette discipline traduit par des fondements scientifiques en développement. Il en résulte une grande diversité d'outils à l'usage des concepteurs, encore appelés à évoluer tant pour améliorer leur convivialité d'utilisation que leur validité scientifique.

Dans ce contexte, les démarches d'éco-conception restent peu connues des entreprises comme l'une enquête réalisée au Royaume-Uni en 1996. Quelques grandes entreprises ont élaboré des guides méthodologiques, qui, trop souvent, restent des documents internes confidentiels. Plus complets et facilement accessibles à un large public, bien que rédigés en anglais, sont les récents guides publiés par plusieurs organismes. Illustrés par des exemples, il semble s'accorder sur les étapes clés de toute démarche d'éco-conception. Le fascicule de documentation NF FD X30-310 définit les notions essentielles pour la prise en compte de l'environnement dès la conception, formule de recommandations de portée générale et expose plusieurs méthodes d'évaluation environnementale des produits. L'agence de l'environnement, et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) a entrepris de rassembler, en 1998, des exemples d'éco-conception, avec l'objectif de présenter des démarches concrètes d'entreprises pionnières et d'encourager de nouvelles initiatives [32].

### 5.2.1.1 Démarches d'éco-conception

#### a) Identification des opportunités pour l'entreprise

Avant d'engager toute démarche d'éco-conception, il est important d'identifier les opportunités offertes à l'entreprise. Ces opportunités peuvent être évaluées à l'aide d'une liste de critères pondérés répartis en deux groupes, les critères internes à l'entreprise et les critères externes.

- **Critères internes** : le sens de responsabilité des dirigeants, l'amélioration de la qualité des produits, l'amélioration de l'image de l'entreprise et de ses produits, la réduction des coûts, le besoin d'innover, la motivation du personnel.
- **Critères externes** : satisfaire les exigences des clients, anticiper la réglementation, améliorer la compétitivité, viser un Développement Durable.

A l'image des décisions de stratégies de produits, l'entreprise peut soumettre à ces critères plusieurs produits jusqu'à réaliser le choix le plus pertinent compte tenu des opportunités et des menaces extérieures ou encore de ces forces de faiblesse interne.

**b) Engagement des dirigeants de l'entreprise**

L'engagement de toute démarche d'éco-conception exige une implication forte de la hiérarchie. En effet, elle modifie elle enrichit les pratiques habituelles d'études de marché, de veille concurrentielle, de choix de conception, de choix de fournisseurs, de communication produit, sans soutien de la hiérarchie, les exigences de protection de l'environnement risquent être perçues comme une contrainte supplémentaire à gérer dans le déroulement du projet de conception, pouvant entraîner au retard, un surcoût ou un risque commercial. A l'inverse, des orientations clairement définies en faveur de la démarche sous formes de charte ou de lignes directrices, un suivi des projets pour appuyer les décisions importantes, ou encore la sensibilisation de l'ensemble du personnel sont autant de clés du succès d'une démarche d'éco-conception. Elles dépendent d'un soutien des dirigeants au plus haut niveau.

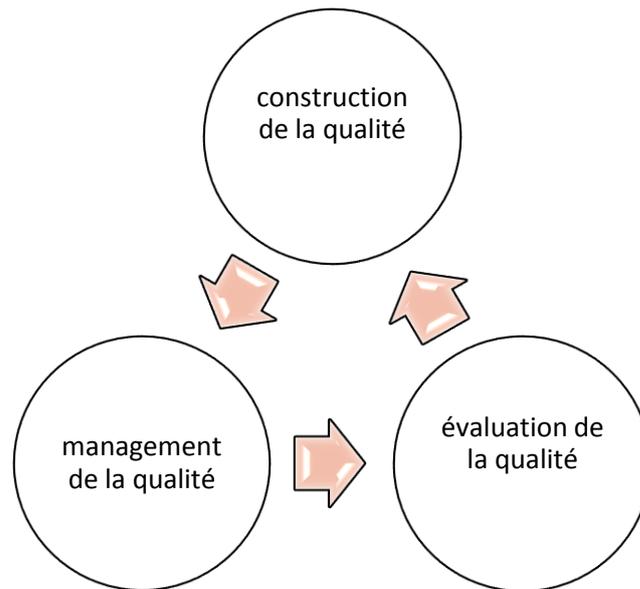
**c) Planification de la démarche**

Tout comme la mise en place d'une démarche qualité, la proportion de toute démarche d'éco-conception se fait par étapes successives, sur une durée de plusieurs mois :

- l'engagement de la hiérarchie,
- le lancement d'un projet pilote d'éco-conception, afin de définir le passage et les outils adaptés à l'entreprise,
- le perfectionnement et la généralisation de la démarche à tous les projets de conception.

Comme pour toute discipline nouvelle au sien de l'entreprise, les compétences peuvent être acquises de façon progressive jusqu'à réaliser une parfaite intégration de la démarche.

La démarche peut être considérée comme définitivement appropriée lorsque des lignes directrices d'éco-conception peuvent être validées au plus haut niveau du management et être communiquées aussi bien en interne qu'en externe pour être partie intégrante de la culture d'entreprise.



**Figure 5.1** Etapes de l'appropriation d'une démarche d'éco-conception [32].

- Construction : définir ce que l'on veut et comment le réaliser.
- Évaluation : quantifier les écarts qu'il y a entre ce que l'on a réalisé et ce que l'on voulait.
- Management : gérer, prendre les dispositions, afin que les écarts constatés soient les plus faibles possible.

