

République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère  
de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université du 20 Août 1955 Skikda

Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique



N° d'ordre :DO12118002D

## **THESE**

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

**DOCTEUR EN SCIENCES**

Spécialité: Electromécanique

Par :

**TALEB MOUNIA**

Surveillance, détection et diagnostic des  
défaillances dans une cimenterie en utilisant  
L'analyse fonctionnelle

Soutenue le : 18/03/2018

Devant le Jury composé de :

|            |              |            |                           |
|------------|--------------|------------|---------------------------|
| Président  | L.KHOCHEMANE | Professeur | Université de Skikda      |
| Rapporteur | R.CHAIB      | Professeur | Université de Constantine |
| Examineur  | A.BOUZAOUIT  | Professeur | Université da Skikda      |
| Examineur  | M. BENEDIR   | Professeur | Université de Constantine |
| Examineur  | A. BENRETEM  | Professeur | Université D'Annaba       |

## ملخص

الآلات الدوارة تلعب دورا مهما في أي سلسلة تكنولوجية، إنها حالة طاحونة الخام لمصنع الإسمنت بالما لبيض. هذا العمل هو جزء من تشخيص هذه الآلات. تتكون هذه الأخيرة من أجزاء حساسة (محركات، علبة مسننات، محامل، محامل وتروس) تتعرض للأحمال ميكانيكية عالية وظروف صناعية قاسية. الكثير من حالات تدهور بإمكانها أن تسبب خلا في هذه الآلات: سوء التحام للأسنان، انكسار العمود، خلل في الجلبة الداخلية للمدحرج الحامل.

قام هذا العمل من ناحية، بتنفيذ دراسة للحصول على معلومات عن تصور الأشخاص حول أهمية وإدارة السلامة (دراسة استقصائية في موضوع السلامة وظروف العمل).

من ناحية أخرى فإن مراقبة المروحية من خلال تحليل الاهتزاز اتقد تم استعماله كمؤشر للأخطاء، ما سمح بتشخيص النظام.

الكلمات المفتاحية : الأمن، عطب، تشخيص، تحليل اهتزازي

## **Resumé**

Désormais, l'efficacité de la maintenance des systèmes industriels est un enjeu économique majeur pour leur exploitation commerciale. Les principales difficultés et sources d'inefficacité résident dans le choix des actions de maintenance à entreprendre au moment opportun surtout lorsque la machine joue un rôle vital dans le processus de production, cas de notre machine. ces défauts peuvent s'avérer lourdes de conséquences. Ainsi pour éviter des arrêts de production imprévus et des retombés économiques considérables qui en découlent, il faut surveiller en permanence ces équipements et « traquer » tous les signes précurseurs de défauts avant qu'il ne soit trop tard. La maintenance conditionnelle est la solution, incorporée dans les systèmes de gestion, elle a fait ses preuves ; réduire les temps d'immobilisation, optimiser la fabrication, les ressources et la rentabilité de la production le cas de l'industrie du ciment. Pour que la maintenance conditionnelle soit efficace, il faut des mesures précises et fiables.

L'expérience a montré que l'analyse vibratoire est l'outil le plus fiable qui donne précocement et de la meilleure façon l'état de détérioration d'une machine tournante. Elle permet d'identifier les efforts dès qu'ils apparaissent, avant qu'ils n'aient causé des dommages irréversibles, elle permettra aussi après analyse d'en déduire l'origine et d'estimer les risques de défaillance. Dans ce sens j'ai fait une étude à la cimenterie d'Elmalabiod, qui a adopté une surveillance continue en collaboration avec une société de maintenance ( SME ) chargée de la maintenance des équipements pour les cimenteries de l'est en espérant aboutir à une politique optimale de la maintenance conditionnelle. des mesures réelles ont été analysées par l'indicateur vibratoire en aboutissant à des résultats satisfaisants.

### **Mots clés :**

Surveillance, Maintenance conditionnelle, santé sécurité au travail, analyse vibratoire, analyse spectrale.

## **Abstract**

From now on, the maintenance efficiency of industrial systems is a major economic challenge for their commercial exploitation. The main difficulties and sources of inefficiency lie in the choice of the maintenance actions to be undertaken at the appropriate time, especially when the machine plays a vital role in the production process, in the case of our machine. These shortcomings can have serious consequences. In order to avoid unplanned downtime and the consequent significant economic impact, these equipment must be continuously monitored and all signs of defects checked before it is too late. Conditional maintenance is the solution, incorporated into management systems, it has proved its worth; Reduce downtime, optimize manufacturing, resources and profitability of production the case of the cement industry. For conditional maintenance to be effective, accurate and reliable measurements Experience has shown that vibration analysis is the most reliable tool that gives the deteriorating state of a rotating machine early and in the best way. It makes it possible to identify the forces as soon as they appear, before they have caused irreversible damage, it will also allow, after analysis, to deduce the origin and to estimate the risks of failure. In this sense, I carried out a study at the Elmalabiod cement plant, which adopted continuous monitoring in collaboration with a maintenance company (SME) in charge of equipment maintenance for the cement plants in the east, hoping to achieve a Optimal policy for conditional maintenance. Real measurements were analyzed by the vibratory indicator with satisfactory results. are required.

