

**UNIVERSITE M'HAMED BOUGUERRA BOUMERDES**

**Faculté De Technologie  
Département De Génie Mécanique**

**Polycopié de cours**

**DIAGNOSTIC ET SURVEILLANCE**

Elaboré par

**Dr.K.IRINISLIMANE**

septembre 2021

## **Avant-propos**

Ce polycopié de cours intitulé «Diagnostic et surveillance », s'adresse aux étudiants de Master I électromécanique et à d'autres spécialités éventuellement.

Ce cours est élaboré dans le but de faciliter à l'étudiant l'assimilation et la compréhension des cours dispensés.

Il est rédigé d'une manière simple, et donne l'essentiel dont l'étudiant a besoin avec quelques exemples d'illustration nécessaires à la compréhension.

Ce cours a pour objectifs de transmettre à l'étudiant les concepts de base de diagnostiquer les défauts, de surveiller les installations et les systèmes électromécaniques.

Le cours s'articule sur les axes suivants :

- Analyse des modes de défaillances.
- Techniques de surveillances.
- Surveillance de l'état de fonctionnement d'une machine.
- Outils d'analyse du système.
- Diagnostic des systèmes.
- Démarche globale de localisation d'une défaillance.

# SOMMAIRE

|                                   |          |
|-----------------------------------|----------|
| <b>INTRODUCTION GENERALE.....</b> | <b>1</b> |
|-----------------------------------|----------|

## **PARTIE I : SURVEILLANCE**

### **CHAPITRE I : ANALYSE DES MODES DE DEFAILLANCES**

|   |   |
|---|---|
| I.1 Analyse fonctionnelle.....                  | 2 |
| I.1.1 But de l'analyse fonctionnelle.....       | 2 |
| I.1.2 Principes de l'analyse fonctionnelle..... | 5 |
| I.2 Analyse quantitative des défaillances ..... | 8 |
| I.3 Analyse qualitative des défaillances.....   | 9 |
| I.3.1 Diagnostic et expertise .....             | 9 |
| I.3.2 Conduite d'un diagnostic.....             | 9 |

### **CHAPITRE II : TECHNIQUES DE SURVEILLANCES**

|  |    |
|--|----|
| II.1 La surveillance.....                                    | 11 |
| II.2 Etapes en processus de surveillance.....                | 12 |
| II.3 Types de surveillance.....                              | 13 |
| II.3.1 Surveillance on-line ou suivi continu.....            | 13 |
| II.3.2 Surveillance off-line ou suivi périodique .....       | 14 |
| II.4 Techniques de surveillance des machines tournantes..... | 15 |
| II.4.1 La thermographie infrarouge.....                      | 15 |
| II.4.2 L'analyse des huiles.....                             | 16 |
| II.4.3 L'analyse vibratoire.....                             | 16 |
| II.4.4 L'analyse acoustique ou par Ultrasons.....            | 17 |
| II.5 Choix d'outils de surveillance.....                     | 17 |
| II.6 Terminologies utilisées en surveillance.....            | 19 |
| II.7 Surveillance vibratoire.....                            | 19 |
| II.7.1 L'Analyse vibratoire.....                             | 20 |
| II.7.2 Définition d'une vibration .....                      | 20 |
| II.7.3 Caractéristiques d'une vibration.....                 | 21 |
| II.7.4 Vibrations des machines tournantes .....              | 22 |
| II.7.5 Les capteurs de vibration.....                        | 23 |
| II.7.6 Modes de fixation .....                               | 27 |

## **CHAPITRE III : SURVEILLANCE DE L'ETAT DE FONCTIONNEMENT D'UNE MACHINE**

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| III.1 Les défauts des machines ..... | 28 |
| III.1.1 Défaut de balourd.....       | 28 |
| III.1.2 Défaut d'alignement.....     | 30 |
| III.1.3 Défauts de serrage.....      | 31 |
| III.1.4 Défaut des engrenages .....  | 32 |
| III.1.5 Défauts des roulements ..... | 35 |

## **PARTIE II : DIAGNOSTIC**

### **CHAPITRE I : GENERALITES**

|   |    |
|---|----|
| I.1 Les défaillances .....                  | 39 |
| I.2 Les types de défaillances.....          | 40 |
| I.3 Causes de défaillance du système.....   | 43 |
| I.3.1 Causes externes .....                 | 44 |
| I.3.2 Causes internes.....                  | 44 |
| I.4 Modes de défaillances.....              | 45 |
| I.4.1- Modes génériques de défaillance..... | 45 |

### **CHAPITRE II : OUTILS D'ANALYSE DU SYSTEME**

|  |    |
|--|----|
| II.1 Analyse fonctionnelle interne ..... | 48 |
| II.2 La méthode FAST .....               | 49 |
| II.2.1 Principe.....                     | 49 |
| II.2.2 Schématisation.....               | 49 |
| II.3 La méthode SADT.....                | 52 |
| II.3.1 Définition.....                   | 52 |

### **CHAPITRE III : DEMARCHE GLOBALE DE LOCALISATION D'UNE DEFAILLANCE**

|   |    |
|---|----|
| III.1 Les questions préalables à l'AMDEC.....               | 56 |
| III.1.1 Que peut apporter l'AMDEC à une organisation ?..... | 57 |
| III.1.2 Ce que l'AMDEC ne peut pas apporter .....           | 57 |
| III.1.3 Qui est concerné par l'AMDEC ? .....                | 57 |
| III.1.4 Qui n'a jamais fait d'AMDEC ?.....                  | 58 |
| III.2 L'historique de l'AMDEC .....                         | 59 |
| III.3 Les définitions de base AMDEC .....                   | 60 |

|         |  |           |
|---------|--|-----------|
| III.3.1 | Les mesures de secours .....                                     | 61        |
| III.3.2 | Les mesures préventives.....                                     | 62        |
| III.4   | La détermination des priorités .....                             | 63        |
| III.5   | Types d'AMDEC et définitions.....                                | 65        |
| III.5.1 | Les Types .....  | 65        |
| III.5.2 | Les aspects de la méthode .....                                  | 65        |
| III.6   | Les étapes de la méthode .....                                   | 66        |
| III.6.1 | La constitution d'un groupe de travail .....                     | 66        |
| III.6.2 | L'analyse fonctionnelle .....                                    | 68        |
| III.6.3 | L'étude qualitative des défaillances .....                       | 72        |
| III.6.4 | L'étude quantitative.....  | 72        |
| III.6.5 | L'hiérarchisation.....   | 73        |
| III.6.6 | La recherche des actions préventives/correctives.....            | 75        |
| III.6.7 | Le suivi des actions prises et la réévaluation de criticité..... | 75        |
| III.6.8 | La présentation des résultats.....                               | 76        |
| III.7   | AMDEC et les autres outils de la qualité totale.....             | 76        |
| III.7.1 | L'AMDEC et l'Arbre des causes (FTA).....                         | 76        |
| III.7.2 | L'AMDEC et le déploiement de la fonction qualité .....           | 77        |
| III.7.3 | L'AMDEC et le Contrôle statistique des procédés (CSP).....       | 77        |
| III.7.4 | L'AMDEC et le Système anti-erreur (Poka-Yoké).....               | 79        |
| III.7.5 | L'AMDEC et l'ingénierie simultanée.....                          | 79        |
| III.7.6 | L'AMDEC et les normes ISO 9000.....                              | 81        |
|         | <b>CONCLUSION GENERALE</b> .....                                 | <b>82</b> |

Questionnaire relatif aux causes des accidents de travail dans une entreprise

Références bibliographiques

## INTRODUCTION GENERALE

Dans le monde de l'industrie, nous sommes aujourd'hui de plus en plus confrontés à la sûreté de fonctionnement des dispositifs de production, causés par des multiples défaillances de type mécaniques et électriques. Cette demande en termes de sûreté est motivée par les impératifs de production et se retrouve actuellement au niveau des cahiers des charges, imposés par les industriels et assureurs à leurs fournisseurs. Ce n'est plus seulement le produit qui est vendu mais l'assurance d'un taux de disponibilité garanti.

L'apparition d'un défaut conduit le plus souvent à un arrêt irrémédiable de la machine, en conséquence, un coût de réparation non négligeable pour l'entreprise et aussi à une perte de la production. Dans le domaine industriel, il est indispensable d'assurer la sécurité des personnes et des matériels car aucun système, qu'il soit simple ou complexe, n'est à l'abri d'un dysfonctionnement. Le développement d'outils ou de capteurs de surveillance et de détection de pannes paraît une solution un peu plus coûteuse à l'investissement, mais elle s'amortit sur le long terme.

Les signaux mesurables tels que les courants, les tensions, la vitesse, les vibrations ou bien encore la température peuvent fournir des informations significatives sur les défauts et ainsi servir à déterminer un ensemble de paramètres représentant les signatures de défauts du moteur.

A partir de ces paramètres, la mise en place de méthodes décisionnelles peut permettre de concevoir des systèmes de surveillance. Les performances de cette approche de supervision sont étroitement liées à la pertinence des signatures de défauts déterminées et à la finesse d'analyse des mesures.

La surveillance de l'état de fonctionnement et le diagnostic de défauts est devenu un axe fondamental dans la recherche et le développement de solutions en milieu industriel. La fonction principale de la surveillance de l'état est de fournir des connaissances sur le fonctionnement réel de la machine à chaque moment et sans, pour des raisons plutôt économiques, arrêter la ligne de production.

## I.1- Analyse fonctionnelle

L'analyse descriptive d'un équipement consiste à répertorier, souvent à partir d'un schéma qui doit être connu à l'avance, ses différents organes en précisant leurs rôles respectifs afin d'en déduire le principe de fonctionnement et ses conditions d'utilisation. Mais cette méthode figée, rencontre rapidement ses limites, car si elle est suffisante pour les appareils standards et bien connus, elle permet difficilement de faire face à l'évolution des technologies et à l'apparition de nouveaux équipements, de plus en plus caractérisés par :

- Des cycles de vie très courts
- Une forte évolutivité fonctionnelle
- Une faible pérennité des solutions technique

Cette approche structurelle et matérielle n'a donc pas de valeur formative pérenne [1].

### I.1.1- But de l'analyse fonctionnelle

Au contraire de ce processus purement cognitif, l'analyse fonctionnelle fournit une méthode à la fois technique et pédagogique qui s'inscrit dans une démarche rationnelle de construction des savoirs et des savoirs faire, et apporte des repères suffisants pour permettre d'analyser, choisir et utiliser un équipement, quelque soit les évolutions technologiques prévisibles.

Elle permet plus facilement, d'autre part, de dégager et d'atteindre les objectifs opératoires nécessaires à la formation technique et professionnelle. Convenablement adaptée, c'est une approche pédagogique qui vise à la cohérence et à l'efficacité.

Dans l'analyse fonctionnelle d'un équipement, l'objet technique remplit une fonction déterminée qui répond au besoin d'un utilisateur lui-même conditionné par différents facteurs (techniques, économiques, réglementaires, sociologiques...). La fonction ainsi déterminée est décomposée en sous - fonctions de plus en plus simples auxquelles on apportera des solutions techniques. Ces fonctions sont définies en termes de finalités sans aucun a priori de solutions. La diversité des solutions techniques possible déterminera l'ampleur du choix d'appareils ayant la même fonction globale [1].

Pédagogiquement, l'approche fonctionnelle vise à comment garantir une culture minimale des solutions techniques sans réaliser une approche exhaustive des équipements.

L'analyse fonctionnelle, en tant que raisonnement systématique des besoins, est utilisée depuis longtemps, notamment en architecture (Viollet le Duc, Walter Gropius et l'école du Bauhaus, Le Corbusier, le « fonctionnalisme »).

Elle va s'épanouir dans le courant de pensée de l'analyse « systémique » des années 70, pour objectifs de :

- Modéliser des systèmes complexes dont il faut repenser l'organisation,
- Mieux appréhender les systèmes à fin d'amélioration et d'optimisation, de mise en œuvre de méthode « qualité ».

Pluridisciplinaire, elle est à la base de nombreuses méthodes utilisées en sciences de l'ingénierie, génie industriel, gestion de projet, administration des entreprises, aide à la décision, mais aussi en automatismes, informatique, programmation, conception de logiciel ...etc, mais aussi en sciences humaines, sociologie, pédagogie, communication, économie, urbanisme, écologie, biologie, physiologie...

Elle est indispensable à la maîtrise des risques en tant qu'étape fondamentale de l'analyse des modes de défaillance (prévention des risques techniques) et de l'analyse de la valeur (prévention des risques financiers). Elle fonde ainsi, par exemple, l'analyse de la valeur, l'analyse du risque, l'AMDEC HACCP, la Méthode APTE d'analyse fonctionnelle et analyse de la valeur ...etc.

L'approche par fonction, dans la conception des systèmes, met en œuvre un raisonnement inductif (causes / conséquences) qui impose, avant tout diagnostic ou recherche de solution, de définir des finalités. Elle permet ainsi de :

- S'assurer de répondre à un besoin et d'identifier les degrés de liberté
- Remettre en cause les solutions existantes et d'élargir le champ des possibilités
- Mieux circonscrire les zones d'étude et d'optimiser localement les solutions sans perdre de vue d'ensemble.

L'objet de la démarche fonctionnelle peut être un produit technologique ou non, mais aussi un service, un processus, un projet, une organisation, une entreprise ... Il est possible de mener l'étude fonctionnelle d'un logement, de son installation de

chauffage, de la conception de son éclairage, de son système de ventilation, mais aussi de la distribution d'eau potable d'une ville, d'une crèche municipale ... etc, voire même d'un groupe ou d'une organisation sociale.

Chaque objet technique (appareil) ou système étudié remplit une fonction globale d'usage (ou fonction de service) pour répondre à un besoin spécifique de l'utilisateur. Dans un contexte donné, ce besoin est déterminé par des contraintes matérielles, techniques, réglementaires, économiques, sociologiques ... qu'il convient de préciser. Par exemple :

- Contraintes matérielles : alimentation en énergie, alimentation en eau, évacuations, dimensions, conception du local...
- Contraintes techniques : performances, capacité, consommation d'énergie, calorifugeage, durée de vie, robustesse, dimensions, bruit ...
- Contraintes économiques : coûts d'achat, de fonctionnement, des accessoires indispensables, de l'entretien et de la maintenance ...
- Contraintes professionnelles : type et importance de la production, concept et process de production, méthode de travail, types de produits utilisés, fréquence d'utilisation, certification et respect des normes, formation et adaptation des utilisateurs ou du personnel ...
- Contraintes d'hygiène, de sécurité et d'ergonomie : respect des réglementations en vigueur, respect de la marche en avant, facilité d'entretien, limitation et traitement des nuisances et des émissions de polluant, ambiances thermique, lumineuse et sonore, conditions de travail... etc.

Cette fonction d'ensemble est décomposée en fonctions techniques principales qui sont indispensables à la réalisation du service attendu et en fonctions techniques complémentaires (ou secondaires) qui, elles, ne lui sont pas absolument nécessaires mais qui améliorent les performances de l'appareil ou apportent à l'utilisateur confort et simplicité d'utilisation, sécurité, facilité d'entretien ... etc.

Les solutions techniques sont la traduction matérielle (dispositifs ou organes de l'appareil) de chaque fonction technique.

Chacune de ces fonctions techniques (principales ou secondaires) peut être plus ou moins complexe, elle peut alors être décomposée, dans une analyse descendante sur

autant de niveaux que nécessaire, jusqu'à des fonctions techniques élémentaires qui seront remplies par des solutions techniques simples (organe précis et identifié) [1].

## **I.1.2- Principes de l'analyse fonctionnelle**

### **I.1.2.1- Notion de système**

Un système peut être défini de plusieurs façons :

- Ensemble d'éléments en interaction dynamique organisés en fonction d'un but (la plus générale).
- Outil de modélisation permettant de représenter et d'analyser des complexes d'éléments (matériels, abstrait ou conceptuels) caractérisés par leur nombre et un réseau de relations imbriquées.
- Ensemble fini, borné, caractérisé par des relations le reliant à son environnement et aux autres systèmes.

A chaque instant, un système est caractérisé par un état (ensemble des valeurs prises à une époque par tous les éléments composant le système) :

- La variété d'un système est l'ensemble des états possibles d'un système.
- L'état d'un système se définit par rapport au temps.
- En théorie, la variété est indépendante du temps (cas des équipements) ; en pratique, la variété peut se modifier (si le système se transforme dynamiquement).

Entre autres problématiques complexes posées par l'analyse de système :

- Un système est en relation avec son environnement (système ouvert) : quelles sont la nature, l'importance et la densité de ces échanges ?
- Un système est séparé de son environnement par une frontière. La définition de la frontière d'un système ouvert ne s'impose pas d'elle même à l'analyste, d'une part le système peut être composé de sous-systèmes, d'autre part la frontière est choisie en fonction de l'objectif poursuivi par l'étude.
- Le système répond aux perturbations qu'il reçoit en provenance de son environnement actif.

Ces perturbations modifieront elles la structure du système ? Quand une perturbation atteindra t'elle un niveau entraînant une modification des interrelations du système ? En principe cela ne se pose pas en équipement sauf en cas d'usure prévue.

### **I.1.2.2- Notions de fonction**

D'après la norme AFNOR NF X 50-151, l'analyse fonctionnelle est une démarche qui consiste à rechercher, ordonner, caractériser, hiérarchiser et / ou valoriser les fonctions du produit (matériel, logiciel, processus, service) attendues par l'utilisateur.

Une fonction est l'action d'un élément constitutif d'un système exprimée exclusivement en termes de finalité (par ce qu'il « fait »). Chaque fonction doit être exprimée, formulée par un verbe à l'infinitif suivi d'un ou plusieurs compléments.

-Fonction de service (ou fonction principale) : fonction attendues d'un produit pour répondre à un besoin ou un élément du besoin (matériel, physiologique, psychologique, socioculturel) de l'utilisateur. Elle peut être une fonction d'usage (service rendu) ou une fonction d'estime (conditions du service rendu).

-Fonction technique : fonction interne au produit nécessaire aux solutions retenues pour assurer les fonctions de service.

-Fonction technique principale ou élémentaire: permet de remplir une fonction d'usage, de rendre un service attendu.

-Fonction technique complémentaire ou secondaire : permet de remplir une fonction d'estime (sécurité, ergonomie, confort, environnement, législation ...).

### **I.1.2.3- Liens inter-fonctionnels**

La fonction entretient des relations internes et externes au système appelée données (on parle de flux de donnée).

-La donnée qui traverse la fonction est appelée la matière d'œuvre (M.O.).

-Toute fonction confère une valeur ajoutée (V.A.) à la matière d'œuvre.

-Il existe en général une matière d'œuvre dominante (ce pour quoi le système est conçu), il peut exister des matières d'œuvre secondaires.

-Les autres données sont des données de contrôle de la fonction, elles permettent la réalisation de la fonction.

-Selon les systèmes étudiés, les données peuvent être de nature très diverse : matières, énergies, informations ... etc.

-L'élément qui réalise une fonction est désigné sous le terme générique de processeur.

#### **I.1.2.4- réalisation de l'étude fonctionnelle**

L'analyse fonctionnelle du besoin ou analyse fonctionnelle externe met en évidence chacune des fonctions de service (ou fonctions principales) qu'elles soient d'usage ou d'estime (Pourquoi l'objet a-t-il été créé ?) ainsi que chacune des fonctions contraintes (Quelles sont les contraintes auxquelles l'objet doit satisfaire ?). Elle permet d'obtenir les données nécessaires à la conception du système, et c'est un outil de dialogue avec l'utilisateur.

L'analyse fonctionnelle du produit ou analyse fonctionnelle interne dégage chaque fonction technique principale et complémentaire et permet la matérialisation des concepts de solutions techniques. Elle caractérise le fonctionnement interne de l'objet ou système technique et consiste à :

-Définir le système, sa fonction globale, sa frontière, les entrées sorties de matières d'œuvre avec l'environnement.

-Rechercher les fonctions techniques, les décomposer en sous fonctions.

-Etablir et caractériser les liens entre éléments de l'objet ou système technique étudié.

L'outil de description peut :

-Privilégier l'analyse descendante, la modélisation, l'écriture des liens interfonctionnels et permettre la description de système complexe pour comprendre et communiquer, réaliser plan, schéma des automatismes, algorithmes de programmation ( S.A.D.T. : Structured Analysis and Design Technic ).

-Privilégier, de la fonction aux solutions techniques, le travail de recherche, de décomposition, d'ordonnancement, de valorisation pour comprendre et optimiser ( F.A.S.T. : Function Analysis System Technic ).

L'ensemble de l'analyse fonctionnelle est une démarche, une aide à la conduite d'un « Projet » (faciliter la compréhension, concevoir, créer, améliorer ... ) à mettre en œuvre de préférence en groupe de travail avec une intention clairement définie[1].

L'analyse des défaillances peut s'effectuer :

Soit de manière quantitative puis qualitative en exploitant l'historique de l'équipement et les données qualitatives du diagnostic et de l'expertise des défaillances

Soit de manière prévisionnelle en phase de conception ou a posteriori, après retour d'expérience.

Tout le problème pour l'homme de maintenance est de savoir quelles défaillances traiter en priorité, certaines n'ayant que peu d'importance en termes d'effets et de coûts.

L'exploitation de l'historique va permettre d'effectuer ce choix. Or, certains diront qu'ils n'ont pas le temps d'exploiter l'historique des machines, qu'ils ont autres choses à faire (du correctif certainement !..).

Il est clair que le choix des types de défaillance est important : une défaillance intrinsèque (propre au matériel) n'a rien à voir avec une défaillance extrinsèque (liée à l'environnement), et en tout état de cause, ne peut s'analyser de la même manière, même si on apporte par la suite un correctif. Si diagnostiquer une défaillance fait partie du travail quotidien de l'homme de maintenance, la prévoir, afin qu'elle n'arrive pas, est encore mieux. C'est le but de l'analyse prévisionnelle des défaillances [2].

## **I.2-Analyse quantitative des défaillances**

L'analyse quantitative d'un historique va permettre de dégager des actions d'amélioration, donc d'identifier les défaillances à approfondir afin de les corriger et les prévenir. Analyser quantitativement les résultats des diagnostics constitue ainsi un axe de progrès. Les données chiffrées à saisir doivent être les suivantes :

- Dates des interventions correctives (jours, heures) et nombre N de défaillances ; ces éléments permettront de calculer les périodes de bon fonctionnement (UT = Up Time), les intervalles de temps entre deux défaillances consécutives (TBF = Time Between Failures) et leur moyenne (MTBF) ; ces données permettront de caractériser la fiabilité des équipements ;
- Temps d'arrêt de production (DT = Down Time) consécutifs à des défaillances, y compris ceux des « micro-défaillances » ; tous les événements sont systématiquement consignés, même les plus anodins ; il est toujours plus simple de se rappeler d'une grosse panne que d'une micro-défaillance répétitive qui engendrera à terme une défaillance grave ; l'expérience montre que son oubli fausse complètement une étude de fiabilité ultérieure.

Il est prouvé aussi que les micro-défaillances, qui appartiennent à la routine, donc qu'on oublie facilement, sont génératrices de perte de disponibilité, donc de productivité moindre et bien sûr de non qualité ; ces données permettront donc de caractériser la disponibilité des équipements ;

- Durées d'intervention maintenance (TTR = Time To Repair) et leur moyenne (MTTR) ; ces données permettront de caractériser la maintenabilité des équipements[2].

### **I.3- Analyse qualitative des défaillances**

#### **I.3.1- Diagnostic et expertise**

Le diagnostic est « l'identification de la cause probable de défaillance à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test ». La norme NF EN 13306 va plus loin, puisqu'elle indique que le diagnostic d'une panne est « l'ensemble des actions menées pour la détection de la panne, sa localisation et l'identification de la cause ». On va donc jusqu'à l'expertise de la défaillance.

Localisation de panne est l'ensemble des actions menées en vue d'identifier l'équipement en panne au niveau de l'arborescence appropriée [2].

#### **I.3.2- Conduite d'un diagnostic :**

Elle nécessite un grand nombre d'informations recueillies :

- Au près des utilisateurs (détection, manifestation et symptômes)
- Dans les documents constructeurs et/ou dans les documents du service maintenance.

Mais il y a aussi l'expérience du terrain et le savoir-faire [1].

##### **a- Manifestation de la défaillance :**

La manifestation (ou effet) de la défaillance se manifeste par son amplitude (partielle ou complète), sa vitesse (elle est progressive ou soudaine), son caractère (elle est permanente, fugitive ou intermittente).