La prise en compte de l'environnement dans une démarche de conception exige d'intégrer à l'équipe projet une compétence en environnement. Il est souhaitable d'associer le responsable de l'environnement à la démarche. L'idéal cependant est d'intégrer à l'équipe une personne compétente tant en environnement qu'en conception de produits.

### 5.2.2 Evolution, actions de la maintenance et environnement

La première génération de maintenance, exclusivement corrective, date d'avant la fin de la seconde guerre mondiale. Le principe est de mettre en place des opérations de réparation après l'occurrence de la défaillance. À cette époque, la maintenance était considérée comme un mal nécessaire. Il faut attendre les années 1950 pour que se développe, d'abord aux États-Unis puis au Japon, une deuxième génération de maintenance intégrant des actions de maintenance préventive systématique. Une action de maintenance préventive systématique a pour principe de mettre en place des opérations de maintenance (entretien, réparation) avant l'occurrence de la défaillance. Progressivement, les responsables d'usines sont encouragés à développer des programmes de maintenance préventive. Ces programmes, s'ils permettent de réduire les temps d'arrêt de production, ont souvent un coût élevé, car ils nécessitent le remplacement de certains éléments du système avant leur défaillance et génèrent ainsi des charges de travail et des coûts de pièces de rechange. Pour diminuer ces inconvénients, la maintenance préventive est étendue à la maintenance préventive conditionnelle.

La maintenance préventive conditionnelle repose sur l'analyse d'indicateurs en temps réel sur les équipements industriels (par exemple les vibrations, la température...). La maintenance conditionnelle a pour objectif la détection d'anomalies dans le fonctionnement des machines industrielles : la découverte de changements dans leurs caractéristiques annonce une défaillance à venir. La maintenance préventive conditionnelle permet de mieux tenir compte des conditions d'utilisation d'un équipement, mais elle nécessite la mise en place d'indicateurs de dégradation (capteurs par exemple) et la définition d'un seuil limite pour ces indicateurs considérés comme acceptable pour le fonctionnement du système.

Les actions de maintenance sont programmées dès le dépassement du seuil. Cette méthode de déclenchement des interventions de maintenance ne permet pas d'estimer la date d'occurrence de la défaillance, mais des plannings d'actions de maintenance préventive sont alors mis au point dans les entreprises et des méthodes se développent pour optimiser les plans de maintenance préventive telle que la maintenance basée sur la fiabilité (MBF).

En 1960, des ingénieurs japonais développent la maintenance productive dont l'objectif est d'améliorer la productivité de l'entreprise au meilleur coût. Ils reconnaissent en particulier l'importance de la prise en compte de la maintenance dès la phase de conception des équipements. La Total Productive Maintenance (TPM) ou maintenance totale productive apparaît à la fin des années 1960. Elle est développée par un fabricant japonais de composants électriques pour l'industrie automobile, qui décide de confier une partie des tâches de maintenance préventive aux opérateurs de production.

Au début des années 1970, de nouvelles évolutions apparaissent en maintenance avec le développement d'outils de diagnostic et de nouvelles approches de la gestion d'entreprise. En particulier, des méthodes de gestion des stocks en juste-à-temps, les méthodes d'amélioration continue issues de la philosophie de gestion de la qualité totale, et enfin l'élimination des gaspillages. Ces méthodes viennent enrichir les méthodes de gestion de la maintenance en optimisant et en rationalisant les coûts tout en restant en accord avec les objectifs de l'entreprise. Enfin, le développement de la TPM, est une combinaison de l'approche classique de Total Productive Maintenance (TPM) avec le Lean Manufacturing.

Cette méthode permet la réalisation des résultats prédéfinis (plus grande disponibilité et fiabilité des équipements, répétabilité de production) avec une exigence plus faible pour les ressources (pièces de rechange, outils, énergie).

Depuis quelques années, une nouvelle méthode de déclenchement des interventions de maintenance se développe : la maintenance prévisionnelle, qui a pour objectif de prévoir

l'instant d'occurrence de la défaillance en fonction de l'état d'usure ou de dégradation du système et de ses conditions de fonctionnement.

Le principe est de projeter l'état actuel du système pour extrapoler sur le futur, afin d'estimer le temps de fonctionnement restant avant la défaillance. Il est nécessaire de prendre en compte les connaissances passées, les conditions actuelles de fonctionnement pour prévoir l'évolution dans le temps de l'état de l'équipement. Les interventions de maintenance sont planifiées avec davantage de précision, alors la maintenance prévisionnelle permet de faire des économies. Les avantages sont les suivants [51]:

- réduction du nombre de pannes,
- fiabilisation des productions,
- amélioration de la sécurité du personnel et de l'image de l'entreprise,
- réduction des périodes d'immobilisation des équipements, d'où la réduction des coûts,
- augmentation du rendement de l'entreprise.

La mise en œuvre d'une politique de maintenance prévisionnelle repose sur le déploiement d'un processus clé visant à déterminer les états futurs du système surveillé: celui du pronostic industriel, qui désigne un processus visant à déterminer la durée de vie restante d'un système, ou la probabilité pour que le système fonctionne durant un certain temps. Le pronostic est généralement efficace pour les modes de défaillance résultant d'un processus de dégradation progressive, le plus simple étant linéaire. Une défaillance doit donc être définie en matière de paramètres ou de descripteurs surveillés. Cela suppose que la situation courante doit être surveillée en permanence.