##### **b- Les symptômes :**

Les symptômes peuvent être observés in situ, sans démontage, par les utilisateurs de

l'équipement ou par le maintenancier : VTOAG, mesures, défauts de qualité. Le VTOAG est l'utilisation naturelle des cinq sens de l'individu. Il ne faut jamais les négliger, car ils sont capables de contribuer à l'établissement d'un diagnostic.

- La vue (V) :
  - Détection de fissures, fuites, déconnexions,
  - Détection de dégradations mécaniques.
- Le toucher (T) :
  - Sensation de chaleur, de vibration,
  - Estimation d'un état de surface.
- L'odorat (O) :
  - Détection de la présence de produits particuliers,
  - Odeur de brûlé, embrayage chaud,...
- L'auditif (A) :
  - Détection de bruits caractéristiques (frottements, sifflements).
- Le goût (G) :
  - Identification d'un produit (fuite).

Les symptômes peuvent aussi s'observer après démontage : mesures, observations de rupture, d'état de surface, contrôles non destructifs, etc.

### **c- Expérience :**

Lorsqu'il aborde un problème de défaillance sur un matériel, le maintenancier ne peut pas se permettre de naviguer à vue. Il connaît déjà les probabilités d'apparition de défaillance sur un matériel.

### **d- Savoir-faire :**

Le diagnostic est construit comme une enquête policière : le maintenancier part des informations et symptômes, et à partir de son expérience, il formule des hypothèses affectées d'un niveau de probabilité plus ou moins important, teste ces hypothèses afin de se construire une certitude. Il dispose pour cela d'outils de diagnostic. Les plus utilisés sont :

- Le diagramme Causes – Effets,
- L'arbre des causes,
- L'organigramme de diagnostic et/ou la fiche de diagnostic [2].

## II.1- La surveillance

La surveillance des machines a considérablement évolué ces dernières années .au début de son apparition elle était essentiellement destinée à permettre l'arrêt d'une machine avant qu'elle ne subisse des dégradations importantes. Généralement cette protection est assurée par le déclenchement d'une alarme ou par l'arrêt de la machine si l'amplitude de la vibration atteint un seuil inacceptable pour le bon fonctionnement. Actuellement cette dernière est devenue le pilier de la stratégie de maintenance : la maintenance préventive conditionnelle.

Dans ce concept de maintenance, la surveillance doit non seulement remplir sa fonction initiale de « sécurité », qui devient alors secondaire, mais surtout permettre la détection précoce de défauts et le suivi de leur évolution dans le temps. La détection des défauts à un stade précoce offre la possibilité de planifier et de préparer les interventions nécessaires en les intégrant si possible, dans les arrêts techniques de fabrication ou en provoquant des arrêts programmés à des moments opportuns, en fonction notamment des impératifs de production [3].

Il est également important de remarquer que mettre en place une maintenance conditionnelle ou prévisionnelle reposant sur une surveillance d'un niveau de fiabilité insuffisant revient dans les faits à pratiquer une maintenance corrective sans disposer de la logistique adaptée à cette forme de maintenance (disponibilité permanente d'une équipe d'intervention, des pièces ou équipements de rechange.....).

Les fondements et la finalité du diagnostic et les moyens à mettre en œuvre (outils d'investigation, méthodologies, niveaux de qualification....) ont considérablement évolué ces dernières années. Actuellement on considère la surveillance comme un moyen de protection de la machine contre toute dégradation parce qu'elle permet son arrêt avant qu'elle ne soit affectée.

Cette protection est assurée par le déclenchement d'une alarme ou par l'arrêt répété de la machine si l'amplitude de la vibration (souvent le déplacement relatif de l'arbre dans un palier) atteint des valeurs jugées successives pour le bon fonctionnement ou l'intégrité de cette dernière. Elle est maintenant devenue le pilier d'une stratégie de maintenance : la maintenance préventive conditionnelle.

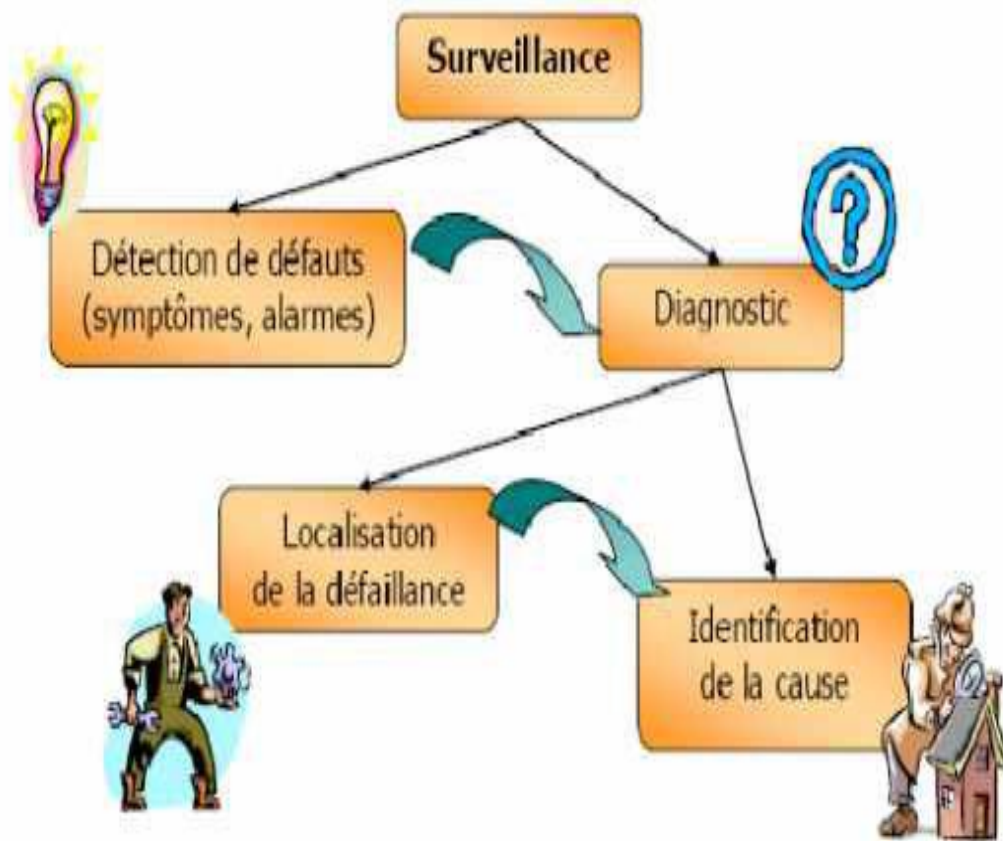
## II.2- Etapes en processus de surveillance

La surveillance se compose de deux phases principales qui sont la détection et le diagnostic (voir la figure II.1) [4]:

**La détection** : Dont le but est de déterminer la présence d'un défaut affectant le procédé. Elle consiste à analyser et déceler ses effets sur le système (symptômes).

**Le diagnostic** : Se basant sur les défauts détectés, cette étape consiste en :

- Une localisation : qui sert à déterminer le type de défaut affectant le procédé en moyen d'indications relatives à l'élément en défaut ;
- Une identification : qui sert à déterminer exactement la cause de ces symptômes en identifiant la nature du défaut.



**Figure II.1** Composantes de la surveillance industrielle

## II.3 -Types de surveillance

Selon l'importance et la criticité, on distingue deux types de surveillance des machines :

-Surveillance en ligne

-Surveillance hors ligne

(Voir la figure II.2) [5-6].



Figure II.2 Les types de surveillance des machines

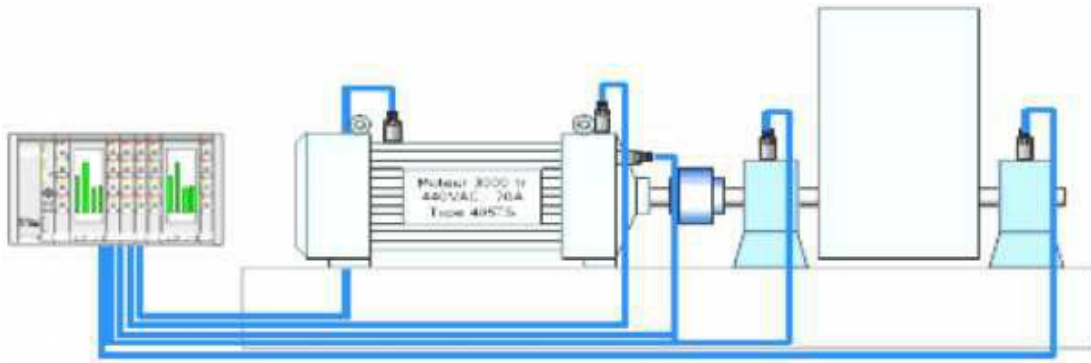
### II.3.1 -Surveillance On-line ou suivi continu

Ce type de surveillance est utilisé en permanence sur des machines spécifiques et dont il surveille constamment les états de fonctionnement par la mesure en continu des paramètres physiques notamment ceux à évolution rapide tels que la vitesse, la traction, les vibrations,..etc.

Ce type de surveillance joue un rôle important dans l'efficacité de la conduite de process, générant immédiatement, dans la salle de contrôle [5-6], un signal d'alarme lors d'un changement de l'état de la machine. Cette technique se base, généralement, sur un diagnostic à base de modèles qui repose sur une modélisation structurelle du système à diagnostiquer. Son principe consiste à faire une comparaison entre le comportement prédit issu d'un modèle de représentation (de bon fonctionnement) et le

comportement réellement observé. Cette comparaison permet de détecter les incohérences afin de déduire les causes de défauts. Le maintien d'un bon fonctionnement de l'ensemble passe donc par la mise en place des outils de détection des défaillances éventuelles et des systèmes de commande robustes.

La figure II.3 représente un système de surveillance en ligne [5-6].

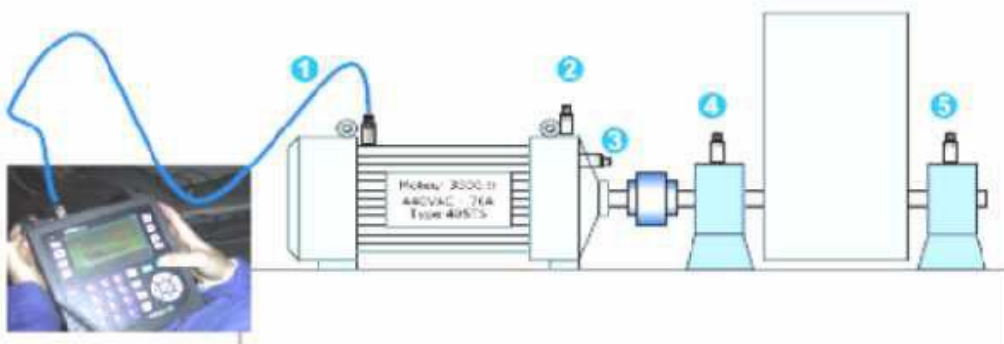


**Figure II.3** Surveillance On-line (en ligne) ou suivi continu

### II.3.2- Surveillance off-line (hors ligne) ou suivi périodique

Avec ce type de surveillance, les mesures, les prélèvements, les vérifications sont effectuées à des moments préétablis et à intervalles réguliers. En thermographie infrarouge ou en analyse d'huiles, par exemple, où l'évolution du paramètre physique est plutôt lente, la surveillance est nécessairement périodique [5-6].

La figure II.4 représente un système de surveillance off-line ou suivi périodique [5-6].

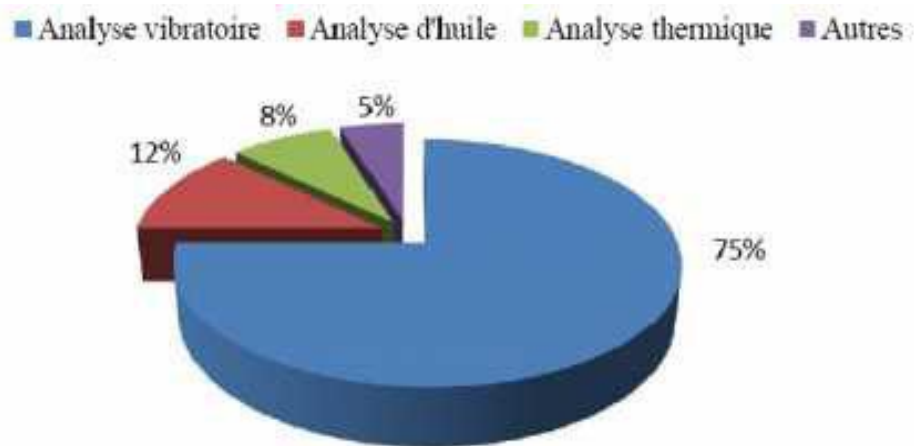


**Figure II .4** Surveillance off-line ou suivi périodique

## II.4 -Techniques de surveillance des machines tournantes

Aujourd'hui, plusieurs techniques peuvent être employées pour surveiller l'état des machines tournantes par l'analyse des vibrations, du bruit, de la température, du courant,...etc [7-9].

Les différentes techniques de la surveillance des machines tournantes sont illustrées dans la figure II.5



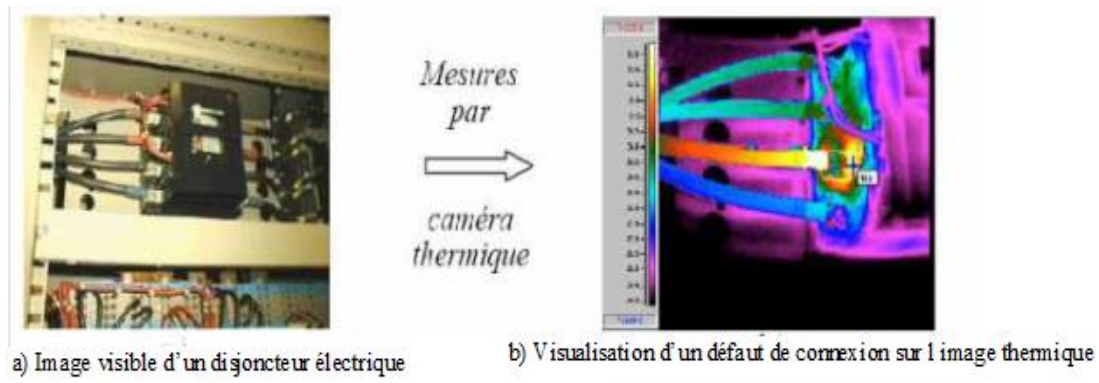
**Figure II .5** Différentes techniques de la surveillance des machines tournantes

### II.4.1- La thermographie infrarouge

Cette technique permet de mesurer la température de composants sans contact. Elle peut être utilisée pour la surveillance des machines tournantes notamment pour la détection de défauts qui se manifestent par un échauffement anormal à la surface de l'équipement.

La thermographie permet de réaliser des mesures à distances et d'obtenir instantanément une image thermique de la zone inspectée [7-9].

Le principe de l'analyse thermographique est illustré dans la figure II-6



**Figure II .6** Principe de l'analyse thermographique

#### II.4.2-L'analyse des huiles

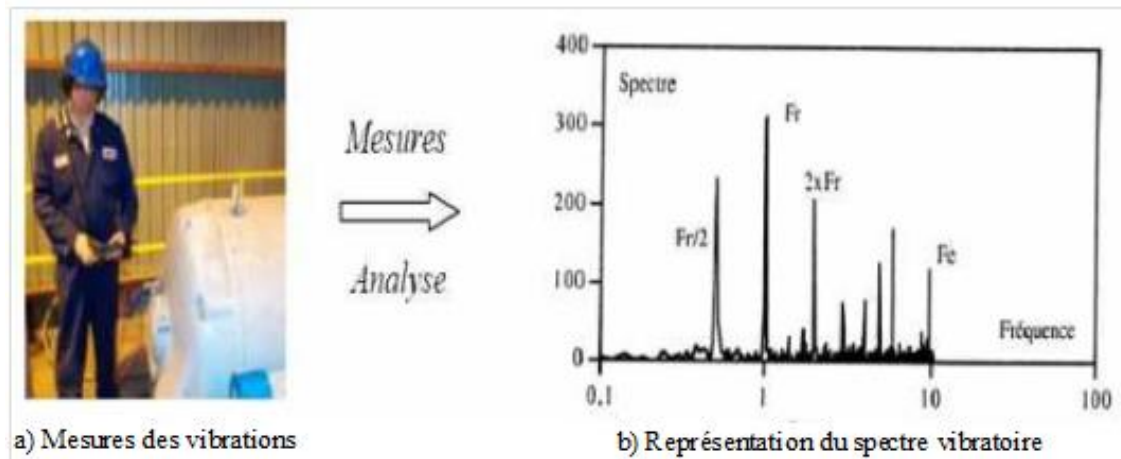
L'huile est en contact permanent avec les pièces en mouvement. Elle fournit de nombreuses informations sur l'état de la machine.

L'analyse d'huile est appliquée à toutes les machines contenant des fluides de lubrification (réducteurs, motoréducteurs, moteurs thermique, etc). Elle consiste à prélever un échantillon d'huile et de l'analyser (recherche de particules d'usure) pour déduire l'état de l'équipement [7-9].

#### II.4.3 - L'analyse vibratoire

La surveillance vibratoire qui s'adapte le plus aux composants mécaniques des machines tournantes en fonctionnement est la technique la plus utilisé dans l'industrie. Elle permet la détection de la majorité des défauts susceptibles d'apparaître. Les études et analyses menées dans ce domaine ont, non seulement, montré la présence permanente de la vibration dans les machines en cours de fonctionnement, mais aussi, l'existence d'une forte corrélation ente ce comportement et l'état de la machine. Ainsi plus l'état de détérioration de la machine est avancé plus les niveaux de vibration sont importants [7-9].

Le principe de l'analyse thermographique est illustré dans la figure II.7.



**Figure II .7** Principe de l'analyse vibratoire

#### II.4.4 – L'analyse acoustique ou par Ultrasons

Pour des applications spécifiques et la recherche de défauts bien précis, on retrouve ces deux méthodes, dont la première consiste en une détection de tout bruit anormal en moyen de microphones placés à une certaine distance de l'équipement, tandis que la deuxième est dédiée à la détection de défauts dont la signature est de faible amplitude et de haute fréquence tel que le début de dégradation d'un roulement [7-9].

#### II.5 - Choix d'outils de surveillance

Tenant compte des impératifs du process, tel qu'une chaîne de production, de son type, de sa complexité et autres conditions de l'environnement, Le choix d'une technique de surveillance pour le diagnostic, la localisation et l'identification d'une défaillance revêt une grande importance et se doit être le plus approprié. Ainsi, en fonction de ces considérations on pourra opter pour un ou plusieurs choix pour un type de surveillance [10-11]. Le tableau II-1 donne un aperçu sur les critères pris en compte pour le choix de l'outil de surveillance.

|                    | Principaux avantages   | Principales limitations  | Champ d'applications privilégié  |
|--------------------|--|--|--|
| Analyse vibratoire | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Détection de défauts à un stade précoce</li> <li>- Possibilité de réaliser un diagnostic approfondi</li> <li>- Autorise une surveillance continue</li> <li>- Permet de surveiller l'équipement à distance (télémaintenance)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Spectres parfois difficiles à interpréter</li> <li>- Dans le cas de la surveillance continue, les installations relativement coûteuses</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Détection des défauts de tous les organes cinématiques de la machine (balourd, défauts d'alignement, jeux, etc.) et de sa structure</li> </ul>   |
| Analyse d'huiles   | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Détection d'une pollution anormale du lubrifiant, avant que celle-ci n'entraîne une usure ou un échauffement</li> <li>- Possibilité de connaître l'origine de l'anomalie par analyse des particules</li> </ul>                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Ne permet pas de localiser précisément le défaut</li> <li>- Nécessite de prendre de nombreuses précautions dans le prélèvement de l'échantillon</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Contrôle des propriétés physico-chimiques du lubrifiant, détection d'un manque de lubrification, analyse des éléments d'usure, analyse de contamination par le process (étanchéité)...</li> </ul> |
| Thermographie IR   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Permet de réaliser un contrôle rapide de l'installation</li> <li>- Interprétation souvent immédiate des résultats</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Détection de défauts à un stade moins précoce que l'analyse vibratoire</li> <li>- Contrôle limité à ce que voit la caméra (échauffements de surface)</li> <li>- Ne permet pas de réaliser un diagnostic approfondi</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Détection de tous les défauts engendrant un échauffement (manque de lubrification en particulier)</li> </ul>   |
| Analyse acoustique | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Permet de détecter l'apparition de défauts audibles</li> <li>- Autorise une surveillance continue</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sensibilité au bruit ambiant</li> <li>- Diagnostic souvent difficile à réaliser</li> <li>- Problèmes de répétition des mesures</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Détection d'un bruit inhabituel pouvant ensuite être analysé par analyse vibratoire</li> </ul>   |

**Tableau I-1:** Choix de l'outil de surveillance

## II.6 -Terminologies utilisées en surveillance

Différentes Terminologies sont utilisées en surveillance, tel que [12-16] :

**Système** : un ensemble d'éléments déterminé discrets (composants, constituants) interconnectés ou en interaction.

**Processus** : un processus est un système, équipement ou machine. Un processus est un ensemble d'éléments ou composants réagissant entre eux et avec le milieu extérieur, susceptible d'évoluer dans le temps afin d'accomplir une activité clairement définie et générer de la valeur ajoutée.

**Composant** : un composant industriel est un organe technologique qui forme une partie du processus industriel.

**Dégradation** : une dégradation représente une perte de performances d'une des fonctions assurées par un équipement.

**Défaut** : une déviation par rapport aux conditions acceptables ou normales d'un paramètre caractéristique du système

**Panne** : une panne est l'état d'un système incapable d'assurer le service spécifié à la suite d'une défaillance.

**Résidu** : un signal potentiellement indicateur de défauts.

## II.7 -Surveillance vibratoire

De nos jours, plusieurs techniques sont employées pour la surveillance de paramètres tels que le bruit, la température, le courant électrique, les vibrations...etc, dans différentes installations.

Il est montré dans la littérature que la technique basée sur la surveillance vibratoire est l'une des plus efficaces de par sa capacité à détecter, localiser et distinguer les différents types de défauts dès leurs création, et avant qu'ils ne deviennent critiques et dangereux. Ces défauts peuvent être distribués ou localisés. Chaque machine a une signature de vibration spécifique et qui est liée à sa conception et son état. Si ce dernier change, il en serait de même pour la signature vibratoire. Ce changement peut être utilisé pour détecter tous défauts naissants.

### **II.7.1- L'Analyse vibratoire**

L'analyse vibratoire est la plus connue et la plus utilisée car adaptée aux des composants mécaniques et aux machines industrielles en fonctionnement. Elle permet de détecter la majorité des défauts susceptibles d'apparaître dans les machines tournantes.

#### **II.7.1.1- Objectifs d'analyse vibratoire :**

L'analyse vibratoire poursuit deux objectifs :

- La détection des défauts.
- L'analyse détaillée des défauts.

On utilise à cet effet des paramètres calculés soit dans:

- Le domaine temporel,
- Dans le domaine fréquentiel,
- Dans les deux à la fois. [17]

#### **II.7.1.2- Les avantages :**

- Détection de défauts à un stade précoce,
- Possibilités de réaliser un diagnostic approfondi,
- Autorise une surveillance continue,

#### **II.7.1.3- Les inconvénients**

- Spectres parfois difficile à interpréter.
- Dans le cas de la surveillance continue, les installations relativement coûteuses.

#### **II.7.1.4-Champs d'application privilégiée :**

Détection des défauts de tous les organes cinématiques de la machine (balourd, défauts d'alignement, jeux, etc...), et de sa structure.

### **II.7.2- Définition d'une vibration**

Un système mécanique est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement de va-et-vient autour d'une position moyenne, dite position d'équilibre, si l'on observe le mouvement d'une masse suspendue à un ressort on constate qu'il se traduit par :

Un déplacement : la position de la masse varie de part et d'autre du point d'équilibre.

Une vitesse de déplacement : variation du déplacement par rapport au temps.

Une accélération : variation de la vitesse par rapport au temps.

La vibration d'une machine soumise à une force périodique peut être décrite en termes de déplacement, de vitesse ou d'accélération. La vitesse du mouvement vibratoire correspond à la variation de son déplacement pour une unité de temps. L'accélération représente une variation de la vitesse par unité de temps [18].

### **II.7.3-Caractéristiques d'une vibration :**

Une vibration se caractérise principalement par sa fréquence, son amplitude et sa nature.

#### **II.7.3.1 Fréquence :**

La fréquence est le nombre de fois qu'un phénomène se répète en un temps donné.

Lorsque l'unité de temps choisie est la seconde, la fréquence s'exprime en hertz [Hz].