L'introduction des actions de maintenance préventive et le développement des méthodes d'optimisation et de rationalisation de ces activités de maintenance conduisent à une fonction maintenance qui a pour objectif de limiter, ralentir ou anticiper les phénomènes d'usure, de casse et de détérioration constatés sur les machines en fonctionnement.

De plus, l'entreprise évolue dans un environnement concurrentiel difficile, les préoccupations financières sont alors très fortes. Depuis quelques années, les responsables industriels sont face à des contraintes environnementales et sociales plus dures. Une performance technique et économique n'est plus suffisante, il devient nécessaire de prendre en compte les impacts environnementaux. Le rendement de l'entreprise est indispensable, mais de nouvelles exigences s'ajoutent sur le plan social et environnemental. Les prérogatives de la fonction maintenance se sont ainsi étendues, elles ont évolué en regard de ces enjeux pour [19] :

- augmenter la disponibilité des équipements tout en réduisant les coûts directs d'exploitation;

- assurer un fonctionnement sûr des équipements, pour éviter les accidents néfastes pour l'environnement, pour les humains, pour la société;

- garantir des conditions de travail satisfaisantes dans le respect des droits de l'homme.

La maintenance représente ainsi une fonction importante de l'entreprise qui est par nature en lien avec le développement durable [8]. Sa maîtrise peut permettre de:

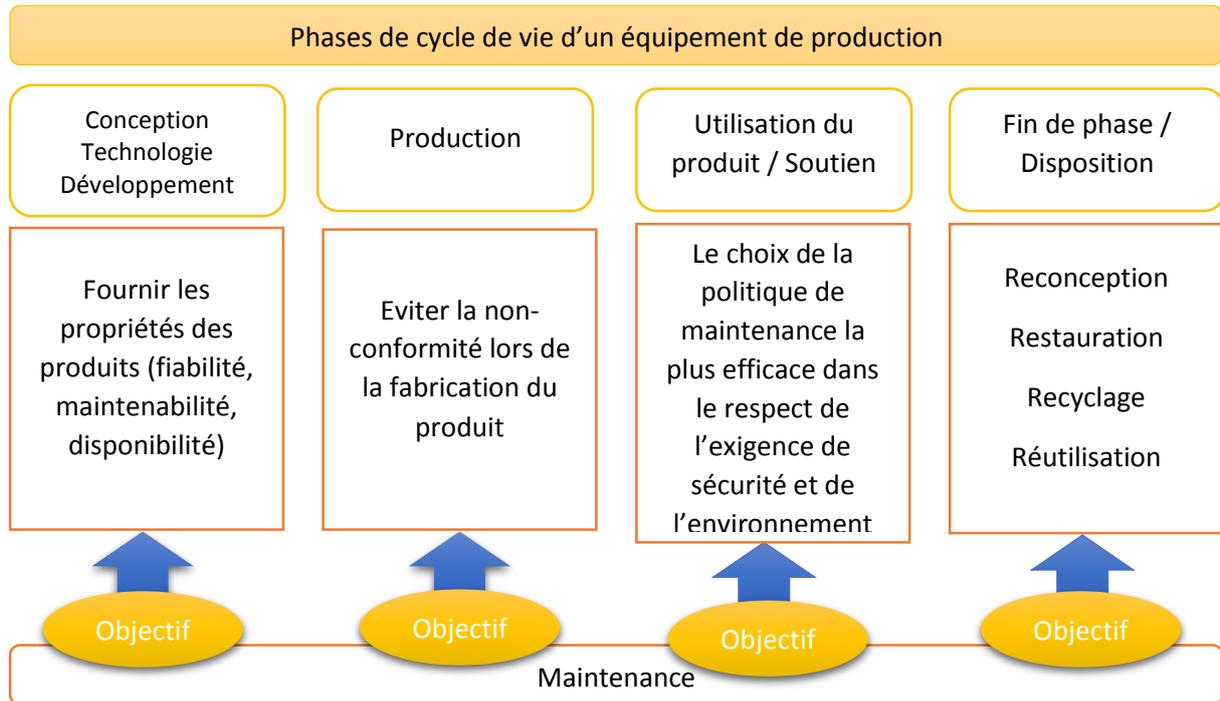
- réduire au minimum la production de déchets,
- augmenter la réutilisation ou le recyclage des déchets,
- utiliser des ressources efficacement telles que les matériaux, l'eau et l'énergie,
- optimiser voire éviter l'utilisation des fluides, d'huiles lubrifiantes et hydrauliques et autres matériaux non respectueux de l'environnement,
- adopter des techniques de fabrication allégées et autres techniques d'ingénierie durables,
- utiliser les meilleures pratiques dans le processus de production,
- former les employés sur les pratiques durables.

La maintenance peut ainsi avoir un rôle transversal qui dépasse le processus de production, voire les frontières de l'entreprise.

### 5.2.3 Intégration de la maintenance tout au long du cycle de vie d'un équipement

Une approche par l'analyse du cycle de vie (ACV) permet de mieux se rendre compte de l'importance de la fonction maintenance et de son impact transversal qui peut aller au-delà des frontières de l'entreprise.

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) traite les aspects et les impacts environnementaux potentiels (par exemple l'utilisation des ressources et les conséquences environnementales des émissions) tout au long du cycle de vie d'un produit, de l'acquisition des matières premières à sa production, son utilisation, son traitement en fin de vie, son recyclage et sa mise au rebut. L'ACV se décompose en quatre phases: définition des objectifs et du champ de l'étude, inventaire, évaluation de l'impact, et interprétation [NF EN ISO 14040].



**Figure 5.2** Objectifs de la maintenance dans les phases du cycle de vie d'un équipement [43].

La «pensée cycle de vie» vise la prise en compte de toutes les relations (environnementales, économiques et sociales) propres à un produit ou à un service, et ce tout au long de son cycle de vie. Les décisions fondées sur le cycle de vie, qui offrent une vision globale, évitent ainsi les transferts de problèmes d'une étape du cycle de vie à une autre.

Dès la conception, il est nécessaire d'étudier le contexte d'utilisation du système, car en fonction des paramètres de conception, l'impact du système peut varier. La décision de maintenance doit être effectuée au niveau de l'approche système tout en maintenant le lien avec le niveau du composant sur lequel l'action de maintenance est effectuée. En ce qui concerne le niveau de performance, le concepteur du système est incité à mieux contrôler son vieillissement, mieux anticiper ses défaillances, le rendre plus souple pour la réutilisation des pièces pour augmenter sa durée de vie et éviter les pénalités. Ce qui signifie que pour un même service offert, si la durée de vie augmente, la quantité de ressources naturelles utilisées et de déchets rejetés sont réduits. Ainsi, une intégration de la maintenance en phase de conception devrait permettre de développer un service encore plus efficace en intégrant systématiquement des exigences de Développement Durable comme le choix de matériaux «propres», et une évaluation multicritère de ces exigences. Cette intégration de la maintenance en phase de conception contribue à ce que l'on appelle l'éco-conception d'un équipement ou d'un système.

L'éco-conception intègre l'écologie dès la première étape du cycle de vie permettant de limiter les impacts néfastes qui pourraient se manifester dans les étapes suivantes de fabrication, d'exploitation et de fin de vie. Il est intéressant dès cette étape de penser à l'ergonomie et à la sécurité et d'optimiser le système pour que les techniciens de maintenance puissent intervenir de façon simple, rapide, efficace et en toute sécurité. Une conception valide prend idéalement en compte le retour d'expérience des techniciens sur les précédents systèmes (aspect social). La conception doit également prendre en considération les conséquences économiques pour assurer la pérennité de l'équipement de production.

Dans sa version normée (NF EN ISO 14040), l'ACV prend en compte les impacts sur l'environnement et sur la santé humaine.

Nous détaillons ci-dessous les apports potentiels de la maintenance à chacune des étapes d'une analyse du cycle de vie. Le tableau liste les étapes du cycle de vie et met en évidence celles pour lesquelles les experts de la maintenance responsable peuvent apporter une plus-value importante.

- **Matières premières** : cette étape est focalisée sur le choix judicieux des matériaux utilisés, leurs formes, évaluer leurs impacts sur l'environnement et la santé, vérifier si ces matériaux sont réutilisables ou recyclables et si ce n'est pas le cas, les remplacer par des matériaux qui le sont. Il est également possible d'envisager l'utilisation de matières premières recyclées (Tableau5.1).

- **Fabrication** : lors de cette étape, le respect du cahier des charges et la garantie d'une qualité de fabrication conditionnent l'usage. L'impact environnemental et les coûts sont également modifiés par une mauvaise fabrication qui conduira à des défaillances et des pertes de performance [32].

Étapes du cycle de vie	Apports de la maintenance
Matières premières	Réduire le contenu matériel pour permettre de minimiser la quantité de pièces de rechange en stock.
	Réduire le nombre de matériaux différents pour permettre de simplifier les interventions de maintenance (limitation du besoin de compétences spécifiques pour les acteurs de maintenance).
	Éliminer les matériaux toxiques pour permettre de préserver la sécurité lors des interventions de maintenance.
	Utiliser des matériaux recyclés et recyclables pour permettre de limiter les coûts des pièces de rechange et de revaloriser les pièces à l'issue d'une intervention de maintenance préventive.
	Utiliser des matériaux biodégradables pour faciliter la gestion des déchets notamment pour les pièces d'usure.

**Tableau 5.1** Liens entre les étapes d'une ACV et la maintenance[32].

### 5.3 Durabilité des équipements

La durabilité est la durée de vie ou la durée de fonctionnement potentielle d'un bien pour la fonction qui lui a été assignée dans des conditions d'utilisation et de maintenance données. Les opérations maintenance qui concernent la durabilité d'un bien sont les suivants [51] :

- la rénovation : inspection complète de tous les organes, requise dimensionnelle complète ou remplacement des pièces déformées, vérification des caractéristiques.
- la reconstitution : remise en l'état défini par le cahier des charges initial, qui impose le remplacement des pièces vitales par des pièces d'origine ou des pièces neuves équivalentes. La reconstruction peut être assortie d'une modernisation ou modifications.

Les modifications apportées peuvent concerner, en plus de la maintenance et de la durabilité, la capacité de production, l'efficacité, la sécurité...etc.

- la modernisation : remplacement d'équipements, accessoires et appareils ou éventuellement de logiciel apportant, grâce à des perfectionnements techniques n'existant pas sur le bien d'origine, une amélioration de l'aptitude à l'emploi du bien. Cette opération peut aussi bien être exécuter dans le cas d'une rénovation, que celui d'une reconstruction.

La rénovation ou la reconstruction d'un bien durable peut donner lieu, pour certains de ses sous-ensembles, à la pratique d'un échange standard.

- Echange standard : c'est la reprise d'une pièce, d'un organe ou d'un sous-ensemble usagé, et vente au même client d'une pièce d'un organe ou d'un sous-ensemble neuf ou remis en état conformément

aux spécifications du constructeur, moyennant le paiement d'une soulte dont le montant est déterminé d'après le cout de remis en état.