1 hertz = 1 cycle/seconde.

Une vibration qui se produira 20 fois par seconde aura donc une fréquence  $f$  de 20 hertz.

#### **II.7.3.2- Amplitude :**

On appelle amplitude d'une onde vibratoire la valeur de ses écarts par rapport au point d'équilibre et on peut définir l'amplitude maximale par rapport au point d'équilibre appelée amplitude crête ou niveau crête, l'amplitude double, aussi appelée l'amplitude crête à crête ou niveau crête-crête.

#### **II.7.3.3- Nature d'une vibration :**

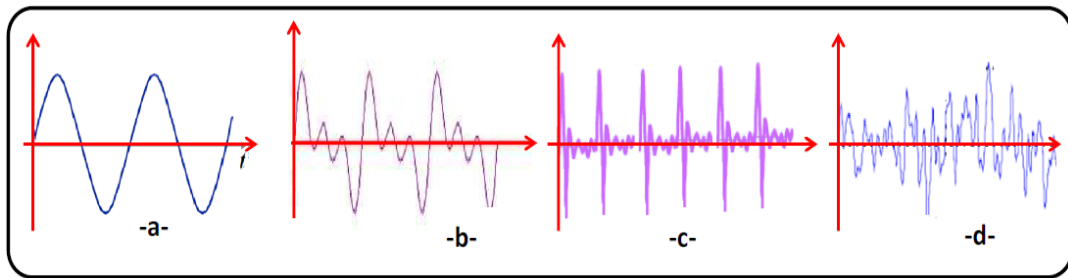
Une machine tournante quelconque en fonctionnement génère des vibrations que l'on peut classer de la façon suivante:

Les vibrations périodiques de type sinusoïdal simple (Figure II.8 a) ou sinusoïdal complexe (Figure II.8 b) représentatives du fonctionnement normal ou anormal d'un certain nombre d'organes mécaniques (rotation de lignes d'arbres, engrènements,...) ou d'un certain nombre d'anomalies (déséquilibre, désalignement, déformations, instabilité de paliers fluides, déversement de bagues sur roulements, ...).

Les vibrations périodiques de type impulsif (Figure II.8 c) sont appelées ainsi par référence aux forces qui les génèrent et à leur caractère brutal, bref et périodique. Ces chocs peuvent être produits par des événements normaux (presses automatiques,

broyeurs à marteaux, compresseurs à pistons, ...) ou par des évènements anormaux comme l'écaillage de roulements ou un défaut sur des engrenages, un jeu excessif, ...

Les vibrations aléatoires de type impulsif (Figure II.8 d) peuvent, par exemple, être générées par un défaut de lubrification sur un roulement, la cavitation d'une pompe[19].



**Figure II.8** Nature d'une vibration.

#### II.7.4-Vibrations des machines tournantes :

En pratique, une bonne conception produira de faibles niveaux vibratoires dans une machine tournante. Cependant, la machine vieillissant, les fondations travaillent, les pièces se déforment et s'usent, et de légers changements dans ses propriétés dynamiques apparaissent.

Les arbres se désalignent, les rotors se déséquilibrent, les courroies se détendent, les jeux augmentent. Tous ces facteurs se traduisent par une augmentation de l'énergie vibratoire qui excite les résonances et ajoute une charge dynamique considérable aux paliers.

Les vibrations recueillies lors des campagnes de mesures sont porteuses d'informations qui caractérisent l'état de fonctionnement de certains composants mécaniques constituant la machine analysée, c'est grâce à l'analyse de ces vibrations qu'il est possible de détecter les composants défectueux et éventuellement de les localiser, lorsqu'un certain seuil (correspondant à un niveau de vibration limite) fixé est atteint, il est possible d'estimer la durée de vie résiduelle du composant dans les conditions de fonctionnement données à partir de la connaissance des lois d'endommagement [20]

### II.7.5 Les capteurs de vibration :

La première étape conduisant à l'obtention d'une lecture de vibration consiste à convertir la vibration mécanique produite par une machine en un signal électrique équivalent.

Cette opération est réalisée au moyen des capteurs de vibrations, on retrouve parmi les capteurs les plus couramment utilisés le proximètre (mesure de déplacement), la vélocimétrie (mesure de vitesse) et l'accéléromètre (mesure d'accélération).

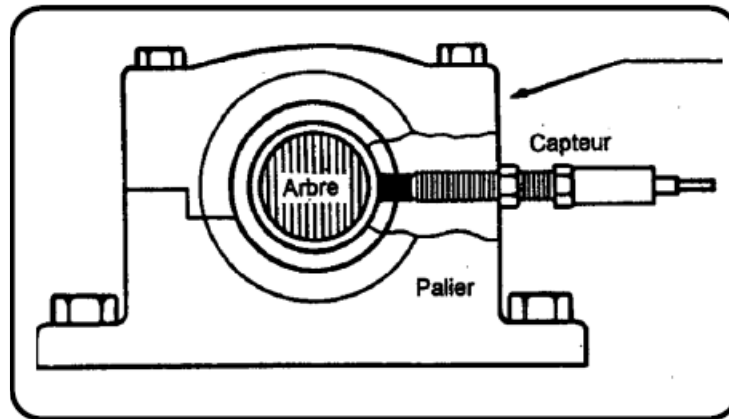
#### II.7.5.1- Le proximètre :

Le proximètre, ou sonde capteur de déplacement, le contact directement proportionnel au déplacement relatif de la vibration d'un arbre ou d'un rotor, il est monté en permanence à l'intérieur du palier (Figure II 9, II 10), les mesures en déplacement ne sont pas quantifiables dans toutes les gammes de fréquence, ces mesures seront limitées aux basses fréquences (< 100 Hz).



**Figure II.9** Un proximètre

Le capteur de déplacement est utilisé pour toutes les applications où la surveillance des jeux entre les arbres et les paliers s'avèrent essentielle.



**Figure II.10** Un proximètre monté sur un palier.

#### II.7.5.1.1- Les avantages

- Mesure directement les mouvements d'arbre
- Même capteur pour les butées axiales, les vibrations radiales et la vitesse
- Mesure directement le déplacement
- Pas de pièce mobile

#### II.7.5.1.2- Les Inconvénients

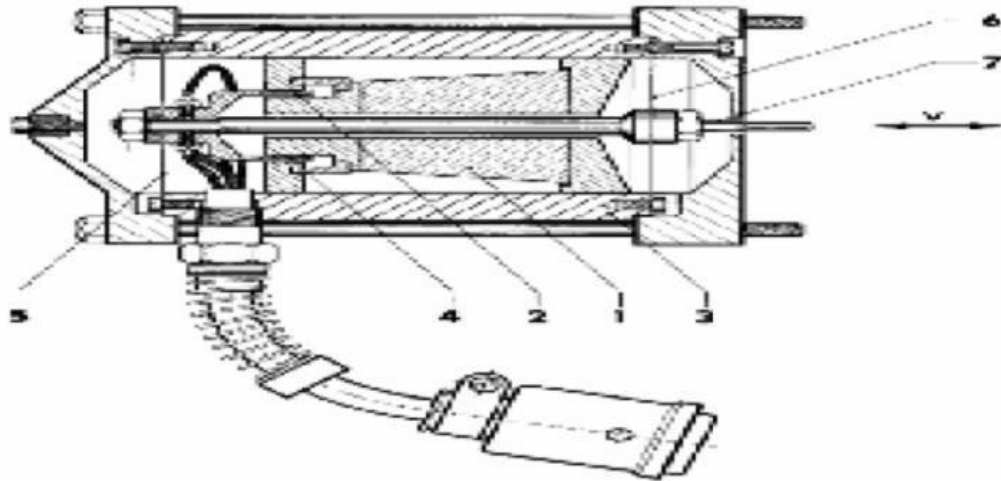
- Sensible au matériau de l'arbre
- Installation difficile
- Gamme de fréquence limitée, pas de détection des défauts de roulements
- Restriction de températures

#### II.7.5.1.3- Les problèmes et défauts détectés :

- Arbre
- Palier lisse
- Butée
- Généraux : balourd, désalignement, usure, etc.

#### II.7.5.2- Vélométrie :

Les capteurs de vitesse, ou vélocimétrie, sont constitués d'une sonde à contact dite sonde sismique qui mesure le mouvement absolu de l'organe sur lequel est fixée. La figure II.11 montre un Schéma de principe d'une vélocimétrie



**Figure II.11** Schéma de principe d'une vélocimétrie

Tel que :

1 : Aimant permanent

2 : Entrefer

3 : Boîtier

4 : Bobine

5,6 : Membranes

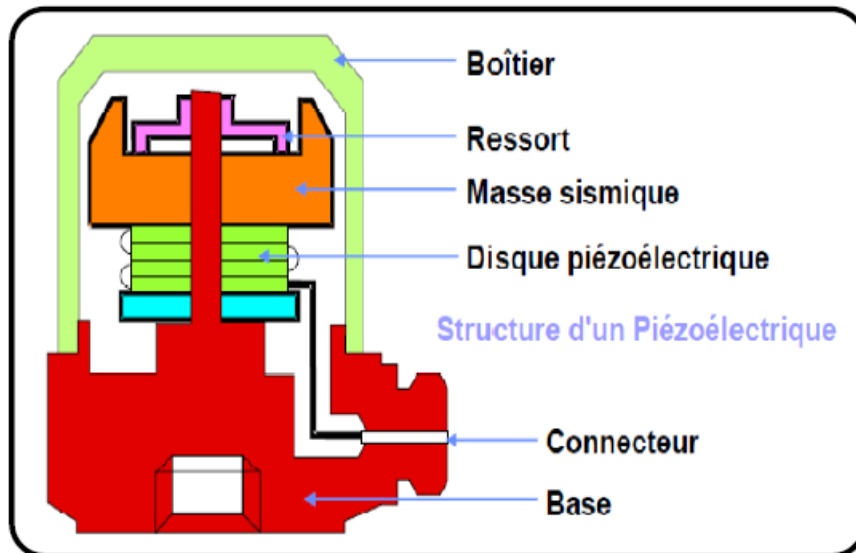
7 : Tige

### II.7.5.3- Les accéléromètres :

Un accéléromètre piézoélectrique se compose d'un disque en matériau piézoélectrique (quartz), qui joue le rôle d'un ressort sur lequel repose une masse sismique précontrainte (Voir les figures II.12, II.13).



**Figure II.12** Accéléromètre piézoélectrique



**Figure II.13** Schéma de principe d'un accéléromètre.

Les accéléromètres piézoélectriques tendent à devenir les capteurs de vibration absolue les plus utilisés pour la surveillance. Ils possèdent les propriétés suivantes :

- Utilisables sur de très grandes gammes fréquentielles.
- Excellente linéarité sur une très grande gamme dynamique (typiquement 140 dB).
- Le signal d'accélération peut être intégré électroniquement pour donner le déplacement et la vitesse
- Aucun élément mobile, donc extrêmement durable. [21]

#### **II.7.5.3.1- Les avantages**

- Facile à installer
- Petit, léger
- Supporte les hautes températures
- Pas de pièce mobile

#### **II.7.5.3.2- Les inconvénients**

- Nécessite une double intégration pour le déplacement
- Nécessite une source extérieure
- Fournit des informations limitées sur la dynamique d'arbre
- Médiocre pour les faibles vitesses.

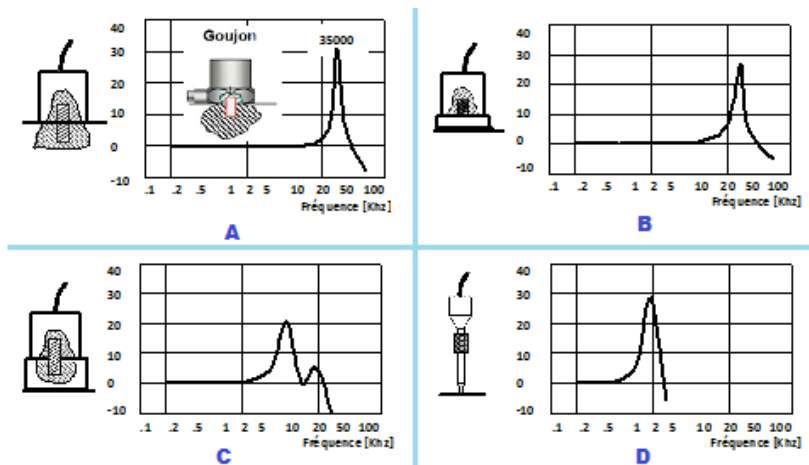
#### **II.7.5.3.3- Problèmes et défauts détectés**

- Roulements

- Engrenages
- Machine à pâles
- Machine électrique
- Généraux : balourd, désalignement, usure, etc.

### II.7.6- Modes de fixation :

Les accéléromètres possèdent une réponse linéaire sur une large gamme de fréquences, mais cette gamme de fréquences peut être considérablement diminuée selon leur mode de fixation (figure II.14). Pour que les mesures soient fiables, il faut qu'elles soient faites dans une gamme de fréquences nettement inférieures à la fréquence de résonance du capteur.



**Figure II.14** Réponse d'un accéléromètre en fonction de la fréquence selon le mode de fixation

- A**- fixation par goujon -**B**- fixation par embase collée.
- C**- fixation par aimant -**D**- fixation par pointe de touche.

### III.1 Les Défaits des machines

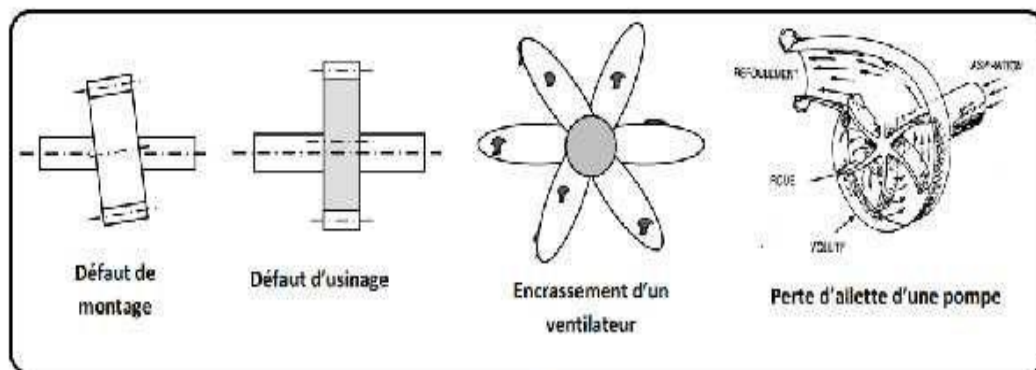
#### III.1.1 Défaut de balourd

Le défaut de balourd est le générateur de vibrations le plus commun dans une machine tournante, il est due à la distribution non symétrique de la masse autour de l'axe de rotation.

Un rotor est bien équilibré si son centre de masse appartient à l'axe de rotation et si cet axe est l'axe principal d'inertie. Ce balourd provient généralement de défauts d'usinage, d'assemblage et de montage, qui peuvent être la conséquence:

- D'une altération mécanique : perte d'ailette, érosion ou encrassement, ... (Figure III.1).
- D'une altération thermique : déformation suite à des dilatations différentes des matériaux constituant le rotor ou à des différences de température localisées.

On distingue le balourd statique, de couple, et dynamique [22-24].

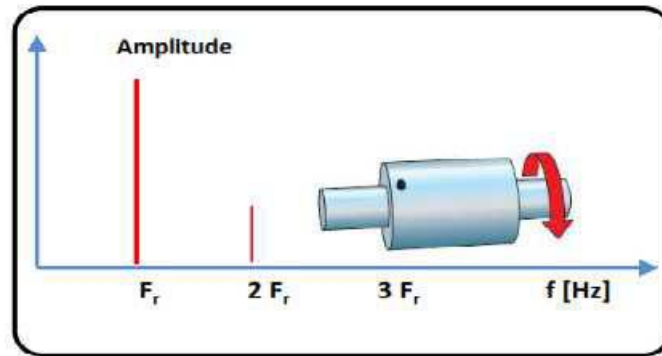


**Figure III 1.** Exemples de défauts induisant un balourd

Le balourd va induire, dans un plan radial, une vibration dont la fréquence de base d'une composante du correspond à la fréquence de rotation  $F_r$ .

Elle représente alors le pic le plus élevé avec d'autres pics d'amplitudes plus faibles sur les harmoniques de  $F_r$ .

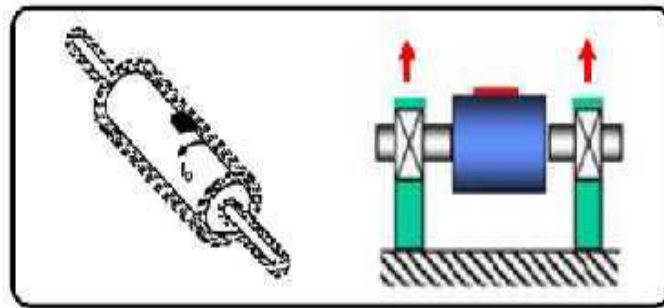
La Figure III.2 présente le spectre théorique d'un défaut de balourd.



**Figure III.2** Spectre théorique d'un défaut de balourd

### III.1.1.1 Défaut de Balourd statique

Le balourd statique apparaît dans le cas où le centre de la masse (centre de gravité) du rotor ne coïncide pas avec l'axe de rotation (voir figure III.3)

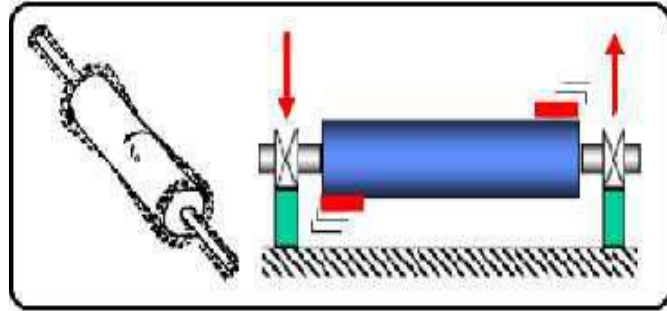


**Figure III .3** Balourd statique

### III.1.1.2 Défaut de Balourd dynamique

Dans un rotor flexible, même si le centre de celui-ci coïncide avec l'axe de rotation (on dit que le rotor est statiquement équilibré), on peut avoir dans certains cas les deux parties du rotor (suivant l'axe de rotation) statiquement déséquilibrées avec la même quantité.

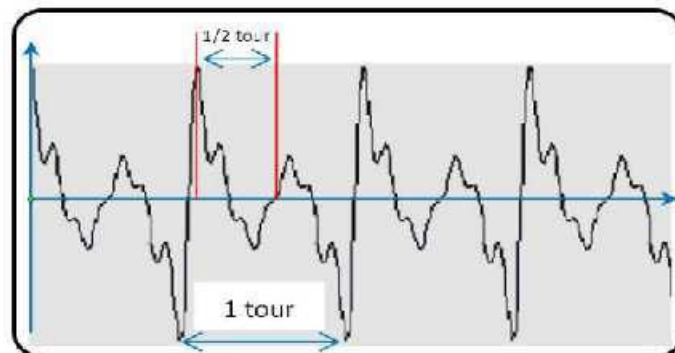
Les centres de gravité des deux parties se trouvent de part et d'autre de l'axe de rotation. Il s'agit d'un balourd dynamique (Figure III.4)



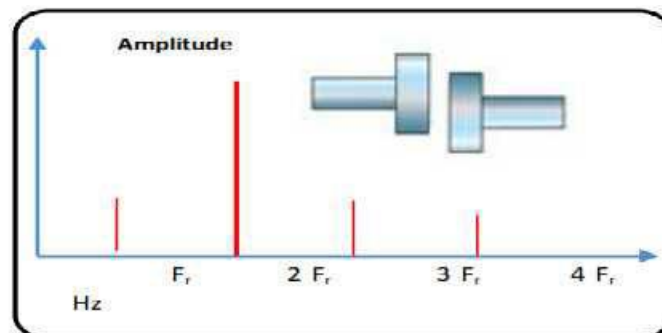
**Figure III.4** Balourd dynamique

### III.1.2 Défaut d'alignement

Le défaut d'alignement est l'une des principales causes de réduction de la durée de vie des équipements. Il concerne soit deux arbres liés par un accouplement, soit deux paliers soutenant le même axe. Les axes des deux rotors peuvent présenter un désalignement angulaire au niveau de l'accouplement ou un désalignement radial (axial) ou défaut de concentricité ou la combinaison des deux [22-24]. Le signal temporel d'un défaut d'alignement présentée sur la figure III.5



**Figure III 5.** Signal temporel d'un défaut d'alignement



**Figure III 6.** Image vibratoire d'un défaut d'alignement radial

### III. 1.2.1 Défaut de désalignement angulaire

Le désalignement angulaire est observé lorsque les axes des arbres sont dans le même plan mais non parallèles [22-24].

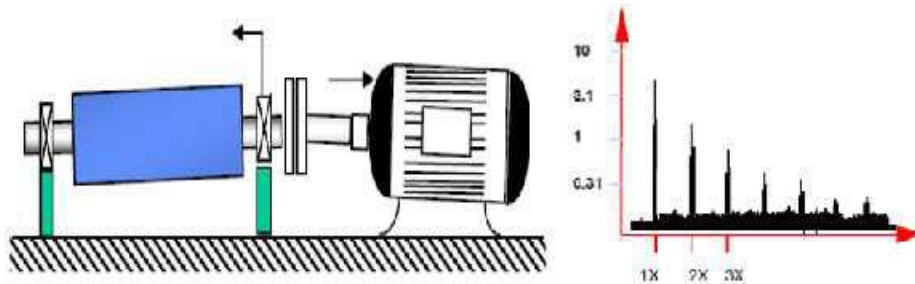


Figure III .7 Désalignement angulaire

### III. 1.2.2 Défaut de désalignement axial

Le désalignement axial se produit lorsque les axes des arbres sont parallèles mais ne coïncident pas.

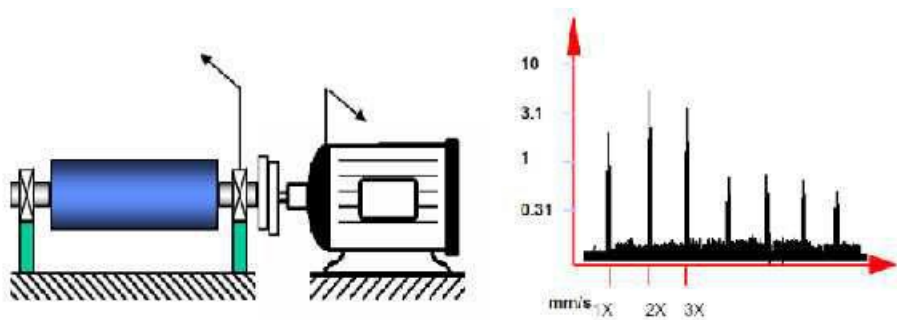
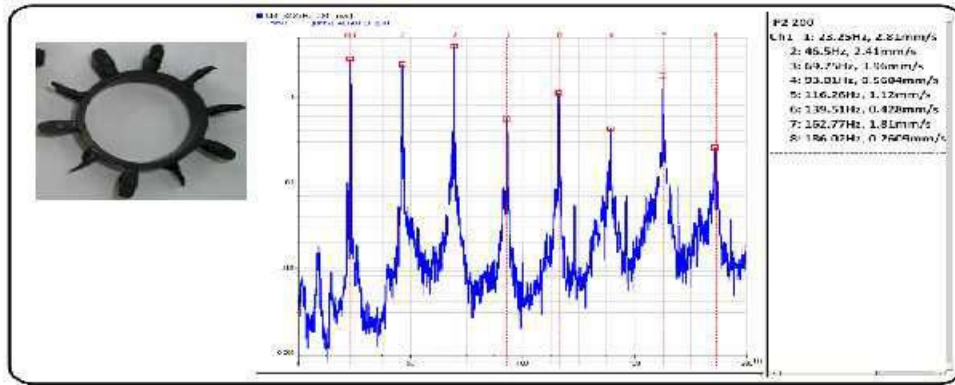


Figure III. 8 Désalignement axial (radial)

### III.1.3 Défauts de serrage

Le mauvais serrage de la structure de la machine génère des vibrations et un certain bruit. Le spectre typique mesuré sur une machine dans laquelle il existe un jeu contient un grand nombre de pic à des fréquences multiples de la fréquence de rotation. . Les causes d'un jeu sont principalement l'usure ou un mauvais montage. Il est également parfois possible de retrouver des pics à l'harmonique 1/2 (1/2 de la fréquence de rotation de l'arbre) et ses multiples. La figure III.9 montre un exemple de spectre d'une machine dont le joint de l'accouplement est usé. La fréquence de rotation est de 24,25 Hz.