- Soulte : somme d'argent qui, dans un échange ou partage compense l'inégalité de la valeur des lots ou des biens échangés. Afin d'accélérer les procédures et de diminuer les couts, le recouvrement de la soulte peut être forfaitaire [47].

### 5.3.1 Matériaux innovants pour la conception

Ces matériaux innovants sont dits composites, ils consistent en une combinaison de deux matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément, et dans un sens plus précis, un matériau composite utilisé dans la réparation des structures est par définition, toute matière première comportant au moins deux composants: le renfort et la matrice. La matrice est généralement une matière plastique, les fibres utilisées sont essentiellement des fibres de verre ou de carbone [52].

Les matériaux composites sont considéré innovants car grâce à leurs caractéristiques mécaniques et physico-chimiques ils présentent de nombreux avantages par rapport aux matériaux traditionnelles : résistance mécanique : pour une même section d'acier, la résistance des fibres de composites est plus élevée; maniabilité : les bandes des matériaux composites présentent une large flexibilité qui facilite la mise en œuvre et son application dans les zones confinées; facilité de préparation de surfaces; la non nécessité d'une fixation mécanique; la durabilité du système de renfort : la bonne tenue des matériaux composites à la corrosion; tenue au feu; La dégradation due au feu des matériaux composites; le système de renforcement de matériaux composites n'exige pas un entretien; réduction du temps d'exécution et mise en œuvre; poids : la densité des matériaux composites représente 20% de celle des aciers ; pour une même résistance ultime le poids du matériau composite est inférieur de 10% au poids de l'acier.

L'utilité des matériaux innovants demeure lors de son fabrication, où nous pouvons facilement contrôler son durabilité, fiabilité et le taux de recyclage.

### 5.3.2 Maintenance verte

L'industrie n'était pas très hautement mécanisée, puisque la plupart des équipements étaient simples. Les conséquences d'échec étaient non indispensables et avaient un effet négligeable. C'était le temps en prévenant l'équipement de l'échec n'était pas une haute priorité.

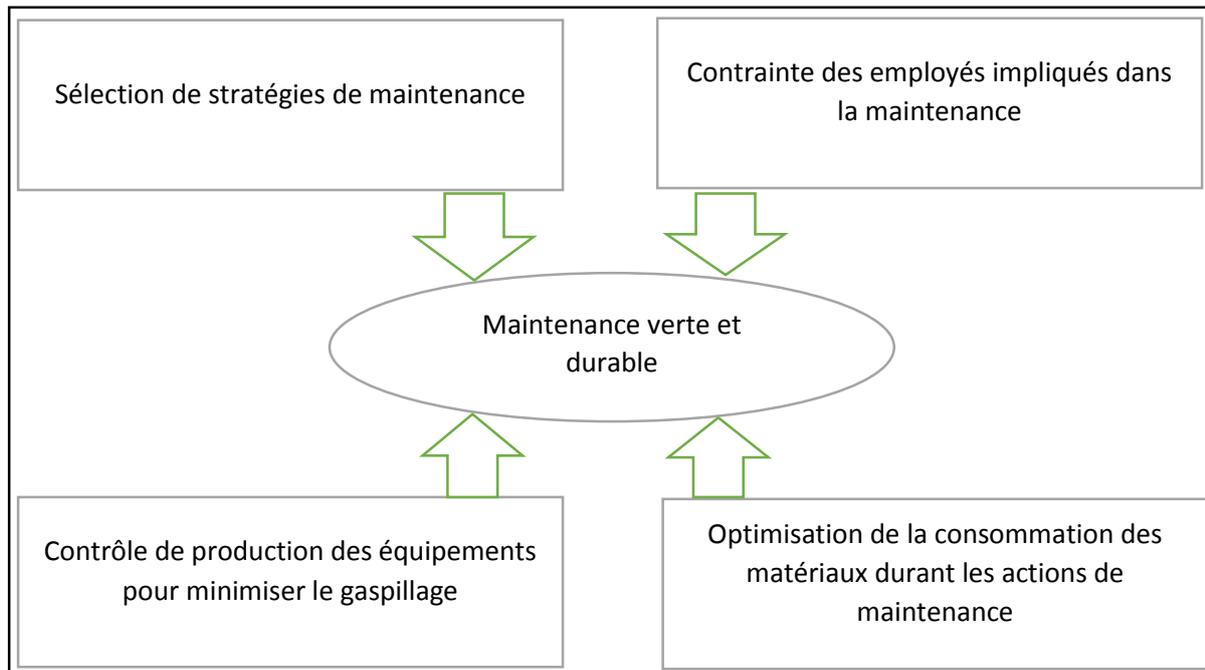
La génération suivante d'entretien était lancée avec le processus d'industrialisation. Les usines sont devenues complexes. La disponibilité, la longévité et le prix étaient facteurs importants considérés pour l'accomplissement objectifs d'affaires.

À partir du début des années 1970, des nouvelles options pour la réalisation d'entretien ont apparu avec le développement d'outils diagnostiques et nouvelles approches à la direction d'entreprise.

Dans le système d'entretien, le gaspillage se compose d'habitude des procédures démodées, surpeuplées. Tous les principes, les méthodes et les technologies qui peuvent réduire le gaspillage au-dessus de l'énuméré et ajoutent une valeur au processus d'entretien « Maigre Entretien ».