**Figure III.9** Défaut d'usure d'accouplement

### III.1.4 Défaut des engrenages :

L'engrenage est un des mécanismes élémentaires les plus utilisés pour transmettre du mouvement, et adapter les vitesses de rotation entre organes moteurs et récepteurs.

Il est constitué de deux roues dentées mobiles autour d'axes de rotation, et dont l'une entraîne l'autre par l'action de dents successivement en contact.

Les engrenages sont parmi les organes les plus sensibles de la chaîne cinématique peuvent être soumis à un grand nombre d'avaries apparaissant lors du fonctionnement, et dont les causes sont multiples [25].

On distingue trois classes d'engrenages (Figure III.10) :

Les engrenages parallèles : les 2 arbres sont parallèles.

Les engrenages concourants : les 2 arbres sont tels que leurs prolongements se coupent

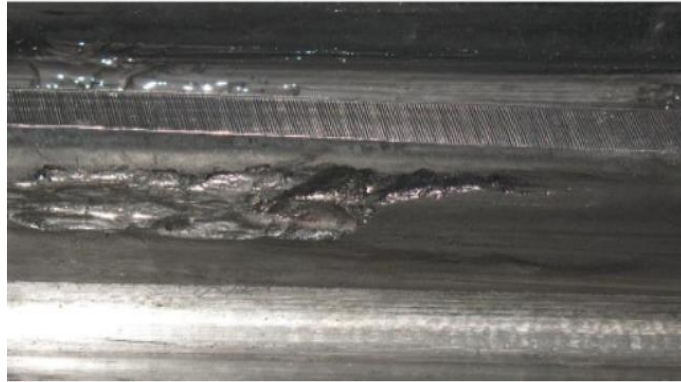
Les engrenages gauches : les 2 arbres occupent une position relative quelconque.



**Figure III.10** Différents types des engrenages

### III.1.4.1 Ecaillage :

Il se manifeste aussi sous forme de trous, mais ceux-ci sont beaucoup moins nombreux, plus profonds et plus étendus que ceux des piqûres. L'écaillage se trouve dans les engrenages cimentés, qui sont les plus répandus à l'heure actuelle car ils permettent de passer des couples importants avec des dimensions faibles. La figure III.11 montre l'écaillage d'engrenage



**Figure III.11** Ecaillage d'engrenage.

### III.1.4.2 Grippage :

Conséquence directe d'une destruction brutale du film d'huile, ou d'un frottement sous charge provoquant des hausses de températures, le grippage est favorisée essentiellement par des vitesses élevées, de gros modules, un faible nombre de dents en contact (voir la figure III.12)



**Figure III.12** Grippage d'engrenage

### III.1.4.3 L'usure :

L'usure est un phénomène local caractérisé par un enlèvement de matière dû au glissement de deux surfaces l'une contre l'autre. Le développement de l'usure est lié à la charge et à la vitesse de glissement en chaque point des surfaces de contact, ainsi qu'à la présence plus ou moins grande d'éléments abrasifs dans le lubrifiant.

L'usure normale, progresse lentement, elle est inversement proportionnelle à la dureté superficielle de la denture. L'usure anormale se produit lorsque le lubrifiant est souillé de particules abrasives ou lorsque le lubrifiant est corrosif, elle conduit à un mauvais fonctionnement de l'engrenage, voir sa mise hors service (figure III.13)



Figure III.13 Usure d'engrenage

### III.1.4.4 La piquûre

Il s'agit de trous peu profonds, qui affectent toutes les dents. La piquûre est une avarie qui se produit surtout sur des engrenages en acier de construction relativement peu dur. Il est moins à craindre si la viscosité du lubrifiant est élevée. L'apparition des piquûres est associée aussi à un rapport épaisseur de film lubrifiant sur rugosité composite insuffisant pour éviter des contacts entre aspérités (figure III.14)



Figure III 14. Piquûre d'engrenage

### III.1.4.5 La Fissure

Généralement par fatigue, elle progresse à chaque mise en charge, à partir d'un point initial situé presque toujours au pied de la dent, elle apparaît surtout sur des aciers fins, durcie par traitement thermique, qui sont très sensibles aux concentrations de contraintes, l'apparition de ces fissures est la conséquence d'une contrainte au pied de la dent qui dépasse la limite de fatigue du matériau, et est en général située du côté de la dent sollicitée en traction (figure III.15) [26].



Figure III. 15 Fissure d'engrenage

### III.1.5 Défauts des roulements :

Souvent pour le guidage en rotation, de nombreuses machines sont équipées de paliers de roulements car ils présentent une meilleure solution pour lutter contre le frottement pour les organes de machines en mouvement de rotation. Les roulements en général se constituent d'une bague extérieure, bague intérieure, cage, bille (figure III.16)

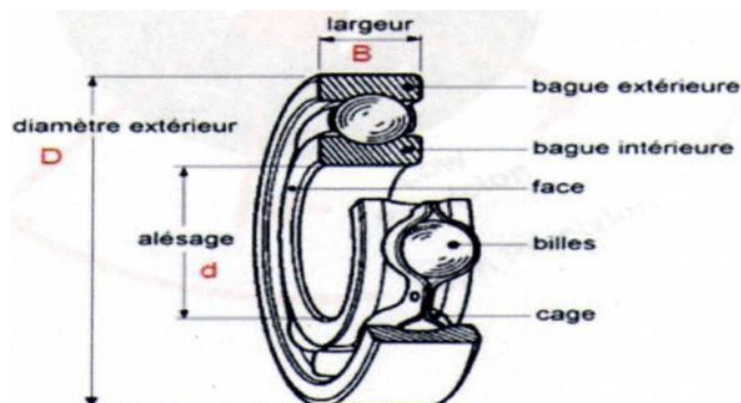


Figure III .16 Roulement à billes

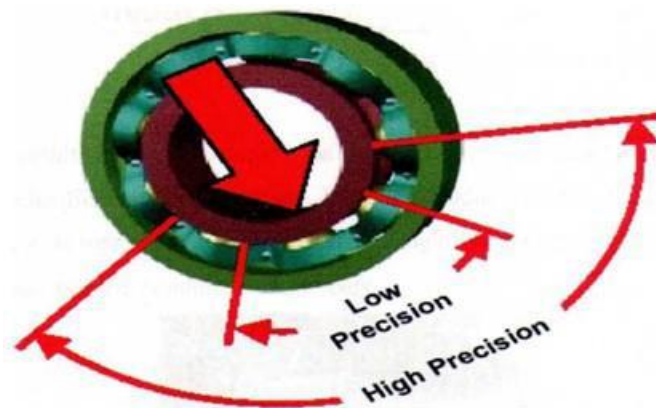
Dans la plupart des cas, la dégradation se traduit par un écaillage d'une des pistes ou d'un élément roulant du roulement, produisant un choc à chaque passage [27].

### III.1.5.1 Ecaillage :

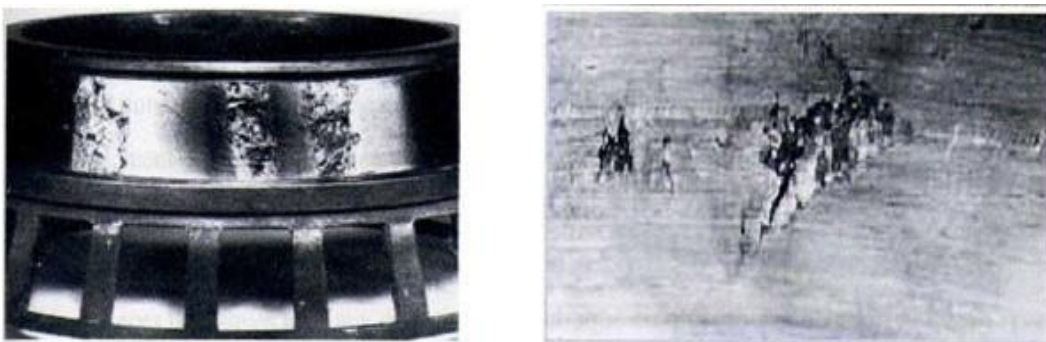
Les pressions importantes entre les éléments roulants et les bagues conduisent à des fissures, leur jonction en surface produit des écaillages qui provoquent des arrachements de matière, l'angle de la zone de charge dépend de la précision du roulement (Voir les figures III.17 et III.18).

L'écaillage peut se produire par :

- Flexion du rotor.
- Serrage excessif des bagues intérieures.
- Serrage excessif des bagues extérieures.



**Figure III. 17** L'angle de la zone de charge dépend de la précision du roulement



**Figure III.18** Ecaillage de fatigue et Ecaillage superficiel

### III.1.5.2 Détérioration indépendante de la fatigue

#### III.1.5.2.1 Usure

Le roulement sans glissement des éléments roulants sur les bagues extérieures et intérieures n'est pas assuré, le film d'huile peut se rompre et les glissements entraînent l'usure (Figure III.19)

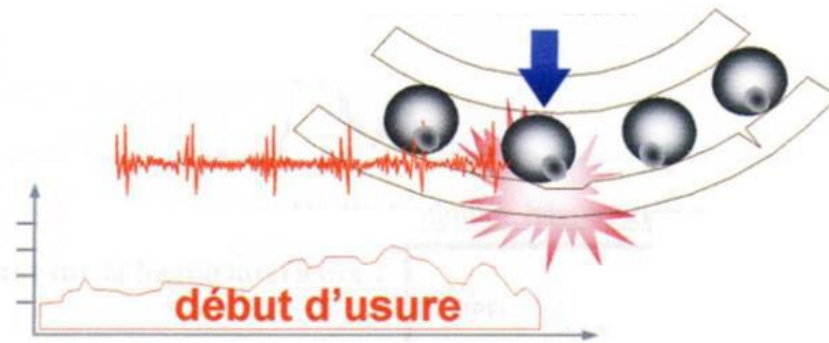


Figure III .19 L'Usure

#### III.1.5.2.2 Grippage

Le grippage résulte d'un manque de lubrifiant, les contacts métal-métal entraînent des échauffements qui facilitent les microsoudures. Une graisse durcie, une usure qui entraîne la rotation des rouleaux ou des aiguilles autour d'axes non parallèles à l'axe des bagues peuvent conduire à un grippage (Voir la figure III.20)



Figure III.20 Le Grippage

**III 1.5.2.3 Avarie de cage**

Les cages sont fragiles, lors du montage du roulement elles peuvent subir des déformations susceptibles d'entraîner le coincement des éléments roulants, le montage peut également conduire à leur rupture (déversement de bague extérieure, déversement de bague intérieure, déversement simultané des deux bagues) [28].

## I.1- Les défaillances

La réparation définitive, opposée au dépannage provisoire, s'appuie sur le diagnostic de la défaillance : C'est une action sur la cause. Le seul préventif juste est celui qui se déduit de la compréhension d'une défaillance- source de richesse, on ne peut vraiment prévenir que ce que l'on connaît.

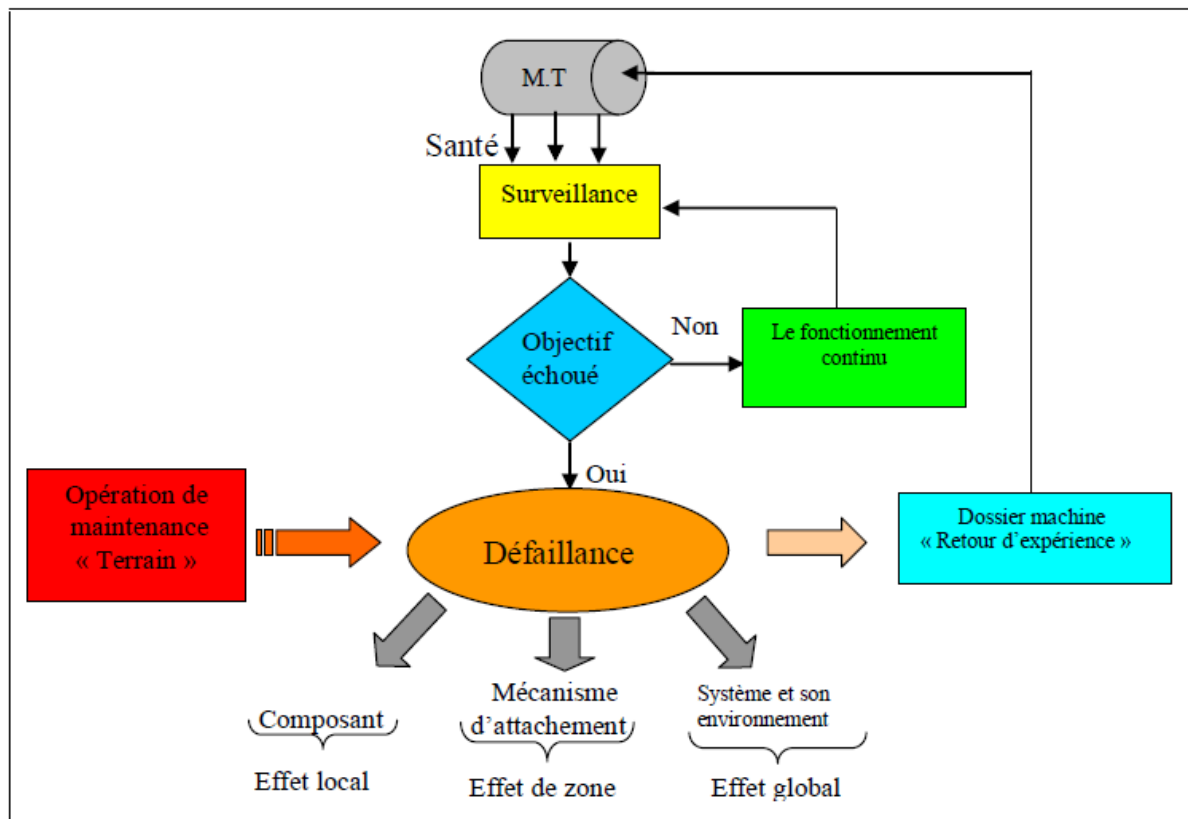
Certainement, la défaillance est une source de progrès en maintenance et en conception. Si elle est correctement exploitée, C'est un excellent point d'appui pour tenir compte de leçon du passé, car toute défaillance a une cause qui aurait pu être prévue donc prévenue. C'est pourquoi, il est essentiel de faire des analyses approfondies des pannes, des défaillances, des dégradations, des opérations de maintenance et des incidents rencontrés dans les différents services afin d'évaluer correctement un matériel.

De ce fait, les interventions « terrain » et l'exploitation des retours d'expériences « dossier machine » constituent un support robuste de la fonction méthode, cerveau d'un service de maintenance.

En effet, tout dysfonctionnement est le résultat d'un mécanisme pathologique rationnel et explicable, du à une ou plusieurs causes à identifier. Ces effets sont la défaillance du composant (effet local) et/ou du mécanisme d'attachement (effet de zone) et/ou du système et son environnement (effet global), (figure I.1).

Donc, la connaissance de l'installation est impérative. Alors, pour chaque système, il est important de définir clairement les éléments qui le caractérisent, à savoir : la fonction, la structure, les conditions de fonctionnement, les conditions d'exploitation et l'environnement dans lequel il travaille.

La compétition dans le domaine de l'automobile est un bon exemple de génération de progrès à partir des défaillances « terrain » et de l'exploitation du retour d'expérience « dossier machines » [29].



**Figure I.1** Les enjeux d'une défaillance [29]

## I.2 - Les types de défaillances

Il ne suffit pas de s'intéresser aux conséquences d'un défaut de fonctionnement mais aussi à sa cause. Les différents défauts se manifestant de manières variées, les défaillances suivantes ont été définies (norme NF EN 13306, 2001) :

- Défaillance complète : cessation du fonctionnement ;
- Défaillance partielle : altération du fonctionnement ;
- Défaillance progressive : qui pourrait être prévue par une vérification préalable ;
- Défaillance soudaine : qui ne peut pas être prévue ;
- Défaillance intrinsèque : due à une faiblesse inhérente au matériel concerné ;
- Défaillance extrinsèque : due à des contraintes supérieures aux capacités du matériel ;
- Défaillance mineure : la mission globale du matériel n'est pas affectée ;
- Défaillance majeure : la mission globale du matériel ne peut plus être assurée ;

- Défaillance cataleptique : défaillance soudaine et complète ;
- Défaillances précoces : défaillances dont le taux décroît dans le temps ;
- Défaillances aléatoires : défaillances dont le taux est constant dans le temps .

D'une façon générale la défaillance peut se manifester en fonction du temps de manière progressive ou par dérivés (par usure ou fatigue), cataleptiques (soudaine) ou de façon aléatoire, (figure I.2)

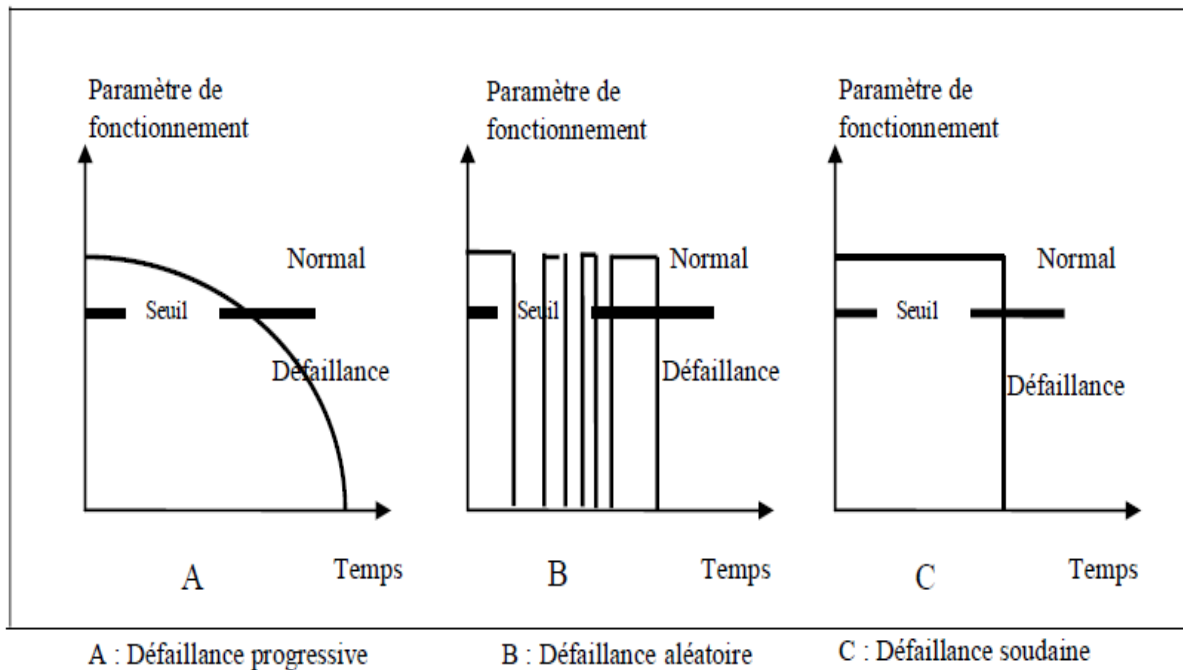
### **Défaillance soudaine :**

Généralement, ses défaillances sont dues aux défauts pré existants dans les pièces en service. Elles sont complètes et soudaines, (figure I.2.C).

Il apparaît suite à un défaut soit lors de l'élaboration de la matière, soit lors de l'élaboration de la pièce finie ou lors du montage. Exemple la rupture brusque d'une pièce mécanique ; le court circuit d'un système électrique ou électronique. Dans ce cas, il est très difficile d'observer la dégradation, par conséquent, il est impossible de mettre en place une maintenance conditionnelle.

### **Défaillance progressive :**

La connaissance des comportements des systèmes est indispensable. Dans ce cas, on voit la progression de la dégradation (figure I.2.A) .A titre d'exemple les phénomènes d'usure en mécanique : l'augmentation du frottement ou l'augmentation de la valeur des résistances pour les systèmes électroniques. Ces défaillances ont une probabilité d'apparition plus ou moins grande tout au long de la vie d'un matériel. Une telle défaillance est souvent identifiée. Dans ces circonstances, il devient possible de retirer l'élément dégradé en service avant le point de la défaillance potentielle et avec une utilisation maximale sans subir une défaillance fonctionnelle [29].

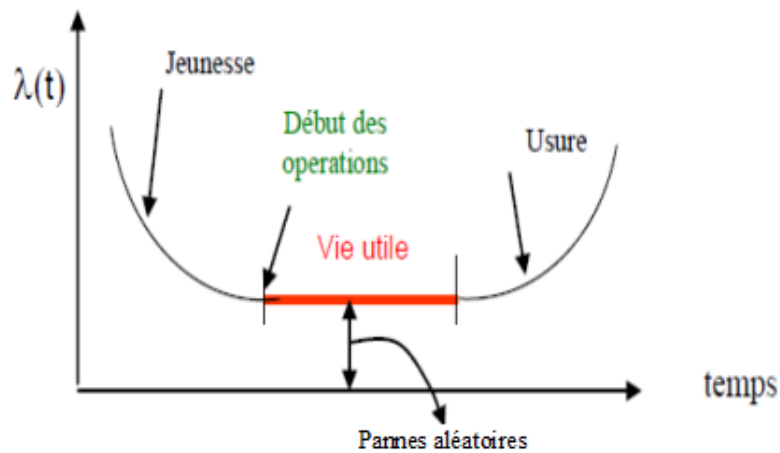


**Figure I.2** Les différents processus de dégradation des pièces [29]

L'objectif de la maintenance peut consister, entre autres, à diminuer le nombre de défaillances touchant une machine. On s'intéresse donc plus particulièrement à la probabilité d'apparition de ces défaillances sur la durée de vie de la machine. Cette probabilité, ou taux de défaillance, évolue souvent suivant une courbe en baignoire (figure I.3) principalement pour les équipements électromécaniques.

Le taux de défaillance  $\lambda(t)$  indicateur de la fiabilité (exprimé en pannes par heure), peut être obtenu à partir des retours d'expériences, la vie des équipements se divise en trois phases:

- phase de jeunesse :  $\lambda(t)$  décroît rapidement.
- Phase de maturité :  $\lambda(t)$  est pratiquement constant.
- Phase de vieillesse :  $\lambda(t)$  croît rapidement.



**Figure I.3** Courbe d'évolution du taux de défaillance [30]

La première phase dite de jeunesse montre qu'une nouvelle machine a une probabilité élevée de défaillance, en raison des défauts de conception ou de fabrication (pièces viciées au départ), de réglage, on n'applique que la maintenance corrective. Cette phase est caractérisée par un taux de défaillance décroissant en fonction du temps. C'est le cas de rodage en mécanique exemple des véhicules et le déverminage en électronique exemple des cartes électroniques.

La deuxième phase appelée maturité est caractérisée par un taux de défaillance presque constant, la probabilité de défaillances est très basse. C'est la période de vie utile dont laquelle on peut appliquer la maintenance préventive, systématique ou corrective.

Quand à la troisième phase de vieillesse, appelée aussi phase d'usure ou de fatigue, le taux de défaillance est croissant et la probabilité de panne augmente brusquement à cause du vieillissement des composants et l'usure des matériaux. Dans cette phase on peut appliquer la maintenance conditionnelle ou prédictive.

### I.3- Causes de défaillance du système

La cause de la défaillance, est une anomalie initiale susceptible de conduire au mode de défaillance. Elle s'exprime en termes d'écart par rapport à la norme (sous dimensionnement, absence de joint d'écrou, manque de lubrifiant, etc.). Le changement d'état du système suit un processus initié par la cause de défaillance. Le

système en état de fonctionnement contribue à l'obtention de la valeur ajoutée à partir d'une matière d'œuvre entrante et de données de contrôle (énergie, conditions d'exploitation, de conduite et de réglages, maintenance).

L'état de dysfonctionnement du système se manifeste par une erreur sur la valeur ajoutée. Une augmentation des déchets, un affichage de messages de défauts, effet de défaillance sur le système : panne, non qualité, cadence réduite, accident, etc.

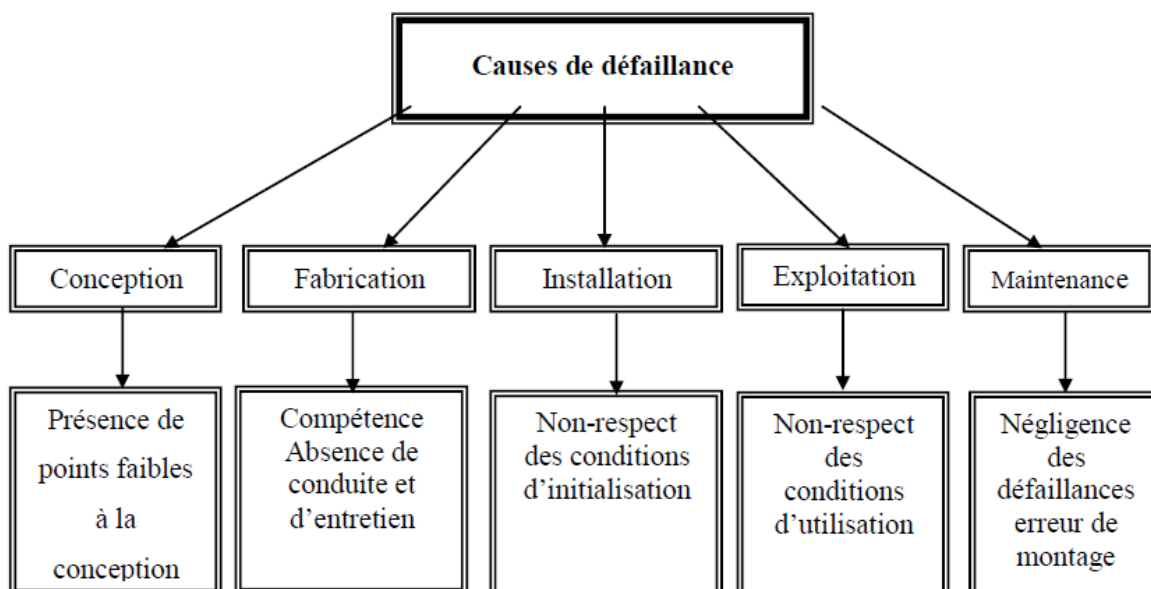
### I.3.1- Causes externes

- Matière d'œuvre (absente, non conforme)
- Energie (absente, non conforme)
- Conditions d'exploitation : conduite et réglage non conformes
- Maintenance (absente, non conforme)
- Perturbation (environnement).

### I.3.2- Causes internes

Les éléments du système (composants, liaisons).

Les causes internes au système sont des éléments du système remplissant une fonction. Alimenter en énergie, traiter les informations et assurer la sécurité sont des fonctions communes. La défaillance de l'une de ces fonctions entraîne la défaillance des autres fonctions. La figure I.4 montre d'une manière générale les causes de défaillance d'un élément (entité isolée).



**Figure I.4** Causes de défaillance [30]

## **I.4- Modes de défaillances**

Un mode de défaillance est la manifestation d'un type de défaillance pour un matériel donné. C'est la façon par laquelle est constatée l'incapacité d'un bien à remplir une fonction requise. C'est donc le processus qui, à partir d'une cause intérieure ou extérieure, entraîne la défaillance du bien considéré. Le mode de défaillance est relatif à une fonction.

De façon très générale, un mode de défaillance a un des quatre effets suivants sur un système :

1. Fonctionnement prématuré ;
2. Ne fonctionne pas au moment prévu ;
3. Ne s'arrête pas au moment prévu ;
4. Défaillance en fonctionnement.

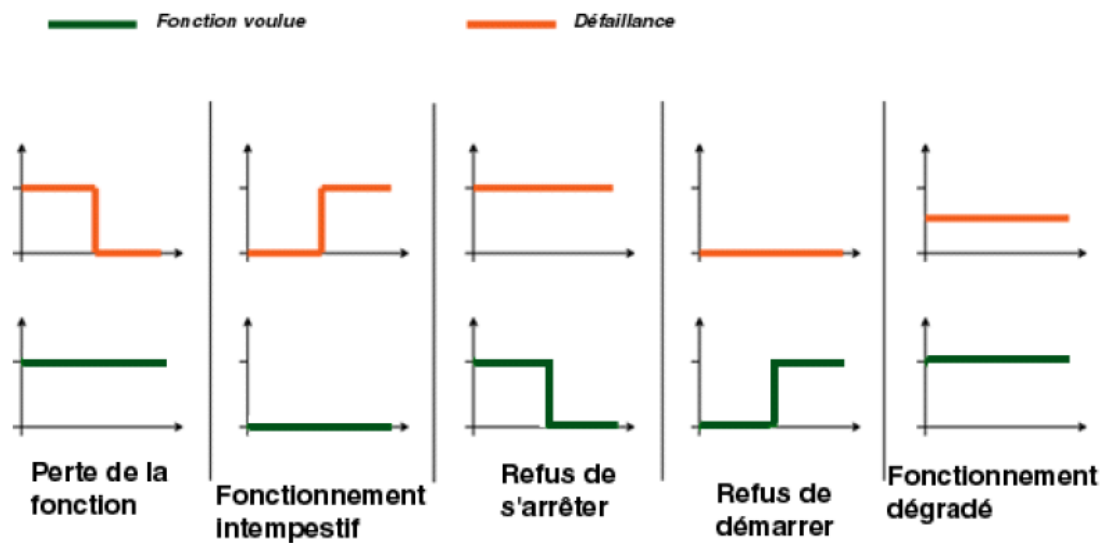
Il est cependant impossible d'effectuer une analyse concluante en vue d'un diagnostic avec une liste aussi généraliste. Il est donc nécessaire de développer cette liste, et surtout le point n°4 relatif aux défaillances en fonctionnement.

Pour les six domaines technologiques (mécanique, électrotechnique, électromagnétisme, hydraulique, thermodynamique, chimie), on recense plus d'une centaine de mode de défaillance en fonctionnement spécifiques et propres à chacune de disciplines.

Un mode de défaillance s'exprime donc par la manière dont un système viendra à ne plus remplir sa fonction. Il s'exprimera en termes physiques : rupture, desserrage, coincement, court-circuit, etc.

### **I.4.1- Modes génériques de défaillance :**

Il existe 5 modes génériques de défaillance, figure I.5 :



**Figure I.5** Modes génériques de défaillance (AMDEC ,2004)

Chacun des types de défaillances se produit dans des conditions particulières. Toutes ces défaillances ont, la plupart du temps, plusieurs causes. Mais l'analyse de l'importance, des conséquences et de la rapidité de manifestation aide à construire un diagnostic.

La norme a retenu une liste de 33 modes de défaillance génériques qui décrivent de façon suffisamment précise les défaillances de tout élément quel qu'il soit. Ces modes de défaillances sont généralement utilisés lors d'analyse AMDEC.

Les modes de défaillance sont la conséquence d'interactions entre 7 paramètres d'influence :

Matière, Milieu, Conception, Réalisation, Montage, Exploitation, Maintenance

Il est donc indispensable de prendre en compte ces interactions lors de l'analyse d'une défaillance afin de proposer le meilleur remède pour que le phénomène ne se reproduise plus.

Selon la norme (AFNOR X60-510), le tableau I.1 résulte les modes de défaillances.

| N° | Modes des défaillances  |
|----|---|
| 01 | Défaillance structurelle ou rupture   |
| 02 | Blocage physique ou coincement  |
| 03 | Vibration   |
| 04 | Ne reste pas en position  |
| 05 | Ne s'ouvre pas  |
| 06 | Ne se ferme pas   |
| 07 | Défaillance en position ouverte   |
| 08 | Défaillance en position fermée  |
| 09 | Fuite interne   |
| 10 | Fuite externe   |
| 11 | Depasse la limite supérieure tolérée  |
| 12 | Est en dessous de la limite inférieure tolérée  |
| 13 | Fonctionnement intempestif  |
| 14 | Fonctionnement intermittent   |
| 15 | Fonctionnement irrégulier   |
| 16 | Indication erronée  |
| 17 | Ecoulement réduit   |
| 18 | Mise en marche erroné   |
| 19 | Ne s'arrête pas   |
| 20 | Ne démarre pas  |
| 21 | Ne commute pas  |
| 22 | Fonctionnement prématuré  |
| 23 | Fonctionnement après le délai prévu (retard)  |
| 24 | Entrée erronée (augmentation)   |
| 25 | Entrée erronée (diminution)   |
| 26 | Sortie erronée (augmentation)   |
| 27 | Sortie erronée (diminution)   |
| 28 | Perte de l'entrée   |
| 29 | Perte de la sortie  |
| 30 | Court circuit (électrique)  |
| 31 | Circuit ouvert (électrique)   |
| 32 | Fuite (électrique)  |
| 33 | Autre conditions de défaillance exceptionnelle suivant les caractéristiques du système, les conditions de fonctionnement et les contraintes opérationnelles |

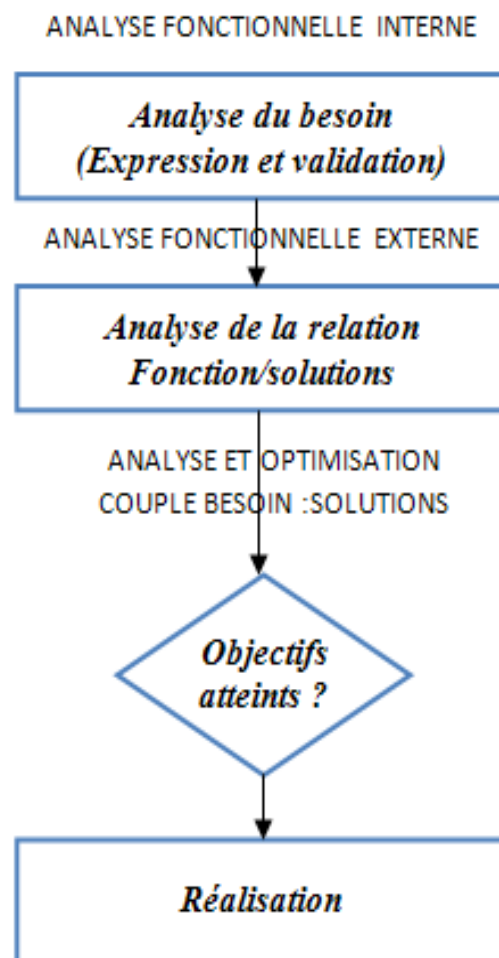
Tableau I.1 : Modes de défaillances [31]

## II.1 Analyse fonctionnelle interne

L'Analyse fonctionnelle interne permet de s'intéresser aux constituants du système appelés « solutions techniques » et de prévoir leurs degrés de performance dans la réalisation des fonctions de service et donc dans la satisfaction du besoin. (voir la figure II.1)

Elle privilégie le point de vue du concepteur, qui est chargé de concevoir un produit réel à partir d'un cahier des charges donné traduisant le besoin de l'utilisateur. Elle utilise deux outils de description :

- Le diagramme F.A.S.T. (Function Analysis System Technic),
- Le diagramme S.A.D.T. (Structured Analysis and Design Technic) [32].



**Figure II.1** Etapes d'analyse fonctionnelle

L'utilisation des méthodes d'analyse fonctionnelle pour décrire le fonctionnement d'un processus industriel en cours de conception ou en fonctionnement est indispensable dans le monde industriel. Cette décomposition nous permet d'identifier les différents modes de défaillances et leurs conséquences sur les objectifs opérationnels retenus pour l'installation ou l'équipement.

## II.2 -La méthode FAST

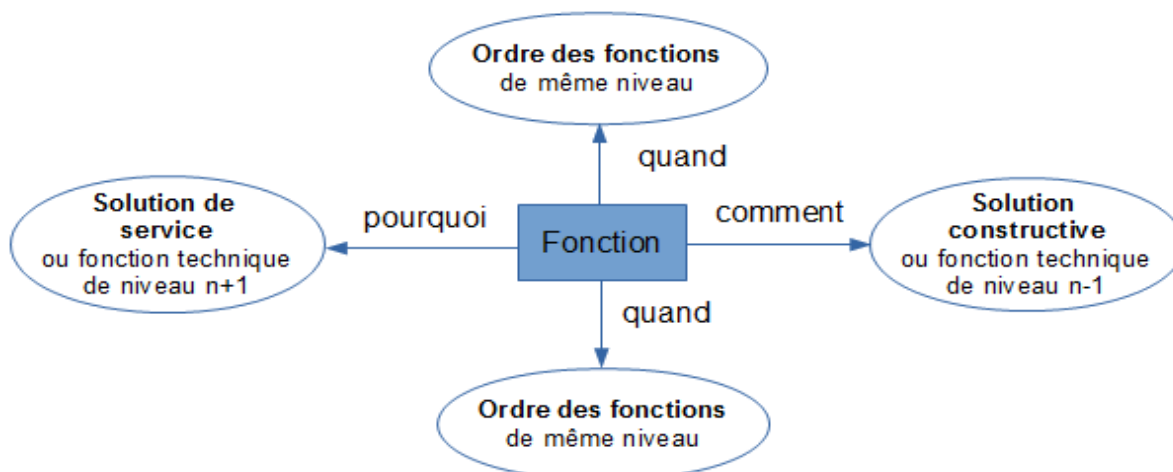
### II.2.1-Principe

Le diagramme FAST (Function Analysis System Technic) permet de traduire chacune des fonctions de service en fonction(s) technique(s), puis matériellement en solution(s) techniques(s).

Il se construit de gauche à droite, dans une logique du pourquoi au comment.

Dès lors que les fonctions de services sont identifiées, cette méthode les ordonne et les décompose logiquement pour aboutir aux solutions techniques de réalisation.

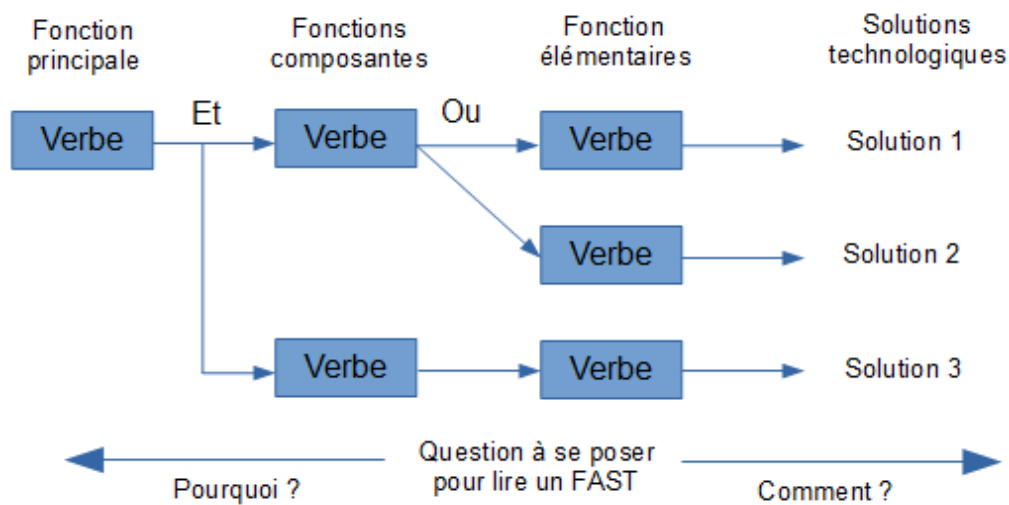
Le diagramme FAST constitue alors un ensemble de données essentielles permettant d'avoir une bonne connaissance d'un produit complexe et ainsi de pouvoir améliorer la solution proposée (voir la figure II.2) [32].



**Figure II.2** Principe de diagramme FAST

### II.2.2- Schématisation

La Figure II.3 présente une convention de schématisation du diagramme FAST



**Figure II.3** Convention de schématisation du diagramme FAST

La méthode s'appuie sur une technique interrogative. En partant d'une fonction principale, elle présente les fonctions dans un enchaînement logique en répondant aux trois questions :

**Pourquoi ?** pourquoi une fonction doit-elle être assurée ? (suivant l'axe horizontal orienté vers la gauche)

Accès à une fonction technique d'ordre supérieur, on y répond en lisant le diagramme de droite à gauche.

**Comment ?** comment cette fonction doit-elle être assurée ? (suivant l'axe horizontal orienté vers la droite).

On décompose alors la fonction, et on peut lire la réponse à la question en parcourant le diagramme de gauche à droite

**Quand ?** Quand cette fonction doit-elle être assurée ? (suivant un axe vertical orienté Vers le bas). Recherche des simultanés, qui sont alors représentés verticalement.

La figure II.4 montre un exemple de diagramme FAST pour un aspirateur [32].

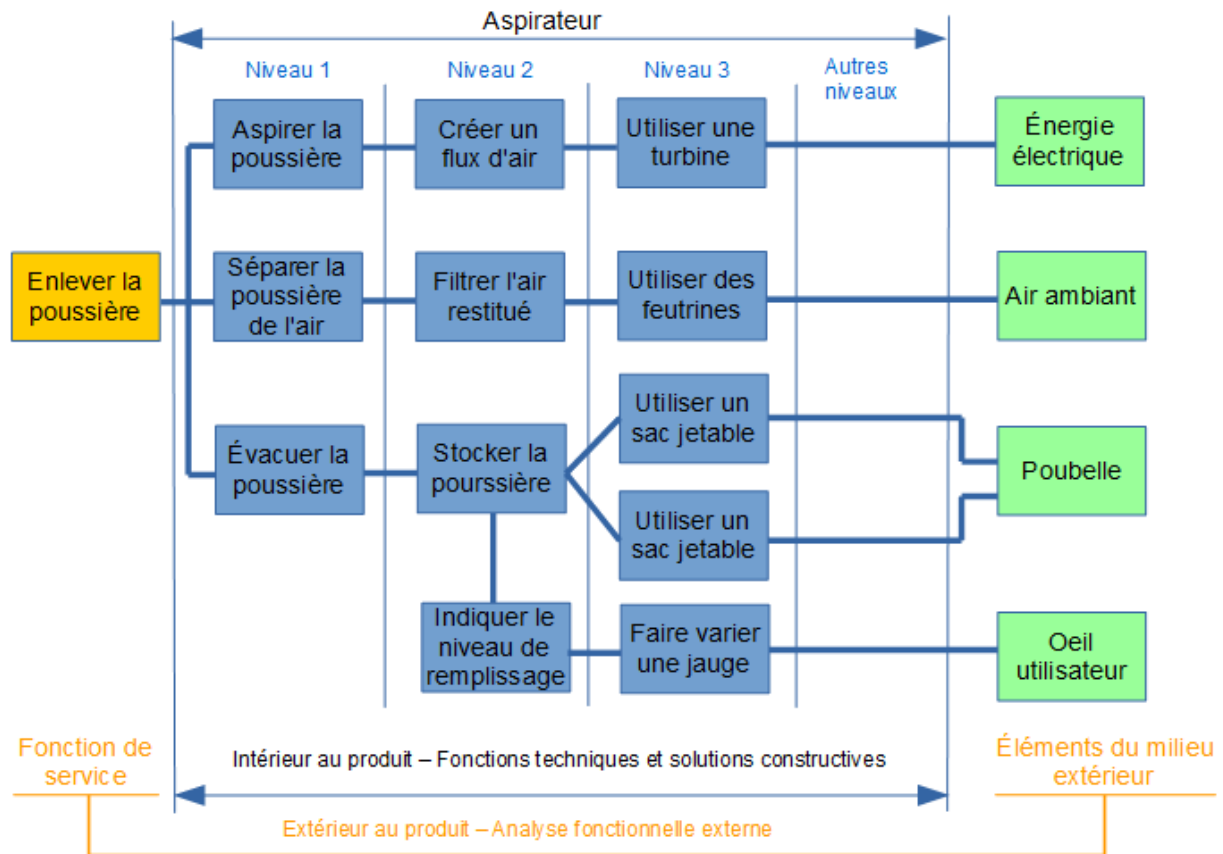
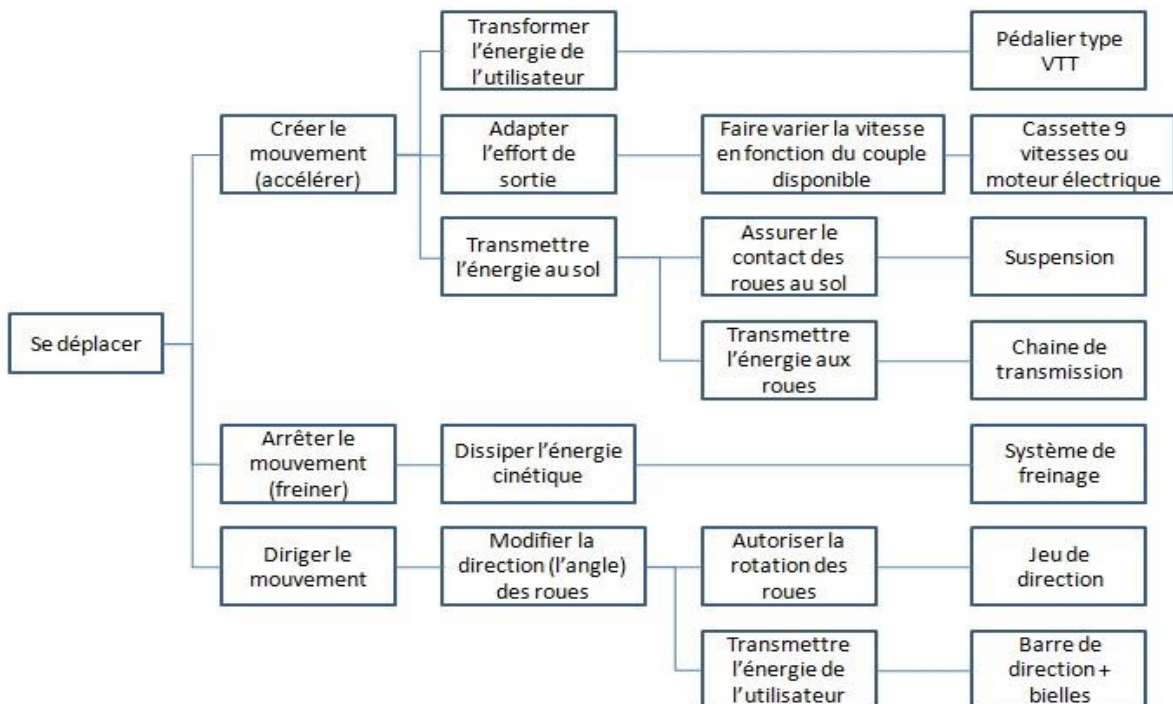


Figure II.4 Exemple de diagramme FAST pour un aspirateur



## II.3-La méthode SADT

### II.3.1-Définition

SADT : Structured Analysis and Design Technic (Technique Structurée d'Analyse et de modélisation des Systèmes).

Il s'agit d'un outil d'analyse descendante d'un système, qui permet une étude progressive : du global, vers le détail. La méthode appliquée industriellement est un outil de communication entre des personnes d'origines différentes. Il permet la description dans un langage commun, c'est la vision de synthèse qu'ils ont d'un même projet [32].

SADT est une méthode ou bien un langage de modélisation graphique, développé pour être utilisé dans les études de fabrication assistée par ordinateur des forces aériennes américaines en 1970. [33]

La méthode SADT a été mise au point aux états unis en 1977 par Doug Ross pour la société Softech. Baptisée à l'origine IDEF0 (en anglais Integration Definition for Function Modeling).

Elle permet de décrire des systèmes ou objet technique complexes par l'étude :

- Des actions qu'ils exercent sur leur environnement .
- De leur organisation fonctionnelle et structurelle [32].