La caractéristique de réflexion maigre est fréquente l'entretien pour améliorer l'efficacité et réduire le gaspillage, est l'utilisation de tel outils comme : kaizen (amélioration continue), Qualité, augmentation de la MTTF et la MUT, réduction de temps d'organisation entretien préventif et la diminution de la MTI.

Un système de production se compose des différents types d'équipement et tous ces équipements doivent être disponibles et fiable au plus haut niveau possible pour garantir la stabilité d'un processus. Le département d'entretien est responsable de garder l'équipement dans la condition qu'il a été procuré initialement, aussi pour garantir qu'il peut livrer des productions selon la spécification. C'est un rôle important dans un système de production et si cela est exécuté avec succès, il peut faciliter le voyage vers la formation durable par le biais de la haute utilisation d'actifs, en fournissant ainsi à la rentabilité totale [44].



**Figure 5.2** Facteurs d'implantation de la maintenance verte et durable [43].

### 5.3.3 Industrie et maintenance du futur

L'industrie du futur englobe l'objectif de rattraper les retards sur l'automatisation et la robotisation de l'industrie et de développer des outils d'analyse des données.

Selon les principaux acteurs du secteur de l'industrie, toutes les entreprises industrielles sont concernées par l'industrie du futur, il s'agit d'une question de suivie qui sera le rôle de l'homme à prédire les défauts dans les équipements d'une manière précise.

La maintenance du futur, quant à elle, s'inscrit dans l'industrie du demain. On parle de l'entreprise connectée et de la maintenance 4.0, en s'appuyant sur la e-maintenance et l'utilisation de la Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur (GMAO)

## 5.4 Recyclage et réutilisation

Toutes les machines de production et outillages industriels hors service sont considérés comme des déchets d'équipements professionnels (DE. pro). Ces déchets relèvent d'une réglementation spécifique. Afin d'être correctement dépollués avant d'être recyclés, ils ne doivent pas être jetés avec les déchets banals ou dans les bennes à ferraille [53].

Hot de là, le recyclage des équipements s'intègre dans son cycle de vie, ce qui nous mène à penser de cette étape importante et négligeable dès la sélection des matières premières qui vont constituer l'équipement pour une meilleure préservation de l'environnement.

### 5.4.1 Dépollution et recyclage des machines et outillages industriels

Les équipements usagés sont des déchets dangereux. Ils peuvent contenir des substances polluantes pour l'environnement : gaz fluorés, mercure, plomb et autres polluants organiques persistants qui doivent être soigneusement extraits des appareils et neutralisés au moment du recyclage [54]. Des études ont distinguées qu'on peut recycler jusqu'à 69% du poids des équipements usagés, permettant d'économiser les ressources naturelles et d'éviter les nuisances environnementales qu'engendrent leur extraction et leur transformations, tout en utilisant dès l'étape de conception des matériaux recyclables et innovantes.

### Conclusion

Dans ce cinquième et dernier chapitre, nous avons rappelé les principes, les piliers et les exigences du Développement Durable.

Aujourd'hui, les grandes industries luttent contre le gaspillage et la pollution. L'intégration du principe de Développement Durable en entreprise, en particulier dans la fonction maintenance, devient une voie intéressante à explorer. Des solutions respectueuses de l'environnement doivent être trouvées en utilisant de meilleurs matériaux innovants, des composants et pièces de qualité et en optimisant la conception afin d'adapter l'équipement à son environnement et assurer sa durabilité.

Il ne faudrait pas que l'industrie mette une nouvelle fois la maintenance de côté au profit de la seule production. Les deux services doivent travailler ensemble, main dans la main, en intégrant par exemple la TPM (autre facteur du Développement Durable) pour pouvoir espérer relever les défis de demain.

Ainsi, la maintenance se place parmi les outils qui s'inscrivent dans une démarche du Développement Durable.

# **Conclusion générale**

En guise de conclusion générale, nous pouvons réaffirmer que l'intégration de la maintenance dans les projets de conception devient de plus en plus une nécessité pour les fabricants afin d'assurer une exploitation sûre des composants avec des coûts optimaux d'indisponibilité et de réparations et de préserver la santé des travailleurs. Cette démarche cherche à anticiper la dégradation et l'évolution de la défaillance de l'équipement dans sa globalité et durant son cycle de vie.

Dans le processus de conception, la maintenance est une fonction de grande importance. Elle a pour but d'augmenter la disponibilité d'équipement et d'étendre le cycle de vie de l'équipement, pour augmenter la production en minimisant les coûts de cycle de vie.

Intégrer la maintenance en phase de conception ne veut pas dire éliminer les interventions de la maintenance ou bien fabriquer des équipements parfaits, mais l'objectif est d'évoluer. Prendre en compte la maintenance dans la phase de conception d'un équipement maximise la fiabilité de cet équipement et optimise aussi les coûts de maintenance sur le long terme. La tendance actuelle est de faire plus avec de moins de moyens car les budgets alloués à la maintenance sont en régression d'une année à l'autre, ce qui est contradictoire avec les objectifs de sécurité globale, d'où l'importance d'intégration de ce paramètre en phase de conception.

Comme perspectives de ce travail, nous pouvons envisager d'autres paramètres dans le processus de conception tels que le levier socioculturel et environnemental dans une logique d'amélioration continue et de développement durable.

Un équipement problématique existant dans l'industrie algérienne pourrait être pris comme un cas concret d'étude dans le futur par les Etudiants en fin de cycle de leur formation.

## Bibliographie / Webographie

- [1] BAILLRGUET Gérard « Analyse fonctionnelle cours », Université d'ORLEANS, département génie mécanique et productique.
- [2] BLAISE Jean-christophe « Apport d'une modélisation de l'information normative à l'intégration des règles de sécurité des machines en conception » CNRS ESA 7039 le 10/11/2000
- [3] BATIONO Frédéric, “ Prise en compte du réseau sociotechnique de maintenance dans la conception d'équipements Cas des petites unités de transformation agroalimentaire des Pays d'Afrique de l'Ouest ”, Thèse soutenue à l'institut national polytechnique de Grenoble, 07 Mars, 2007
- [4] BOUIT B., LYONNET P. (1998), ‘Contraintes de maintenance dans Conception de produits mécaniques, méthodes, modèles, méthodes et outils’, Paris : Hermes.
- [5] BENZAADA. M, FELIACHI. D, « la maintenance industrielle », collection le cours de mécanique, office des publications universitaires, 1. Place centrale de Ben-Aknoun (Alger). 2002
- [6] CAZEAU, G et all «Approche méthodologique pour la conception des situations de travail» INRS 2000.
- [7] FRANCASTEL. J. C, « Ingénierie de maintenance » édition ‘’Usine nouvelle’’, Dunod, Paris, 2004
- [8] GAUTIER Rémy « qualité en conception de produits nouveaux » – ENSAM – Labo CPN – Màj 08/07/2004
- [9] GAUTIER Rémy « qualité en conception de produits nouveaux » ‘proposition d'une méthode de fiabilisation du processus de management de l'information’. Sciences de l'ingénieur [physics]. Eco le nationale supérieur d'art et métiers-ENSAM, 1995. Francis.
- [10] GERO et al. (2000), “Computational Models of Innovative and Creative Design Process”, Technological Forecasting and Social Change 64, 183-196, Elsevier Science Inc. All rights reserved
- [11] HOWIRE. Reliability Hot Wire - The Magazine for the Reliability Professional, Issue 26, (2003, April).
- [12] JEAN. M, CHATELET. E, « méthodes productiques et qualité », édition marketing, 1996 Lille.
- [13] KHALFAOUI, Sarhane, GUILHEM Edwing, “Une méthode pour obtenir des scenarios critiques dans les systèmes mécatroniques”, European conference, 2002

- [14] KROO I. (2004), Distributed multidisciplinary design and Collaborative optimization, VKI lecture series on Optimization Methods & Tools for Multicriteria/Multidisciplinary Design, November 15-19.
- [15] LAB, Kulkarni Bhupesh Kumar, “integrated reliability optimal maintenance schedule design: a life cycle cost based approach”, int. J. Product lifecycle management, Vol. 3, no. 1, 2008.
- [16] LABEAU P.E., ZIO E., “ Procedures of Monte Carlo transport simulation for applications in system engineering ”, Reliability Engineering and System Safety,77,2002
- [17] LAPRIE, J.C, “Dependability, Basic concepts and Terminology”, Dependable computing and Fault-Tolerant Systems, VOL.5, 1992.
- [18] LUSSENT Lue « contribution de la conduite d'étude de la faisabilité de systèmes de fabrication », thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy01, 20/10/1997.
- [19] LY Fatime, Simeu-Abazi, Leger Jean-Baptiste « Terminologie Maintenance » 2010.
- [20] Monchy, F « Maintenance, méthodes et organisations » édition “Usine nouvelle”, Dunod, Paris, 2004.
- [21]MONCHY, F, “ Maintenance, Méthodes et Organisation ”. édition « usine nouvelle », Dunod, Paris. 2000.
- [22] MIHALACHE Alain Gabriel, “ Modélisation et évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques : Application sur systèmes embarqués ”, Thèse de doctorat, soutenue à l'école doctorales d'Anger, France, 2007.
- [23] MENY Jean-Baptiste, “ Validation de la maintenabilité et de la disponibilité en conception d'un système multi-composants ”, thèse soutenue à l'université de Laval, Québec, 2009.
- [24] MULDER wienik et all “Towards structured integration of maintenance knowledge in indurtial equipment design” conference international de l'ingénierie, ICED13; le 22/08/2013; université de sungkyunkwan; Seoul; Korea.
- [25] MAMI. E. F, « Cours de l'analyse fonctionnelle »
- [26] NATKIN, S « Introduction à la sureté de fonctionnement des ordinateurs », 2002.
- [27] NZIE W., Evenga Mang E. D., Samon J. B. (2014), Integrating reliability in conceptual process design: an optimization approach, International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET), Volume 5, Issue 7, July, pp. 83-93.
- [28] NZIE ,W, et BIENVENU kenmeugne « Méta-modèle d'intégration de la maintenance en conception », European Scientific Journal · September 2014.