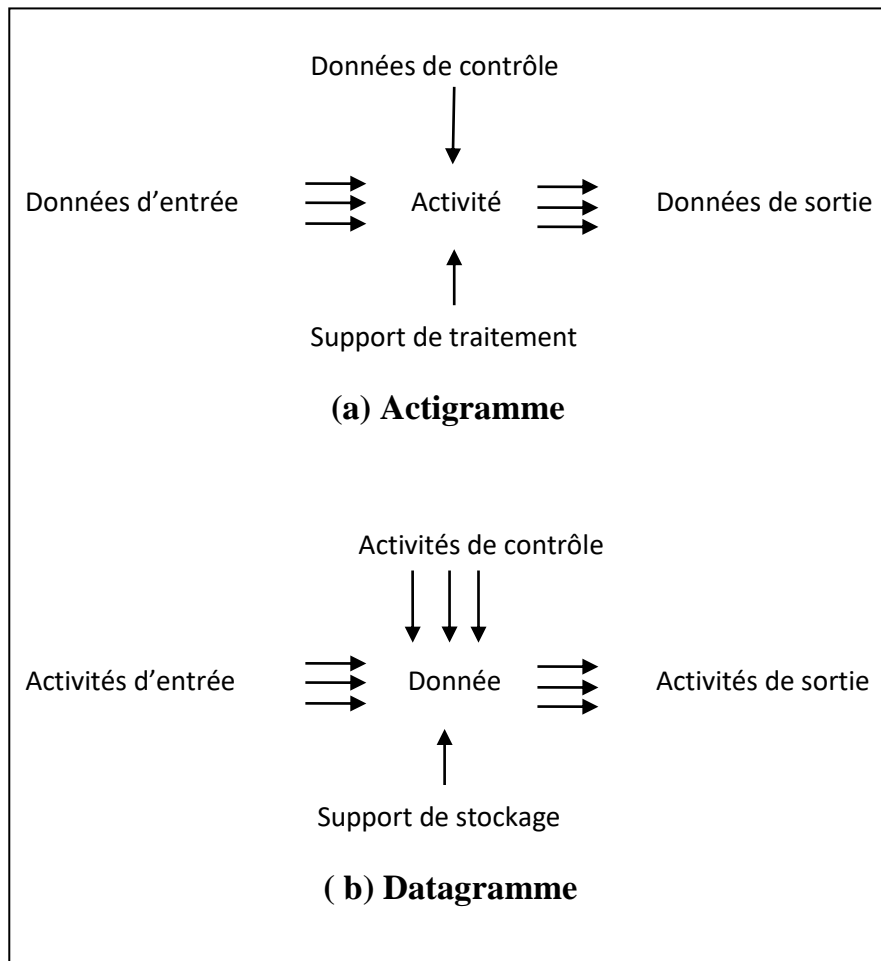
C'est une méthode de communication entre les spécialistes, elle permet l'analyse et la conception des systèmes importants et complexes. Elle est réalisée pour [34]:

- Conception structurée des systèmes vastes ou complexes ;
- Communication claire et précise des résultats de l'analyse et de la conception;
- Contrôle de l'exactitude, la cohérence et, de façon générale, la qualité de manière continue et systématique par des procédures particulières de critiques et d'approbations.

Le « langage » SADT est composé de diagrammes (actigrammes et datagrammes) obtenus par raffinements successifs et organisés en hiérarchie. Plus concrètement, il s'agit de boîtes et de flèches utilisées pour représenter les activités et les données.

Les *actigrammes* pour présenter la transformation des données d'entrées en données de sorties selon certaines contraintes en utilisant certains moyens ou supports

Les *datagrammes* représentent des données générées par des fonctions en entrée et utilisées par des fonctions en sortie, sous la surveillance des activités de contrôle (voir la figure II.5)



**Figure II.5** Boîtes SADT : (a) Actigramme, (b) Datagramme

Pour faciliter l'étude, on se base sur une modélisation qui se fait à partir d'un outil graphique composé de :

- Diagramme d'activité (ou actigramme) voir la figure II.6

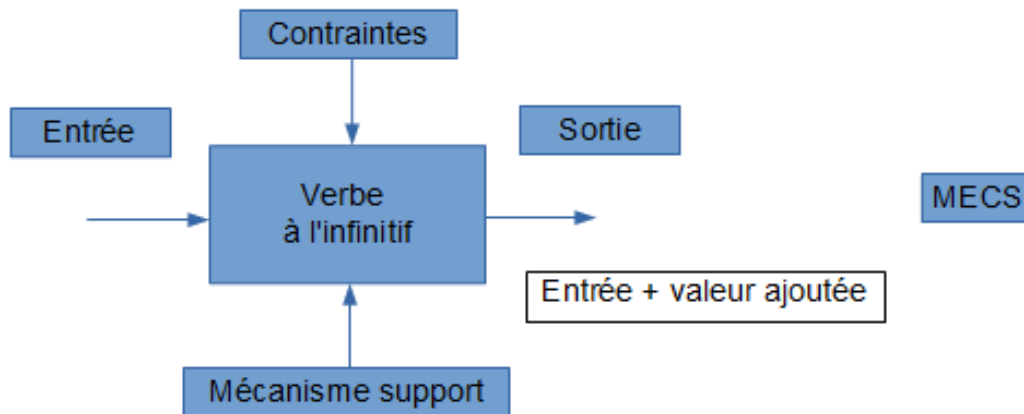
Les actigrammes sont définis par :

Les entrées : SUR QUOI agit la fonction ?

Les sorties : QUE DEVIENNENT les entrées, après réalisation de la fonction ?

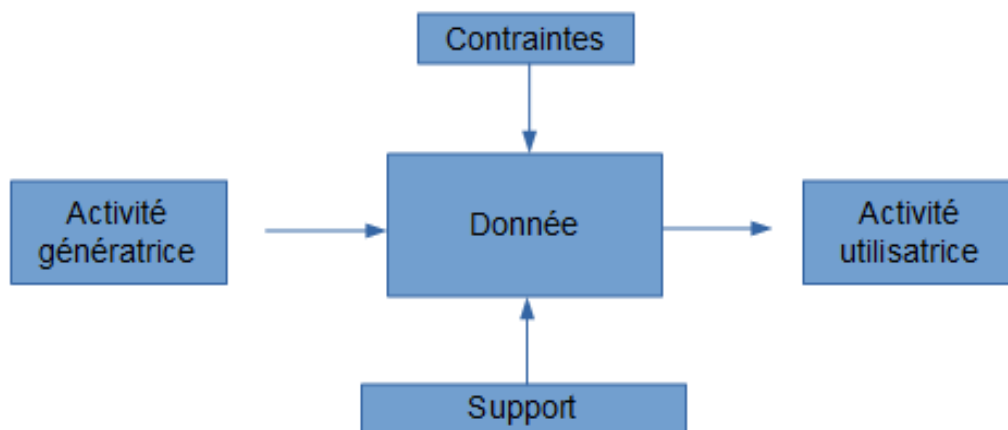
Les contraintes de pilotage : éléments qui paramètrent et modulent la fonction.

Les moyens (support d'activités) : c'est la réponse à la question : QUI réalise la fonction ? [32].



**Figure II.6** Méthodologie SADT

- Diagramme de données (ou datagramme) voir la figure II.7



**Figure II.7** Datagramme SADT

**Remarque :**

La méthode S.A.D.T. est assez lourde, elle est principalement utilisée dans le domaine du génie logiciel, et de ce fait bien adaptée à la spécification fonctionnelle de la partie

commande d'un système. Elle est puissante, donc valable pour de très gros systèmes, et s'applique difficilement sur de petits systèmes ou à la description très fine des fonctions. Elle n'intègre pas l'aspect temporel.

## Intoduction

Pour estimer la gravité, le type et la nature des pannes, qui sont utiles pour les tâches de diagnostic, l'identification des pannes est une tâche importante pour le pronostic des pannes ou pour une maintenance éventuelle.

Un outil industriel d'analyse des défaillances tel que AMDE (Analyse des modes de défaillances et leur effet) et son extension AMDEC (Analyse des modes de défaillances, leur effet et leur criticité) fournissent une masse importante d'informations sur les modes de défaillances, leur effet et impact sur le système ainsi que la probabilité de ces modes , où il ya la possibilité d'occurrence de nouvelles anomalies. Le système de diagnostic des pannes doit être capable de détecter l'occurrence de nouvelle panne ce qui est traduite par la notion de rejet en distance.

### III.1-Les questions préalables à l'AMDEC

Pourquoi travailler de manière préventive ? Les raisons les plus judicieuses sont : Parce que la prévention fait partie intégrante de votre culture, Ou bien parce que vous souhaitez que la prévention devienne une priorité pour votre organisation, Ou encore, pour satisfaire vos clients et livrer des produits répondant toujours mieux à leurs attentes, avec un prix de revient en diminution. Les moins bonnes raisons pourraient être :

- Parce que vos clients industriels l'exigent.
- Parce que les normes vous le demandent.

La contrainte donne rarement de bons résultats, même s'il faut bien commencer un jour à utiliser un outil pour n'en percevoir, parfois, les avantages que des années plus tard. Entre temps, combien de mauvaises habitudes seront prises, pour certaines de manière irrémédiable. Dans le pire des cas, les mauvaises habitudes masqueront les avantages, et l'AMDEC sera rangée au placard des outils qui n'auront pas rendu les services que l'on attendait d'eux [35].

### **III.1.1- Que peut apporter l'AMDEC à une organisation ?**

Deux notions étroitement liées répondent à cette question :

- La structuration d'une démarche préventive ;
- Une dynamique performante pour des équipes de travail.

La prévention tout d'abord est l'exigence du consommateur désireux de produits toujours plus sûrs, et celle des organisations toujours plus concernées par l'innocuité des produits mis sur le marché. Il s'agit d'un travail d'équipe dans l'organisation, mais également avec ses partenaires, motivés par un même désir de satisfaire le consommateur. Le nombre d'acteurs croissant dans nos activités nous oblige, de plus en plus, à utiliser des méthodes de travail facilitant la mise en commun des informations. La méthode qui s'impose aujourd'hui en matière de prévention est l'AMDEC, sous ses différentes formes. L'AMDEC est également un des outils de l'amélioration continue [35].

### **III.1.2- Ce que l'AMDEC ne peut pas apporter**

L'AMDEC n'est pas une méthode de résolution de problèmes. Elle aide à poser les « bonnes » questions, pour rechercher les problèmes potentiels. Dans cette recherche méthodique, certains des problèmes listés seront des problèmes avérés, c'est inévitable. En dehors de ce constat, nous pouvons dire que vous n'êtes pas en présence d'une méthode de résolution de problèmes.

De nombreuses fois, dans les organisations pour lesquelles nous sommes intervenus, nous avons entendu des phrases du type : « Pour résoudre ce problème, faites-moi une AMDEC ! ». Cette phrase peut d'ailleurs être prononcée par le représentant du client lui-même [35].

### **III.1.3 Qui est concerné par l'AMDEC ?**

Tous ceux qui ont des clients à satisfaire, et qui veulent minimiser la prise de risque ! Par exemple, les industriels qui souhaitent reproduire des objets à des centaines, des milliers, voire, des millions d'exemplaires sont parmi les plus grands utilisateurs.

L'AMDEC est décrite comme une méthode utilisée par les industriels de l'automobile, mais ceux qui ne réaliseront qu'une pièce, en travaillant plusieurs mois (et n'ont aucun droit à l'erreur), n'ont-ils pas intérêt, encore plus que les autres, à ne pas se tromper ? Il est évident que l'artisan n'écrit pas une AMDEC avant de réaliser un produit unique, mais son expérience lui tient lieu d'AMDEC.

La différence essentielle réside dans le fait qu'il peut assumer seul, toutes les tâches de son travail. Lorsqu'une activité suppose l'intervention de plusieurs personnes pour un même projet, l'AMDEC se justifie pleinement, que cela soit pour assurer un produit ou un service qui satisfera l'utilisateur [35].

### **III.1.4 Qui n'a jamais fait d'AMDEC ?**

Aussi surprenante que puisse paraître la réponse, nous serions tentés de dire : personne ! Dans vos actions quotidiennes, vous vous posez régulièrement la question : « Si je fais ça, qu'est-ce qui pourrait aller mal ? » Aussi fugitive soit cette question, la réponse apparaît, au moins, quelques dixièmes de secondes à la conscience de ceux qui agissent. Bien sûr, vous n'êtes pas habitués à formaliser les réponses par écrit, ni à lister de manière systématique « ce qui pourrait aller mal lorsque vous percez un trou dans le mur de la salle à manger pour accrocher un tableau ».

Certains parmi vous font de l'AMDEC depuis toujours, dans le cadre de leur travail, mais s'ils appliquent la logique que nous allons détailler, c'est souvent seuls et sans la méthodologie qui s'y rapporte. Cette réflexion revient souvent en formation à l'AMDEC : « Je me suis toujours posé ces questions ! ». Notre réponse est que nous ajoutons ici une méthodologie qui fonctionne et qui vous permettra de créer un langage commun, à l'intérieur de l'organisation dans vos groupes de travail, mais aussi vis-à-vis de vos clients, fournisseurs ou sous-traitants.

Cette dimension de méthode partagée vous obligera à une rigueur certaine, en partageant des règles du jeu et un mode de raisonnement. De plus, vous formaliserez vos connaissances par écrit. Ce travail supplémentaire est considéré comme superflu par certains qui ne voient dans l'AMDEC qu'une perte de temps. Mais les plus

nombreux comprennent vite l'opportunité d'avoir dans chaque organisation une expérience écrite, qui sera plus facilement partageable [35].

### III.2- L'historique de l'AMDEC

À l'origine était l'analyse de problèmes potentiels, le format générique qui permettait de travailler sur toute planification et d'identifier ce qui aurait pu aller mal. Cette logique de base a été reprise, puis spécialisée pour des produits, procédé, machines, et services.

Elle fut d'abord utilisée dans les années 1950 par l'industrie aérospatiale et militaire américaine pour identifier les caractéristiques de sécurité, sous le nom de Failure Mode and Effects and Criticality Analysis (FMECA ou FMEA). L'AMDEC fut pratiquée en France à partir des années 1960-1970, en premier lieu par les ingénieurs fiabilistes. Puis de grands groupes rédigèrent des manuels d'application de l'AMDEC (ou de la FMEA), et certains se donnèrent l'obligation, ainsi qu'à leurs fournisseurs, d'utiliser cet outil de prévention (par exemple Ford dans le référentiel Q 101, à partir de 1986).

Certains constructeurs automobiles français utilisaient l'AMDEC depuis déjà une vingtaine d'années. Des techniques d'analyse de problèmes potentiels spécialisées, en fonction du sujet traité, ont aussi donné la logique HACCP (Hazard Analysis Critical Control Point, ce qui se traduit en français par : analyse des dangers points critiques pour leur maîtrise), pour des applications agroalimentaires.

D'autres dénominations telles que HAZOP (Hazard and Operability Analysis), sont encore des déclinaisons d'une même logique d'analyse de problème potentiel. Certains parlent aussi d'AMDE, qui se veut une version simplifiée de l'AMDEC, puisqu'elle ne fait pas intervenir l'outil de détermination de priorité. Les Anglo-saxons semblent utiliser indifféremment les termes FMEA ou FMECA pour désigner une même pratique.

Nous ne faisons aucune différence entre FMEA (FMECA), ou AMDEC, il s'agit de sigles désignant la même pratique, en anglais ou en français. Néanmoins, nous nous

attacherons à utiliser le sigle français, comme il se doit, tout au long de cet ouvrage. La situation actuelle est la suivante :

- Une grande majorité des constructeurs automobiles font des AMDEC, et les exigent de leurs fournisseurs
- Un grand nombre est utilisé sous forme d'analyse de risque, parent proche de l'AMDEC.
- Une norme NF X 60-510 « Techniques d'analyse de la fiabilité des systèmes
- Procédure d'analyse des modes de défaillances et de leurs effets (AMDE) » a été publiée en décembre 1986. Cette norme ne traite pas de la définition de la criticité, elle évoque simplement la possibilité de faire un calcul si on souhaite déterminer des priorités.
- La série des normes ISO 9000 (version 2000), qui met l'accent sur l'organisation d'un système de management de la qualité qui s'améliore de manière continue, recommande de montrer que l'organisation sait travailler de manière préventive, avec méthode.

Dans ce cadre d'amélioration continue, l'AMDEC est un des outils de base de la prévention et de l'amélioration continue [35].

### III.3 - Les définitions de base AMDEC :

Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité, en version française. FMEA : Failure Mode and Effects Analysis en version anglaise, ou FMECA en ajoutant Criticality au sigle initial.

Les Anglo-saxons écrivent la majorité du temps « potential FMEA », ce que nous ne retrouvons pas en français, mais qui insiste bien sur l'idée que l'AMDEC est une analyse de problème potentiel et non pas une analyse de problème avéré. Cet ajout systématique au sigle de base permettrait peut-être d'éviter cette confusion.

Pour avancer dans les définitions, il nous semble utile de synthétiser le travail AMDEC de la manière suivante : quatre questions nous suffisent pour vous donner une première approche de la logique suivie et pour vous aider à comprendre que

l'AMDEC est une façon de penser, une méthode de travail, et non un formulaire à remplir [35].

### III.3.1 Les mesures de secours

Elles visent à diminuer les conséquences d'un accident. Dans notre exemple, même s'il est indispensable de mettre en place ces mesures de secours avant l'accident, leur utilité ne se fait sentir que lorsque le problème s'est produit (par exemple : les renforts latéraux de portières qui diminueront, dans le cas de chocs latéraux, la gravité des blessures des passagers du véhicule).

Ces mesures de secours n'ont aucune incidence sur la probabilité d'apparition du problème. Vos renforts latéraux de portières ne vous permettront pas d'éviter un accident. Nous dirons, avec notre vocabulaire AMDEC, que les mesures de secours diminuent la gravité des effets lorsqu'un problème est apparu. Notre vocabulaire AMDEC s'enrichit :

- Le problème potentiel que nous appellerons mode de défaillance potentielle doit être identifié pour pouvoir penser à des mesures de secours, avant de livrer le produit ou le service. La recherche des modes de défaillance potentielle est une des premières justifications de l'AMDEC.
- Les effets qui seront les conséquences du problème ou du mode de défaillance potentielle envisagé, effets que vous rechercherez de manière systématique dans vos AMDEC. Ils pourront être directs ou indirects, immédiats ou différés. Ces effets sont eux aussi à identifier afin d'apporter des réponses adaptées.
- Les mesures de secours qui diminueront la gravité des effets, et qu'il faudra définir le plus tôt possible, mais seulement si elles sont jugées nécessaires lors de l'AMDEC, comme nous le verrons par la suite. Le principe de l'anticipation permettra de mettre en place les mesures de secours rapidement en cas de besoin.
- La gravité des effets, où vous tenterez de donner l'importance relative des effets, afin de comprendre si un risque (un effet) est acceptable, ou si au contraire les mesures de secours (ou préventives), s'imposent. Cette cotation

des effets vous aidera à dimensionner la réponse en fonction de la gravité des effets identifiés.

- Les actions de contrôle qui permettront de savoir, le moment venu, s'il est nécessaire de déclencher une mesure de secours. Leur efficacité sera, elle aussi, jugée lors de nos AMDEC, par la cotation de la non-détection [35].

### III.3.2 Les mesures préventives

Elles visent à éviter l'accident, elles agissent sur les causes des accidents (par exemple : le système de freinage avec antiblocage des roues, type ABS, qui pourra vous aider à éviter les obstacles, lors d'un freinage d'urgence, en vous permettant de conserver la possibilité de diriger le véhicule...). Nous dirons avec notre vocabulaire AMDEC que les mesures préventives diminuent la probabilité d'apparition, ou bien encore l'occurrence du problème potentiel, en agissant sur les causes. Notre vocabulaire AMDEC s'enrichit de nouveau :

Le problème potentiel, que nous appellerons mode de défaillance potentielle qui doit être identifié pour pouvoir mettre en œuvre des mesures préventives. C'est la mission prioritaire de l'AMDEC.

Les causes à l'origine du mode de défaillance potentielle, sur lesquelles agissent les mesures préventives. Leur identification sera indispensable à la mise en œuvre de ces mesures préventives.

Les mesures préventives que vous générerez lors de l'élaboration des plans d'actions, et qui auront pour mission de diminuer la probabilité d'apparition des modes de défaillance potentielle, en agissant sur les causes identifiées. Le cœur de la méthode que nous allons décrire.

La probabilité d'apparition, ou encore occurrence des modes de défaillance potentielle, ou bien des causes (suivant le type d'AMDEC utilisé). Cette occurrence vous permettra de comprendre si les mesures préventives sont indispensables, ou au contraire si on peut imaginer de prendre le risque de voir apparaître ce mode de défaillance potentielle, et donc, se contenter de mesures de secours. Là encore l'AMDEC, au travers de sa partie détermination de priorité, vous sera d'une grande utilité pour vous aider à prendre la meilleure décision.

À partir de cet exercice d'introduction à la méthode AMDEC, plusieurs remarques s'imposent : Vous avez pu avoir des doutes sur le classement de certains équipements en « préventif » ou « secours ». Prenons des exemples : les ceintures de sécurité ne font que diminuer la gravité des effets lorsque le problème est apparu, il en est de même de la majorité des équipements que vous avez listés.

Ce constat amène une autre question : « Pourquoi n'avez-vous pas listé une majorité de mesures préventives ? » Ne pourrait-on pas imaginer de diminuer, à l'extrême, le nombre d'équipements de secours (et par conséquent arriver à diminuer le coût des véhicules, ainsi que leur poids), si les mesures préventives étaient exhaustives ?

Le raisonnement qui consisterait à penser que les mesures préventives mises en place vous permettent de vous passer de mesures de secours est bien sûr fallacieux, vous ne pourrez jamais tout prévoir, et pour cause(s) (!), il s'agit d'une des limites à l'anticipation de problème. Même avec l'AMDEC, on ne peut pas avoir la prétention d'identifier tous les risques de manière exhaustive, mais l'AMDEC vous aidera à rechercher, de manière systématique et formalisée, les modes de défaillance potentielle, puis les effets qui leur sont associés, et à identifier les causes.

À partir des priorités que vous aurez définies, vous mettrez en œuvre des actions qui pourront être, suivant les cas, préventives ou de secours. Enfin, l'AMDEC vous permettra, et ce n'est pas son moindre avantage, de vous aider à juger de la pertinence et de l'efficacité de ces actions proposées [35].

### **III.4 La détermination des priorités**

S'ajoutent à nos quatre questions de base les questions de détermination de priorité qui viendront aider le groupe à trier les préoccupations, à savoir ce qui est important, et ce qui l'est moins. Surtout, ces questions permettront de savoir par où commencer le travail.

Lorsque nous parlons de priorité, nous nous inscrivons dans la logique d'amélioration continue, et à ce titre l'AMDEC est un outil de base puisqu'elle vous permettra de répondre aux questions : « Si je ne peux faire qu'une seule action,

laquelle faire ? Si je ne peux faire que deux actions, lesquelles ? » Mais comme on le conçoit aisément, ce travail d'amélioration devra se poursuivre. Vous déterminerez des priorités, en travaillant sur trois critères :

- La cotation de la gravité des effets, première hiérarchisation qui vous permettra de pondérer votre réponse en fonction des conséquences imaginées, pour chaque problème potentiel listé ;
- La cotation de la probabilité d'apparition, appelée aussi occurrence (uniquement à cause d'un manque de traduction évident, entre l'anglais et le français), afin d'estimer si le mode de défaillance potentielle risque de se produire, et à quelle fréquence ;
- La cotation de non-détection, qui vous permettra de juger de la capacité des actions de contrôle prévues à détecter l'apparition des problèmes.

La synthèse de ce questionnaire est réalisée par une cotation qui reprend les trois critères précédents après les avoir multipliés entre eux, afin de produire l'indice de priorité de risque (ou IPR en version française), appelé encore risk priority number (ou RPN en version anglaise), c'est aussi le « C » de la criticité du sigle AMDEC en français. Nous pouvons synthétiser cet outil de détermination de priorités par des questions. Toutes ces questions devront être assimilées par l'animateur AMDEC, afin de faire progresser le travail de son groupe. Nous détaillerons ce questionnaire pour chaque type d'AMDEC de manière séparée, mais nous pouvons déjà souligner quelques points dans cette présentation initiale :

- Les trois cotations : gravité, occurrence et non-détection sont attribuées par le groupe, à l'aide d'échelles à adapter impérativement en fonction des préoccupations et de l'organisme dans lequel se déroule l'AMDEC.
- Ces trois cotations ne sont intéressantes qu'en relatif, et n'ont pas de valeur dans l'absolu. Elles ne visent qu'à vous aider à classer les préoccupations entre elles, pour savoir par quoi commencer.
- Ces cotations doivent être attribuées indépendamment les unes des autres, autant que possible [35].

### III.5- Types d'AMDEC et définitions

#### III.5.1-Les Types

Il existe plusieurs types d'AMDEC:

- L'AMDEC-organisation s'applique aux différents niveaux du processus d'affaires du premier niveau qui englobe le système de gestion, le système d'information, le système production, le système personnel, le système marketing et le système finance, jusqu'au dernier niveau comme l'organisation d'une tâche de travail.
- L'AMDEC-produit ou l'AMDEC-projet est utilisée pour étudier en détail la phase de conception du produit ou d'un projet. Si le produit comprend plusieurs Composants, on applique l'AMDEC-composants.
- L'AMDEC-processus s'applique à des processus de fabrication. Elle est utilisée pour analyser et évaluer la criticité de toutes les défaillances potentielles d'un produit engendrées par son processus. Elle peut être aussi utilisée pour les postes de travail [36].
- L'AMDEC-moyen s'applique à des machines, des outils, des équipements et appareils de mesure, des logiciels et des systèmes de transport interne.
- L'AMDEC-service s'applique pour vérifier que la valeur ajoutée réalisée dans le service corresponde aux attentes des clients et que le processus de réalisation de service n'engendre pas de défaillances [37].
- L'AMDEC-sécurité s'applique pour assurer la sécurité des opérateurs dans les procédés où il existe des risques pour ceux-ci.