- [29] NABDI Souad, HARROU Brahim, “ Analyse de la fiabilité d’un système, application à une éolienne ”, 2ème édition du Congrès international du génie industriel et du management des systèmes, Est de Fès, du 21 au 23 Mai, 2015.
- [30] NABDI Souad, HERROU Brahim « intégration de la maintenance en conception ». X<sup>ème</sup> conférence internationale : conception et production intégrées, déc 2015, Tanger, Maroc, hal-01260819.
- [31] OLAF de Hummer « Optimiser les coûts et satisfaire le besoins », international business manager chez lowendal masaipur chasing – Paris. 2009.
- [32] PUYOU Jean-Batiste, techniques de l’ingénieur «conception industrielle» G 6 050-1
- [33] PARK Sunhwa, Xu Sheng, ROGERS William, PASMANN Hans, EL-HALWAGI Mahmoud. M “Incorporating inherent safety during the conceptual process design stage: à literature review”, Journal of loss prevention in the process industries 63 (2020) 104040.
- [34] STUCHLY Vladimir, M. Jasiulewicz-Kaczmarek “Maintenance in sustainable manufacturing” .Logforum, 2014.
- [35] RAUSAND, M et Hoyland, A « system reliability theory-models, statistical methods, and application (vol 2), 2004.
- [36] TAKATA. S., Hiraoka H., Asama H., Yamaoka N., Saito D. (1995), Facility Model for Life-Cycle Maintenance System, Annals of the CIRP vol.44/1/1995, pp.117-121.
- [37] TOLLENAERE, M., 1998, Conception de produits mécaniques. Méthodes, modèles et outils. Editions Hermes, ISBN 2-86601-694-7, Paris.
- [38] TABEU Simon Alexandre et all, « insertion of sustainability and concepts in the maintenance strategies to achieve sustainable manufacturing », independent journal of management and production (IJM&P), Decembre 2019.
- [39] VILLEMAUR, Alain, “Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels: fiabilité, facteurs humains, information”, Eyrolles, 1988.
- [40] VALETTE Robert, Luis Allan Kunzle, “ Réseaux de Pétri pour la détection et le diagnostic ”, Journées Nationales : Sûreté, Surveillance, Supervision, G.R. Automatique, Paris, 17-18 Novembre 1994.
- [41] ZIAD Imam « l’intégration des activités de maintenance dans la conception des systèmes d’automatisation » doc.univ-lille1.fr 2015.

[42] ZWINGMANN, Xavier, “ Modèle d'évaluation de la fiabilité et de la maintenabilité au stade de la conception ”, Thèse soutenue à l'université Louis-Pasteur en collaboration avec l'université de Laval au Québec, France, 2005.

[43] ZWIINGELESTIEN,G, « diagnostic des défaillances – théorie et pratique pour les systèmes industriel », HERMES, 1995.

## Webographie

- [43] <http://stokage.univ-valeciennes.fr/EcoPEM/Boitek/co/Introduction.html>. Consulté le 08/03/2020
- [44] <https://.search.yahoo.com/yhs/search>; consulté. Consulté le 22/02/2020
- [45] <https://www.technologuepro.com/cours-maintenance-indisrielle/La-maintenance-industrielle.htm>. Consulté le 09/03/2020
- [46] <http://www.mobility-work.com/fr/blog/maintenance-préventive>. Consulté le 12/03/2020
- [47] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Maintenance>. Consulté le 10/03/2020
- [48] <http://dictionnaire.sensagent.leparisien.fr/maintenance>. Consulté le 10/03/2020
- [49] <https://www.standard-industie.com/maintenance-industrielle>. Consulté le 08/03/2020
- [50] [www.siemens.com/automation/maintenance](http://www.siemens.com/automation/maintenance); Avril 2010. Consulté le 25/03/2020
- [51] <https://www.cours-gratuit.com/cours-divers/cours-sur-les-difinitions-methodes-et-opérations-de-la-maintenance>. Consulté le 29/03/2020
- [52] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Conception\\_de\\_produi](https://fr.wikipedia.org/wiki/Conception_de_produi). Consulté le 14/06/2020
- [53] <https://www.google.com/search?q=les+9+principes+de+pr%C3%A9vention&oq=Les+9+principe+s+de+pr%C3%A9vention&aqs=chrome.0.018.1294j0j4&sourceid=chrome&ie=UTF-8>. Consulté le 15/06/2020
- [54] [https://www.researchgate.net/publication/332861935\\_Les\\_enjeux\\_du\\_developpement\\_durabecon](https://www.researchgate.net/publication/332861935_Les_enjeux_du_developpement_durabecon) sulté le 23/08/2020
- [55] [https://www.actuenvironnement.com/ae/dossiers/dd/dd\\_27principe.php4#:~:text=Chapitre%2013%20%3A%20Les%2027%20principes%20de%20la%20d%C3%A9claration%20de%20Rio&text=Principe%201%20%3A,en%20harmonie%20avec%20la%20nature](https://www.actuenvironnement.com/ae/dossiers/dd/dd_27principe.php4#:~:text=Chapitre%2013%20%3A%20Les%2027%20principes%20de%20la%20d%C3%A9claration%20de%20Rio&text=Principe%201%20%3A,en%20harmonie%20avec%20la%20nature). Consulté le 23/08/2020
- [56] <https://www.ecosystem.eco/fr/fiche-famille/machines-production-outillage-industriel>. Consulté le 24/08/2020
- [57] <https://www.google.com/search?q=arbre+de+d%C3%A9faillance+pdf&oq=arbre+de+d%C3%A9fa&aqs=chrome.1.012j69i57j015.48422j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8>. Consulté le 01/09/2020.
- [58] [http://www.3-0.fr/doc-dd/qu-est-ce-que-le-dd/tour-d-horizon-des-enjeux-des-3-piliers-du-developpement-durable#Préserver l'environnement](http://www.3-0.fr/doc-dd/qu-est-ce-que-le-dd/tour-d-horizon-des-enjeux-des-3-piliers-du-developpement-durable#Préserver_l'environnement)
- [59] <https://www.google.com/search?q=s%C3%A9cirit%C3%A9+en+conception&oq=s%C3%A9cirit%C3%A9+en+conception&aqs=chrome..69i57j017.7893j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8>