#### III.5.2- Les aspects de la méthode

L'aspect qualitatif de l'étude consiste à recenser les défaillances potentielles des fonctions du système étudié, de rechercher et d'identifier les causes des défaillances et d'en connaître les effets qui peuvent affecter les clients, les utilisateurs et l'environnement interne ou externe.

L'aspect quantitatif consiste à estimer le risque associé à la défaillance potentielle. Le but de cette estimation est l'identification et l'hierarchisation des

défaillances potentielles. Celles-ci sont alors mises en évidence en appliquant certains critères dont, entre autres, l'impact sur le client.

L'hierarchisation des modes de défaillance par ordre décroissant, facilite la recherche et la prise d'actions prioritaires qui doivent diminuer l'impact sur les clients ou qui élimineraient complètement les causes des défauts potentiels.

### **III.6- Les étapes de la méthode**

Il y a une phase préparatoire qui consiste en une collecte de données pour réaliser l'étude, la mise sur pied d'un groupe de travail et la préparation des dossiers, tableaux, logiciels (Fig III.1).

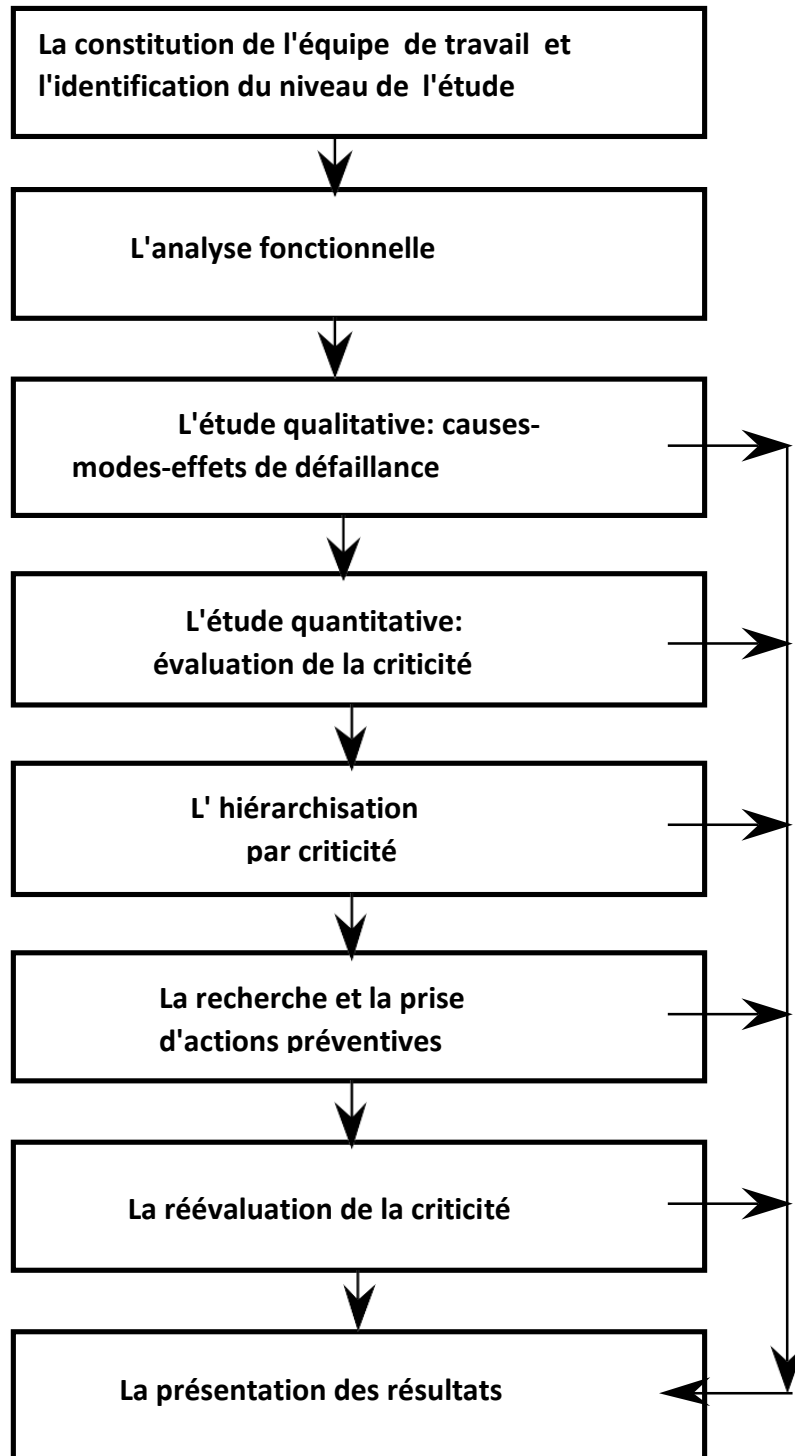
#### **III.6.1- La constitution d'un groupe de travail**

Il s'agit de constituer l'équipe multidisciplinaire qui réalise l'étude. Les personnes impliquées dans une étude AMDEC-processus, par exemple, représentent les services de recherche et développement, des achats, du marketing, de la maintenance, de la qualité, des méthodes et de la fabrication. La présence d'un animateur bien formé à des techniques spécifiques de la démarche et du travail en équipe est une condition de succès de l'application de la méthode.

Un exemple intéressant de la constitution d'une équipe AMDEC-produit est donné par la société Garrett Automotive Ltd (GAL). La société a été qualifiée comme l'un des meilleurs fournisseurs de Ford; elle a reçu le prix «Queens Award for Export» au Royaume-Uni. Cette entreprise a mis sur pied un programme d'enseignement de la qualité totale (Teaching Company Programme[38])incluant la méthode AMDEC. Chez Garrett, les membres d'une équipe AMDEC proviennent de différents services.

La préparation de l'AMDEC-produit est sous la responsabilité de l'ingénieur de produit. Avant la réunion de l'équipe, il prépare les six premières colonnes du tableau AMDEC (voir le tableau 1) : le numéro de chaque pièce, sa fonction, les modes de défaillance potentielle, les causes possibles, les effets potentiels, les vérifications courantes de conception. Au début de la réunion, l'équipe analyse chacun des éléments du document pour s'assurer que rien ne manque. Les autres membres d'équipe sont : Le représentant des ventes qui est l'interface entre l'entreprise et le client. Il fournit à l'équipe les informations nécessaires sur les besoins et attentes du client. Le

représentant du service qualité qui joue le rôle de facilitateur ou de coordonnateur et qui fait le lien entre toutes les étapes de la méthode. Il participe à la détermination des défaillances potentielles de conception durant le processus de production.



**Figure III. 1** La démarche AMDEC

L'ingénieur de fabrication est très influent au sein de l'équipe, particulièrement en ce qui concerne le développement de la conception et des procédés de fabrication. Les concepteurs sont parfois amenés à participer aux réunions de l'équipe, afin de fournir plus de détails au niveau de la conception et du changement de la conception ou pour connaître l'historique du produit.

Cette configuration des membres de l'équipe est similaire à celle de l'AMDEC-processus et n'est en aucune façon définitive. Il est toutefois important de préciser que les grandes équipes (dont le nombre des participants est supérieur à sept) sont moins efficaces que les petites (entre quatre et six participants). La clé du succès de l'équipe réside dans l'engagement total de ses membres et l'interaction entre ceux-ci [39].

| Fonction du produit, ou opération du processus | Mode d'une défaillance potentielle | Effet de la défaillance | Causes possibles de la défaillance | Évaluation |            |           | Actions préventives |        |           | Résultats  |           |                    |
|--|------------------------------------|-------------------------|------------------------------------|------------|------------|-----------|---------------------|--------|-----------|------------|-----------|--------------------|
|  |                                    |                         |                                    | Détection  | Occurrence | Criticité | Recommandées        | Prises | Détection | Occurrence | Criticité | Nouvelle criticité |
|  |                                    |                         |                                    |            |            |           |                     |        |           |            |           |                    |

Tableau 1

**Tableau III.1. AMDEC produit/processus**

AMDEC produit/processus

| Fonction du produit, ou opération du processus | Mode d'une défaillance potentielle | Effet de la défaillance | Causes possibles de la défaillance | Évaluation |            |           | Actions préventives |        |           | Résultats  |           |                    |
|--|------------------------------------|-------------------------|------------------------------------|------------|------------|-----------|---------------------|--------|-----------|------------|-----------|--------------------|
|  |                                    |                         |                                    | Détection  | Occurrence | Criticité | Recommandées        | Prises | Détection | Occurrence | Criticité | Nouvelle criticité |
|  |                                    |                         |                                    |            |            |           |                     |        |           |            |           |                    |

**Tableau III.2. AMDEC produit/processus**

**III.6.2- L'analyse fonctionnelle**

Une défaillance est la disparition ou la dégradation d'une fonction. Donc pour trouver les défaillances potentielles il faut connaître les fonctions.

Le but de l'analyse fonctionnelle est de déterminer d'une manière assez complète les fonctions principales d'un produit, les fonctions contraintes et les

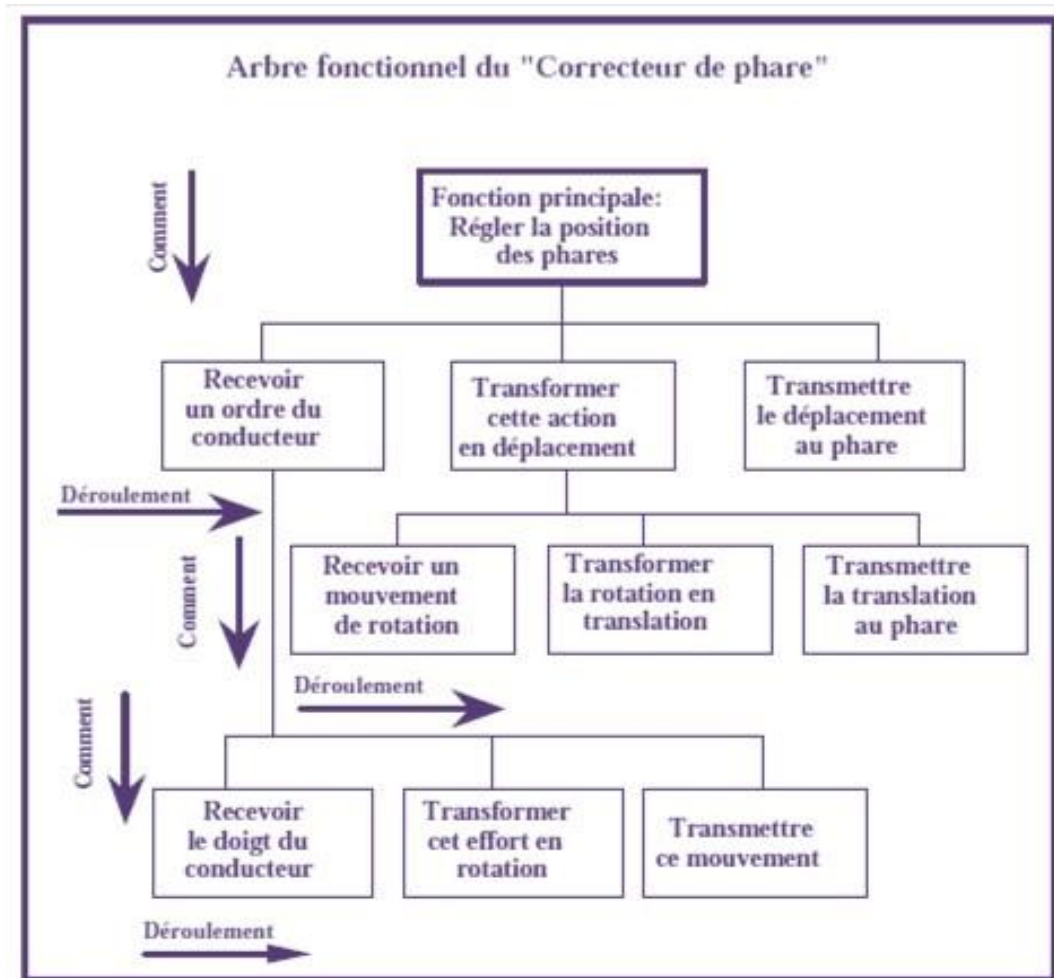
fonctions élémentaires.

- Les fonctions principales sont les fonctions pour lesquelles le système a été conçu, donc pour satisfaire les besoins de l'utilisateur.
- Les fonctions contraintes répondent aux interrelations avec le milieu extérieur.
- Les fonctions élémentaires assurent les fonctions principales, ce sont les fonctions des différents composants élémentaires du système.

Pour réaliser correctement l'analyse fonctionnelle il faut effectuer trois étapes principales

- Définir le besoin à satisfaire, le principe consiste à décrire le besoin et la façon dont il est satisfait et comment il risque de ne pas être satisfait.
- Définir les fonctions qui correspondent au besoin, chaque fonction répond à la question à quoi sert? La réponse doit comprendre un sujet et un verbe (ex: un rasoir rase, un couteau coupe). On peut alors déterminer la défaillance potentielle (le rasoir ne rase pas, le couteau ne coupe pas toujours).
- Définir les fonctions qui correspondent au besoin, chaque fonction répond à la question à quoi sert? La réponse doit comprendre un sujet et un verbe (ex: un rasoir rase, un couteau coupe). On peut alors déterminer la défaillance potentielle (le rasoir ne rase pas, le couteau ne coupe pas toujours).
- établir l'arbre fonctionnel afin de visualiser l'analyse fonctionnelle. Très souvent les fonctions principales comportent des sous-fonctions ou résultent d'un ensemble des fonctions élémentaires. D'où le besoin de l'arbre fonctionnel.

Celui-ci est une représentation sous forme de bloc-diagramme, construit en définissant les fonctions de niveau A- les fonctions principales jusqu'au niveau Z - les fonctions élémentaires des composants. On retrouve à tous les niveaux la logique: recevoir une fonction - transformer la fonction- transmettre une nouvelle fonction (voir la Fig III.2) [40].



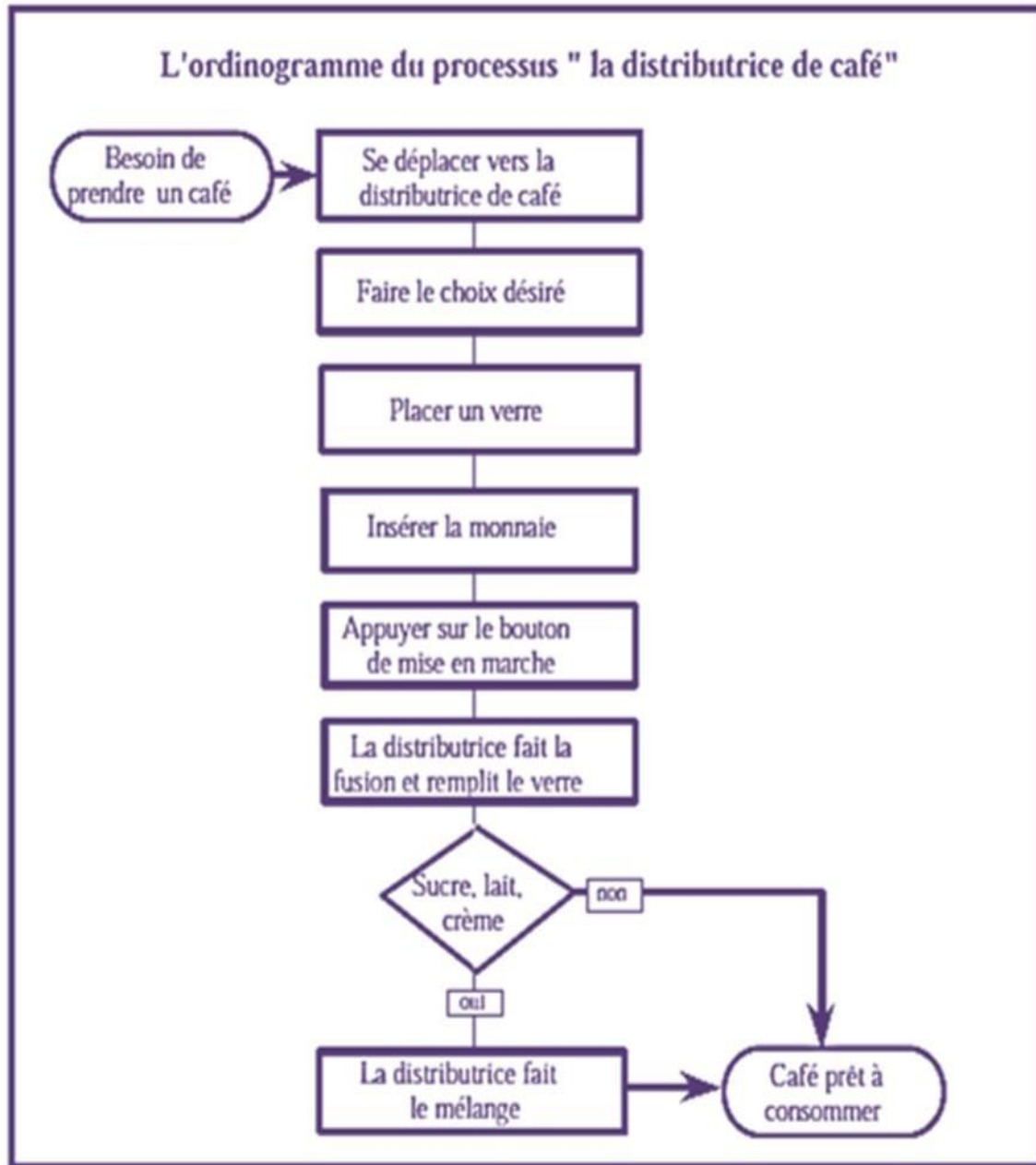
Tiré de «Méthodes et outils de la qualité totale», de P. Lyonnet,  
Édition Technique et Documentation, 2e édition, page 74

**Figure III.2** Arbre fonctionnel du correcteur de phare

D'après la norme militaire américaine pour l'AMDEC, un système (produit complexe) peut être décomposé en trois niveaux : système, sous-systèmes, composant. Ces appellations s'appliquent à la fois, à une décomposition matérielle et fonctionnelle [41].

En résumé, on décompose le système en plusieurs niveaux d'arborescence. Le niveau au sommet est le système, le niveau de base est le composant. C'est grâce à l'analyse fonctionnelle que l'on pourra établir la meilleure arborescence. L'AMDEC sera alors conduite à partir du niveau composant puis remontera aux divers étages de l'arborescence (approche bottom-up) [42].

Pour un processus, la décomposition fonctionnelle se fait en procédés. Pour un procédé, la décomposition se fait en opérations ou activités et pour les opérations la décomposition se fait en tâches. Un excellent moyen pour réaliser la décomposition fonctionnelle est l'ordinogramme du processus.



**Figure III.3** L'ordinogramme du processus (la distributrice de café)

La figure III.3 illustre un ordinogramme (flow chart) du processus d'une distributrice de café, ce processus est un ensemble d'opérations élémentaires qui se déroulent à partir du besoin à satisfaire jusqu'à la consommation du café. Une fois les

fonctions identifiées, on passe à l'étape de l'analyse ou l'étude qualitative.

### **III.6.3-L'étude qualitative des défaillances**

Celle-ci consiste à identifier toutes les défaillances possibles, à déterminer les modes de défaillance, à identifier les effets relatifs à chaque mode de défaillance, à analyser et à trouver les causes possibles et les causes les plus probables des défaillances potentielles.

Pour réaliser cette étude, on s'appuie sur l'analyse fonctionnelle. À partir des fonctions définies on cherche directement les défaillances potentielles (voir le tableau III.1). Ainsi l'analyse fonctionnelle aide à trouver en amont les causes et en aval les effets de chaque mode de défaillance.

Prenons dans le processus de la distributrice de café l'opération "la distributrice remplit le verre". L'opération est effectuée correctement si le verre est rempli d'un café qui correspond à une qualité et à un volume désirés.

Un mode de défaillance est que la distributrice ne remplit pas le verre. Un deuxième mode de défaillance est que la distributrice remplit le verre avec de l'eau seulement. Un troisième mode de défaillance est que la concentration de café est très faible dans le verre. À partir de ces trois modes de défaillance on analyse quel est l'effet potentiel (sans doute négatif) pour le client. L'étude est complète si on identifie quelles sont les causes possibles.

Pour chaque mode on peut avoir une ou plusieurs causes. Pour le deuxième mode de défaillance une cause possible est que la machine manqué de café.

Une deuxième cause possible est qu'il y a un blocage dans le circuit interne de la machine qui empêche la fusion entre l'eau chaude et le café (voir le tableau III.2).

Le but de l'AMDEC est de faire ressortir les points critiques afin de les éliminer, de prévoir un mode de prévention. La mise en évidence de ces points se fait selon certains critères dans une analyse quantitative.

### **III.6.4-L'étude quantitative**

Il s'agit d'une estimation de l'indice de criticité du trio cause-mode-effet de la

défaillance potentielle étudiée selon certains critères. Plusieurs critères peuvent être utilisés pour déterminer cet indice. Souvent dans la pratique on considère qu'une défaillance est d'autant plus importante si:

- Ses conséquences sont graves;
- Elle se produit souvent;
- Elle se produit et on risque de ne pas la détecter.

En pratique on attribue trois notes, chacune sur une échelle de 1 à 10 pour chaque trio cause-mode-effet:

- La note **G** - gravité de l'effet - les conséquences sur le client/utilisateur
- La note **O** - la probabilité d'occurrence - la fréquence d'apparition
- La note **D** - la probabilité de non-détection - le risque de non-détection

L'indice de criticité (**C**) s'obtient en multipliant ces trois notes précédentes soit celle de gravité, de la probabilité d'occurrence et de la probabilité de non-détection :

$$C = G \times O \times D$$

Le tableau III.3 illustre une estimation de l'indice de criticité des modes-causes-effets des défaillances dans le processus «distributrice de café». Si celle-ci remplit le verre seulement avec de l'eau chaude, le client sera très insatisfait.

On estime donc pour la gravité une note de 10. La cause «manque de café dans la distributrice» peut arriver souvent; on estime donc pour la probabilité d'occurrence la note cinq. La détection est faite par l'agent d'entretien lorsqu'il vient remplir la machine de café moulu; donc pour la probabilité de non-détection on estime aussi la note cinq. Les trois notes multipliées nous donnent l'indice de criticité qui, dans ce cas, est égal à 250. Le mot criticité correspond au terme anglais risk priority number [43].

### III.6.5- L'hiérarchisation

La difficulté essentielle d'une étude qui veut anticiper les problèmes et rechercher les solutions préventives provient de la très grande variété des problèmes potentiels à envisager. D'où le besoin d'une hiérarchisation, qui permet de classer les modes de défaillances et d'organiser leur traitement par ordre d'importance.

| Opération du processus                    | Mode de défaillance potentielle   | Effet de défaillance                | Cause possible de défaillance        | Évaluation |    |    |     |     | Actions préventives recommandées |        |           | Résultats |          |            |    |    |     |  |
|---|---|-------------------------------------|--------------------------------------|------------|----|----|-----|-----|----------------------------------|--------|-----------|-----------|----------|------------|----|----|-----|--|
|   |   |                                     |                                      | 2          | 5  | 10 | 25  | 50  | 100                              | prises | réduction | coût      | sécurité | durabilité |    |    |     |  |
|   |   |                                     |                                      |            |    |    |     |     |                                  |        |           |           |          |            | 60 | 80 | 100 |  |
| La distributrice de café remplit le verre | La distributrice de café ne remplit pas le verre et ne prend pas la monnaie | Client insatisfait                  | La distributrice est en panne        | 2          | 5  | 10 | 25  | 50  | 60                               |        |           |           |          |            |    |    |     |  |
|   |   |                                     | Manque d'eau                         | 7          | 10 | 6  | 0   | 0   |                                  |        |           |           |          |            |    |    |     |  |
|   | La distributrice remplit le verre avec d'eau et ne rend pas la monnaie      | Client insatisfait très insatisfait | Manque de café dans la distributrice | 5          | 5  | 10 | 25  | 100 |                                  |        |           |           |          |            |    |    |     |  |
|   |   |                                     | Blocage dans la distributrice        | 10         | 1  | 10 | 100 |     |                                  |        |           |           |          |            |    |    |     |  |
|   | La concentration du café est faible   | Client insatisfait                  | Manque de café                       | 7          | 1  | 8  | 56  |     |                                  |        |           |           |          |            |    |    |     |  |
|   |   |                                     | Qualité du café                      | 1          | 10 | 8  | 80  |     |                                  |        |           |           |          |            |    |    |     |  |

RT01.021003

Tableau III.3 AMDEC processus

L'hierarchisation suivant l'échelle de criticité permet de décider des actions prioritaires. En effet, c'est une liste d'articles ou de processus critiques. Le classement est fait par ordre décroissant généralement en quatre catégories ( $C > 100$ ;  $100 > C > 50$ ;  $50 > C > 20$ ;  $20 > C$ ). Ce classement permet de moduler les actions préventives, leur priorité variant en fonction de la catégorie. Très souvent les entreprises utilisent pour l'AMDEC-produit/processus un seuil de criticité de 100, [44], et pour l'AMDEC-moyen un seuil de 16 [45].

### III.6.6- La recherche des actions préventives/correctives

Après le classement des différents modes de défaillances potentielles d'après les indices de criticité, le groupe désigne les responsables de la recherche des actions préventives ou correctives. Les outils tels que le diagramme causes-effet, l'analyse de Pareto, le brainstorming, le travail en équipe, doivent être appliqués pour une recherche efficace. En pratique, le groupe de travail s'attache à réduire l'indice de criticité par des actions qui visent:

- La réduction de la probabilité d'occurrence (exemple: par la modification de la conception du produit ou du processus)
- La réduction de la probabilité de non-détection (exemple: par la modification de la conception du processus ou par la modification du système de contrôle)
- La réduction de la gravité de l'effet de défaillance (exemple: par la modification de la conception)

### III.6.7- Le suivi des actions prises et la réévaluation de criticité

C'est le moment de vérité pour la méthode. Un nouvel indice de criticité est calculé de la même façon que lors de la première évaluation, en prenant en compte les actions prises.

Cette valeur du nouvel indice de criticité est parfois appelée risque résiduel et peut être illustrée sous forme du diagramme Pareto (Fig III.4).

L'objectif de cette réévaluation est de déterminer l'impact et l'efficacité des actions prises.

Le nouvel indice de criticité doit donc être inférieur au seuil de criticité. Le tableau III.3 illustre une telle réévaluation qui nous montre que grâce aux actions prises, les nouveaux indices de criticité sont inférieurs à un seuil de criticité égal à 50.

### III.6.8- La présentation des résultats

Pour pouvoir effectuer et appliquer l'AMDEC, les entreprises utilisent des tableaux conçus spécialement pour le système étudié et préparés en fonction des objectifs recherchés.

Ces tableaux sont habituellement disposés en forme de colonnes et contiennent, en général, les informations nécessaires pour réaliser l'étude. Les tableaux 1 à 4 illustrent la réalisation d'un AMDEC-processus.

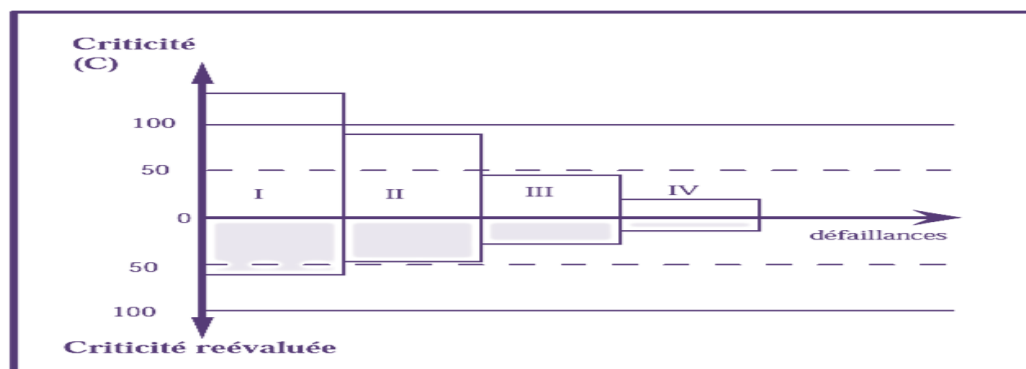


Figure III.4 Diagramme Pareto

## III.7- AMDEC et les autres outils de la qualité totale

### III.7.1 - L'AMDEC et l'Arbre des causes (FTA)

L'AMDEC est un outil qui permet d'étudier les conséquences de défaillance potentielle, chacune prise individuellement, ce qui est une logique inductive.

La méthode dite de l'Analyse des défaillances par l'arbre de causes [46], est une méthode qui, à partir d'un événement donné, a pour but d'identifier par ordre d'importance l'ensemble de ses causes, des causes principales aux causes les plus élémentaires.

C'est une représentation graphique d'une démarche analytique, suivant une logique déductive. Bref, le point de départ est la défaillance constatée et on

s'attache à en trouver les causes. Contrairement à l'AMDEC, il s'agit de correction. Les deux méthodes se complètent parfaitement. Dans le développement d'un nouveau produit, une analyse des défaillances par arbre de causes, effectuée sur un ancien produit, peut être très utile.

### **III.7.2- L'AMDEC et le déploiement de la fonction qualité**

Le Déploiement de la fonction qualité (DFQ) consiste à déployer en cascade les exigences des clients pendant toutes les phases de développement d'un nouveau produit. L'AMDEC peut parfaitement s'intégrer à l'approche DFQ. Dès la conception, les caractéristiques identifiées comme critiques par l'AMDEC, sont suivies pendant toutes les phases de développement et d'industrialisation jusqu'à l'expédition. Cette approche est utilisée avec succès dans les usines de Toyota, à la société Komatsu au Japon et est parfois appelée le déploiement de la fiabilité [47]. En Amérique du Nord c'est FORD qui utilise la même démarche.

### **III.7.3- L'AMDEC et le Contrôle statistique des procédés (CSP)**

L'AMDEC aide à déterminer les caractéristiques à suivre avec les méthodes statistiques. S'il est impossible de verrouiller les causes probables des défaillances qui peuvent survenir, on procède à la mise en place du contrôle statistique des procédés.

Plusieurs entreprises dans le domaine de l'automobile ont mis en place le CSP suite à l'AMDEC-processus pour les caractéristiques ayant une criticité supérieure à 100 et pour les caractéristiques ayant une note de gravité supérieure à 7 (échelle de 1 à 10). Cette approche est un excellent exemple pour la constitution d'un ensemble préventif AMDEC— CSP, qui permettrait la mise sous contrôle du processus.

En outre, le calcul préliminaire de la capacité opérationnelle du procédé est utilisé comme critère pour déterminer la note de probabilité de non-détection. Les techniques statistiques sont donc des sources très utiles pour la réalisation de l'étude.

| Opération du processus                    | mode de défaillance potentielle   | effet de défaillance | cause possible de défaillance        | Évaluation |         |           | Actions préventives   |   |   | Résultats |           |    |    |
|---|---|----------------------|--------------------------------------|------------|---------|-----------|---|---|---|-----------|-----------|----|----|
|   |   |                      |                                      | occurrence | gravité | criticité | recommandées  | prises  | occurrence  | gravité   | criticité |    |    |
|   |   |                      |                                      |            |         |           |   |   |   |           |           |    |    |
| La distributrice de café remplit le verre | la distributrice de café ne remplit pas le verre et ne prend pas la monnaie | client insatisfait   | la distributrice est en panne        | 2          | 5       | 6         | <ul style="list-style-type: none"> <li>suivi statistique des pannes</li> <li>vérification mensuelle de l'état de la distributrice</li> <li>inscrire le numéro de téléphone de l'entretien sur la distributrice</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>vérification + inscrire le numéro de téléphone de l'agence de l'entretien</li> </ul> | 1   | 3         | 5         | 15 |    |
|   |   |                      | manque d'eau                         | 7          | 0       | 6         | 0   |   |   |           |           |    |    |
|   |   |                      | manque de café dans la distributrice | 5          | 5       | 10        | 250   | <ul style="list-style-type: none"> <li>chaque matin remplir la distributrice de café</li> </ul>                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>chaque matin remplir la distributrice de café</li> </ul> | 2         | 2         | 10 | 40 |
|   |   |                      | blockage dans la distributrice       | 5          | 2       | 10        | 100   | <ul style="list-style-type: none"> <li>faire régulièrement l'entretien préventif</li> </ul>                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>un entretien préventif mensuel</li> </ul>                | 2         | 1         | 10 | 20 |
|   | la concentration du café est faible   | client insatisfait   | manque de café                       | 7          | 1       | 8         | 56  | <ul style="list-style-type: none"> <li>une vérification par jour</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>1 vérification par jour</li> </ul>                       | 1         | 1         | 5  | 5  |
|   |   |                      | la qualité du café                   | 1          | 10      | 8         | 80  | <ul style="list-style-type: none"> <li>sélectionner les marques, identifier le délai de conservation</li> </ul>             | <ul style="list-style-type: none"> <li>marque et délai de conservation</li> </ul>               | 1         | 1         | 8  | 8  |

Tableau III.4 Réévaluation, l'impact et l'efficacité des actions

### III.7.4- L'AMDEC et le Système anti-erreur (Poka-Yoké)

Selon certains spécialistes japonais, quelques soient les méthodes statistiques, celles-ci ne peuvent empêcher l'apparition d'un défaut dans un système personne-machine. Shingo propose les systèmes Poka-Yoké (qui signifie en japonais système anti-erreur) [48].

Il y a deux types de systèmes anti-erreur dépendant des fonctions régulatrices, soit les fonctions d'asservissement et les fonctions d'alerte.

- Les fonctions d'asservissement sont des fonctions qui, à l'apparition des anomalies, arrêtent les machines ou déclenchent des systèmes de blocage, évitant l'apparition de défauts en série.
- Les fonctions d'alerte attirent l'attention des ouvriers sur les anomalies en déclenchant un signal sonore ou des lampes clignotantes.

La mise en place de telles fonctions peut résulter d'une étude AMDEC. Après la hiérarchisation des défaillances potentielles, des actions prioritaires doivent être prises pour diminuer ou éviter tout risque éventuel.

En effet, une fonction d'alerte comme le repérage ou une fonction d'asservissement comme le verrouillage sont d'excellents exemples d'actions préventives dans le cadre d'une étude inductive AMDEC.

Pour illustrer ces propos, prenons l'exemple d'une intersection avec feux de signalisation. La pire défaillance qui puisse arriver est que les feux soient verts dans les deux directions de l'intersection. L'effet potentiel de cette défaillance est catastrophique et peut coûter une ou plusieurs vies humaines. La solution qui élimine complètement ce risque est la mise en place d'un système anti-erreur qui exclut une telle situation.

Si une défaillance se produit, ce système doit immédiatement déclencher des feux jaunes clignotants pour avertir les voitures et les piétons que les feux de signalisation ne fonctionnent pas.

### III.7.5 -L'AMDEC et l'ingénierie simultanée

L'ingénierie simultanée consiste à intégrer dans la phase de conception d'un produit, à la fois les exigences des clients en terme de qualité, de fiabilité et de coûts

d'une part, et les exigences des achats, de conception de processus, d'industrialisation du produit, de maintenance et des finances d'autre part [49]. Cette logique nécessite la participation active des services marketing, ingénierie, production, finances, achats, service après vente, etc., dans le but d'éliminer le plus en amont possible les défaillances, de réduire les coûts de développement ainsi que le délai de mise en marché des produits.

La simulation simultanée de plusieurs exigences, des spécifications, des conditions, des options et leur traduction en termes de coûts, de délais et de risques est possible grâce à toute une gamme des nouveaux logiciels de type DFMA [50]. Ces logiciels s'appuient sur un certain nombre de modules spécifiques:

- CFAO - conception et fabrication assistée par ordinateur - qui aide à augmenter la symétrie des pièces, et à diminuer les coûts de fabrication par la simplification des procédés d'assemblage;
- PCM - (Prédictive Cost Modeling) permettant d'effectuer des analyses comparatives des coûts globaux et des coûts en cours de chaque phase de développement du produit;
- modules d'évaluation de la rentabilité des investissements;
- modules d'application AMDEC, pour améliorer la fiabilité des produits, pour identifier les processus critiques;
- modules des systèmes experts permettant d'optimiser l'utilisation des multiples ressources et processus;
- modules de synthèse générale permettant d'identifier et de proposer des stratégies d'utilisation optimale.

La méthode AMDEC s'intègre parfaitement dans la méthodologie de l'ingénierie simultanée. Avec les autres modules, l'application de l'AMDEC assure à un nouveau produit l'efficacité de fonctionnement, la rentabilité, la rapidité de développement et la meilleure performance des processus en production.

Il existe d'autres outils de prévention spécifiques aux différents secteurs de l'industrie. La plupart d'entre eux sont proches de l'AMDEC ou viennent la compléter.

### III.7.6. L'AMDEC et les normes ISO 9000

Devant la mondialisation des marchés, de l'économie et de la concurrence, parmi d'autres outils de la qualité totale se trouve la célèbre série des normes internationales ISO 9000. Plus de 60 pays ont adopté à ce jour ces normes. Les normes prescrivent des éléments des systèmes qualité, qu'on doit maîtriser et assurer. Il existe plusieurs modèles dans la série de ces normes et pour leur mise en place les entreprises utilisent différentes méthodes.

L'AMDEC-produit aide à l'implantation de l'ISO 9001 dans la partie de la maîtrise de la conception. L'AMDEC-processus aide l'implantation des modèles ISO 9001 et ISO 9002 dans la partie maîtrise des procédés. L'AMDEC-moyen peut être utilisé dans la partie maîtrise des équipements de mesure et d'essai. L'AMDEC-service aide à l'implantation de la norme ISO 9004-2 pour les services dans le processus de conception du service. L'utilisation de l'AMDEC est recommandée par la norme ISO 9004 pour les activités de la qualification et de la validation de la conception [51].

L'AMDEC est une méthode de prévention qui peut s'appliquer à une organisation, un processus, un moyen, un composant ou un produit dans le but d'éliminer, le plus en amont possible, les causes des défauts potentiels. C'est un moyen de se prémunir contre certaines défaillances et d'étudier leurs causes et leurs conséquences.

## CONCLUSION GENERALE

Dans le monde industriel les gains de productivité représentent un souci quotidien pour les dirigeants des entreprises. La compétitivité passe par la maîtrise indispensable de la disponibilité de l'outil de production et par la qualité des biens produits ou des services rendus. Il existe plusieurs moyens permettant une sûreté des systèmes industriels. Le diagnostic des défaillances, s'il est réalisé avec efficacité et permet de détecter de façon précoce une dégradation, représente un des moyens pour contribuer à l'amélioration de productivité.

Les étapes du processus de diagnostic sont définies à partir de la notion du mode de fonctionnement. Le mode de fonctionnement peut être défini comme l'ensemble des états du système qui le placent dans une situation de production et de sécurité donnée. Le suivi du mode de fonctionnement d'un système est généralement décrit comme un processus en trois étapes, chacune méritant une attention particulière:

- ✓ la détection du mode sous lequel le système fonctionne,
- ✓ l'identification et la localisation de la cause d'un mauvais fonctionnement éventuel,
- ✓ l'action sur le système qui résulte des deux étapes précédentes. Il peut s'agir du maintien dans le même mode de fonctionnement, de la correction du fonctionnement, ou même de son arrêt si nécessaire.

De nombreux scientifiques ont essayé de réduire le diagnostic à un problème de résolution inverse entre la cause et son effet. La sélection de la méthode de diagnostic la plus appropriée à un système industriel donné ne peut se faire qu'après un recensement des besoins et des connaissances disponibles. L'inventaire des éléments indispensables à étudier est le suivant:

- ✓ nature des causes de la défaillance à localiser,
- ✓ connaissance des symptômes associés aux défaillances induites par les causes,
- ✓ maîtrise des moyens de traitement des symptômes,
- ✓ maîtrise des moyens de mesure des symptômes,
- ✓ connaissance des mécanismes physiques entre les causes et les effets,

- ✓ inventaire du retour d'expérience,
- ✓ recensement des expertises disponibles,
- ✓ définition du niveau de confiance dans le diagnostic,
- ✓ identification des utilisateurs finaux du diagnostic.

Les causes de défauts dans les machines sont de sources différentes. Ces défauts provoquent des pertes instables si elles ne sont pas détecter et diagnostiquer d'une manière précoce. Cependant, la surveillance est devenue une nécessité pour assurer une productivité et une technicité de qualité. A cet effet, toutes les méthodes de diagnostic visent à détecter et remédier à temps avant que le défaut cause un arrêt intempestif.

## REFERENCES

- [1] P. SEVERIN Lycée des métiers de l'hôtellerie et du tourisme de Toulouse  
Biotechnologie B Analyse fonctionnelle - Copyleft: Paternité - Pas d'Utilisation  
Commerciale - Partage des Conditions Initiales à l'Identique
- [2] Introduction à la maintenance ISET Nabeul A.U. : 2013-2014 35 Chapitre  
5 :Analyse des défaillances et aide au diagnostic
- [3] Boulenger.A et Pachaud , 2003. C ,2003 Analyse vibratoire en maintenance:  
surveillance et diagnostic des machines série gestion industrielle, Dunod, Paris
- [4] D. Racoceanu, " Contribution a la Surveillance des Systèmes de Production en  
Utilisant l'Intelligence Artérielle", These de Habilitation a diriger des recherches de  
l'universite de l'Université de FRANCHE-COMTÉ de Besançon, France,2006.
- [5] B. Samira, " contribution a l'optimisation de la maintenance predictive Par  
l'utilisation du logiciel omnitrend (systeme on line) Cas : cimenterie hamma bouziane",  
Thèse de magister universite de Mentouri de Constantine, Algerie, 2008. Chapitre I :
- [6] M. Zemouri, "contribution a la surveillance des systemes de production a l'aide des  
reseaux de neurones dynamiques : application a la e-maintenance", These de doctorat  
de l'universite de Franche-Comte, France, 2003.
- [7] T. Bensana, " Diagnostic des défaillances basé sur l'analyse vibratoire d'une  
turbine à vapeur", These de Magister universite de Annaba, Algerie, 2008.
- [8] C. Lurette, " developpement d'une technique neuronale auto-adaptative pour la  
classification dynamique de données évolutives. Application a la supervision d'une  
presse hydraulique", These de doctorat des Sciences et Technologies de lille, France,  
2003.
- [9] C. Rahmoune, " Analyse et traitement du courant statorique pour la détection des  
défauts dans les systèmes électromécaniques", Thèse de Magister universite m'hamed  
bougara-boumerdes , Algerie,2011.
- [10] M .Lyons, S Adams, M. Woloshynowych, , C. Vincent, "Human reliability  
analysis in healthcare: A review of techniques", International Journal of Risk & Safety  
in Medicine, Vol.16, pp. 223–237, 2004.

- [11] J .Moubray Reliability, " Centered Maintenance", RCM, edition 2000.
- [12] M. Demers, " developpement d'une methodologie d'optimisation de la maintenance par la fiabilite pour les systemes complexes: application a un groupe electrogene diesel de secours ", Thèse de Magister universite m'hamed bougara boumerdes , algerie, 2011.
- [13] M. Fathi Karoui, " Surveillance des processus dynamiques événementiels", Thèse de doctorat l'universite de grenoble, France, 2011.
- [14] K. M. Pekpe, "Identification par les techniques des sous-espaces application au diagnostic", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 2004.
- [15] H. Derbel, " Diagnostic à base de modèles des systèmes temporisés et d'une sous-classe de systèmes dynamiques hybrides", Thèse de Doctorat, Université Joseph-Fourier –Grenoble, France, 2009.
- [16] A .Takrouni Hedfi, " Surveillance par observateurs des systèmes dynamiques hybrides", Thèse de Doctorat, Université de lille, France, 2013.
- [17] Omar DJEBILI ; «Contribution à la maintenance prédictive par analyse vibratoire des composants mécaniques tournants. Application aux butées à billes soumises à la fatigue de contact de roulement». Thèse de doctorat, Université De Reims Champagne Ardenne (2013).
- [18] LANDOLSI F, 2010 cours de Techniques de surveillance , ressources pédagogiques pour l'enseignement technologiques .
- [19] Chevalier R, «Etat de l'art de la surveillance et du diagnostic des machines tournantes à EDF», RFM, (2001).
- [20] Bolaers F, Dron J.P, Rasolofondraibe L, «Prédiction et suivi de l'évolution d'un 134 écaillage de fatigue de roulement par analyse vibratoire». XVIème Congrès Français de mécanique, Nice, (2003).
- [21] Philippe Arquès, Diagnostic prédictif et défaillances des machines : Théorie, traitement, analyse, reconnaissance, prédiction, Technip, 2009.
- [22] T. Bensana, " Diagnostic des defaillances base sur l'analyse vibratoire d'une turbine a vapeur.", These de Magister, Universite Badji Mokhtar -Annaba, Algérie, 2008.

- [23] S. Bourdim, “ Méthodes ondelettes et Bayésiennes pour le diagnostic : Application aux machines asynchrones”, These de Magister, Université Ferhat Abbas - Setif, Algérie, 2011.
- [24] H. Cherif, “ Détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone en utilisant l’analyse par FFT et ondelettes”, These de Magister, Mohamed Khider - Biskra, Algérie, 2014.
- [25] Ilyes Khelf, «Diagnostic Des Machines Tournantes Par Les Techniques De L’intelligence Artificielle», These De Doctorat, Université Badji Mokhtar – Annaba (2014)
- [26] El badaoui Mohamed, «Contribution au diagnostic vibratoire des réducteurs complexes à engrenages par l’analyse cepstrale», Thèse de l’Université Jean Monnet, (1999).
- [27] Brüel&KjærVibro, Diagnostic des défautspar analyse vibratoire, 2015.
- [28] O. Djebili, Contribution à la maintenance prédictive par analyse vibratoire des composants mécaniques tournants, Application aux butées à billes soumises à la fatigue de contact de roulement, Thèse de doctorat, Université De Reims Champagne Ardenne(2013).
- [29] CHAIB R, 2009, Contribution à l’optimisation de la maintenance conditionnelle par l’analyse vibratoire, thèse de doctorat en sciences en mécanique, université de Constantine
- [30] BOUANAKA, ML, 2009, Contribution à l'amélioration des performances opérationnelles des machines industrielles, thèse de doctorat en génie mécanique, Université Mentouri Constantine
- [31] BELHOMME A ,2011 Cours Stratégie de maintenance les défaillances-les causes bts maintenance industrielle
- [32] Cours Analyse Fonctionnelle Interne ,Chapitre V
- [33] MATTHIAS KREIMEYER ,2011, UDO LINDEMANN. Complexity Metrics in Engineering Design Managing the Structure of Design Processes. Berlin : Springer.
- [34] GILLES ZWINGELSTEIN, Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels complexes.Techniques d'ingénieur.

- [35] Olivier Boutou, Gérard Landy, Bruno Saintvoirin, Performance de l'entreprise, AFNOR, 2006.
- [36] FMEA, Chrysler Corporation, 1986.
- [37] Textes des conférences, Institut de sûreté de fonctionnement, 18 juin 1991.
- [38] Dale B. G., Hollier R.H.,Lascelles D.M., «The Umist Quality Management Programme», The TQM Magazine,Vol.1 N°4 1989, page 243-246.
- [39] Aldridge J.,Dale B., «The Application of Failure Mode and Effects Analysis at an Automotive Components Manufacturer», IJQRM ,vol.8, n.3,1991, page 48-50.
- [40] Lyonnet P., Les outils de la qualité totale, édition Technique et Documentation Lavoisier, 1991, page 72-74.
- [41] Department of Defense USA, MIL STD 1629 A, 1984.
- [42] Mouvement Français pour la Qualité, AMDEC- Projet de guide pédagogique, 1991.
- [43] Potential FMEA, Ford Motors Co, September 1988
- [44] FMEA, Allied Signal-Bendix Automotive, 1991.
- [45] Ernst Claude, «L'AMDEC démystifié», Management et Qualité, printemps 1990.
- [46] Fault tree analysis, Chrysler Corporation, Reliability Functions in Product Development, September 1986.
- [47] Akao Yoji, Quality Function Deployment: integrating customer requirements into product design, Cambridge, Mass, Productivity press, 1990, page 186-188,197.
- [48] Shingo, S., Le système Poka-Yoké, Les éditions d'organisation, page 111-113.
- [49] Dowlatshhi Shad, «Purchasing's Role in a Concurrent EngineeringEnvironment»,International Journal of Purchasing and Materials Management,Vol. 28, N 1, hiver 1992.

[50] Alain Brand, «Design for manufacturability and assembly (DFMA): un outil d'aide à la qualité», Qualité en mouvement N°3, octobre /novembre 1991.

[51] Organisation internationale de normalisation, Compendium ISO 9000, 2e édition, 1992, page 146.