### **Key words:**

Monitoring, Conditional maintenance, Health and safety at work , analyze vibratory, analyze spectral,

## **Remerciements**

*Au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à mon Directeur de thèse Pr. **CHAIB Rachid** ,pour tout le temps qu'il m'a consacré, ses directives précieuses, et pour la qualité de son suivi durant toute la période de mon encadrement.*

*Je tiens à remercier le Pr. **Khochemene Lakhdar** de l'université de Skikda de m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de soutenance. Je voudrais également adresser mes plus vifs remerciements au Pr. **Bouzaouit .A**, et Pr. **Benretem Abdelwaheb** et le Pr. **Benidir Mouhamed** pour m'avoir fait l'honneur d'examiner ce travail, qu'ils trouvent ici l'expression de ma reconnaissance.*

*J'adresse mes sincères remerciements à toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté à me rencontrer et répondre à mes questions durant mes recherches en particulier **Dr.Gadri Larbi**.*

*Je tiens aussi à remercier vivement le directeur de la cimenterie d'Elmalabiod qui a accepté de m'accueillir en stage au sein de son organisme.*

*Je voudrai remercier également tout le personnel de la cimenterie pour sa gentillesse et son soutien notamment l'équipe de maintenance.*

*Mes remerciements vont enfin à toute personne qui a contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*

## LISTE DES TABLEAUX

| <b>TABLEAU<br/>U N°</b> | <b>TITRE</b>   | <b>PAGE</b> |
|-------------------------|--|-------------|
| 01                      | <b>Situations dangereuses et/ou événements dangereux prévisibles</b>             | 21          |
| 02                      | <b>Portes logiques</b>   | 25          |
| 03                      | <b>Modes de défaillances</b>   | 45          |
| 04                      | <b>Localisation des défauts dans les transmissions de puissance à engrenages</b> | 94          |
| 05                      | <b>Mesures vibratoires sur le moteur</b>   | 97          |
| 06                      | <b>Niveaux vibratoires relevés en accélération</b>                               | 98          |

## LISTE DES FIGURES

| FIGURE N° | TITRE  | PAGE |
|-----------|--|------|
| 01        | La maintenance corrective  | 6    |
| 02        | La maintenance préventive  | 7    |
| 03        | La maintenance conditionnelle (intervention seuil d'urgence )  | 8    |
| 04        | La maintenance conditionnelle  | 8    |
| 05        | Schéma de la maintenance systématique et conditionnelle  | 9    |
| 06        | Les trois fonctions opérationnelles de la maintenance  | 9    |
| 07        | Différentes phases d'une étude MBF   | 12   |
| 08        | De l'ancienne attitude vers l'attitude Total Productive Maintenance  | 13   |
| 09        | Risque = Aléa X Vulnérabilité  | 17   |
| 10        | Exemple d'arbre de défaillances  | 18   |
| 11        | Les concepts de la sûreté de fonctionnement  | 22   |
| 12        | Deux courants de pensée sur la question des déviations aux règles de sécurité et procédures  | 25   |
| 13        | Sécurité et conditions de travail  | 29   |
| 14        | Ambiance et attitude des employés au travail   | 30   |
| 15        | Mécanisme d'attachement  | 33   |
| 16        | Courbe d'évolution du taux de défaillance  | 34   |
| 17        | Définition des temps   | 35   |
| 18        | Causes de défaillance du système   | 37   |
| 19        | Causes de défaillance d'un élément   | 38   |
| 20        | Modes génériques de défaillance  | 39   |
| 21        | Processus de diagnostic basé sur la génération de résidus.   | 42   |
| 22        | Techniques de RdF. (a) – extraction des informations sensibles à l'état du procédé, (b) – vecteur d'observation $X_k$ et (c) – définition de l'espace de décision. | 43   |
| 23        | Démarche de diagnostic par les techniques de RdF.  | 44   |
| 24        | Boucle de rétroaction sur les analyses en fonction des événements.   | 47   |
| 25        | L'approche d'AQT pour le diagnostic de défaut  | 48   |
| 26        | <i>Diagnostic d'un système avec l'approche par reconnaissance de formes</i>  | 51   |
| 27        | Description du signal vibratoire   | 53   |
| 28        | Le principe de l'accéléromètre capacitif   | 55   |
| 29        | Accéléromètre à détection capacitive   | 56   |
| 30        | Principe de l'accéléromètre à détection piézorésistive   | 57   |
| 31        | Un accéléromètre piézoélectrique à trois axes  | 58   |
| 32        | Choix directionnel pour la prise de mesure   | 59   |
| 33        | Réponse d'un accéléromètre en fonction de la fréquence selon le mode de fixation   | 60   |
| 34        | Représentation d'un signal harmonique  | 61   |
| 35        | Représentation d'un signal périodique non harmonique (en trait fort) et ses deux composantes harmoniques (en trait fin).   | 62   |
| 36        | Représentation d'un signal aléatoire   | 63   |
| 37        | Grandeurs associées à l'amplitude d'une vibration  | 67   |
| 38        | Mesure du niveau global  | 68   |
| 39        | Obtention du spectre à partir du signal temporel   | 69   |
| 40        | Principe d'un diagnostic   | 76   |

|    |  |    |
|----|--|----|
| 41 | Déroulement d'une analyse vibratoire   | 76 |
| 42 | situation géographique de la cimenterie d'Elmalabiod de Tébessa                                  | 77 |
| 43 | processus de fabrication du ciment   | 78 |
| 44 | Equipements de commande du ventilateur   | 78 |
| 45 | Photos après l'incident du réducteur   | 80 |
| 46 | Photo casse arbre du réducteur TACKOLADE   | 81 |
| 47 | Surveillance continue  | 84 |
| 48 | Schéma synoptique du ventilateur RS10  | 85 |
| 49 | Courbe de tendance du NG accélération, vitesse et DEF moteur                                     | 86 |
| 50 | Analyse spectrale du moteur  | 86 |
| 51 | Courbe de tendance du NG accélération, vitesse et DEF réducteur                                  | 87 |
| 52 | Courbe de tendance du NG accélération, vitesse et DEF réducteur                                  | 87 |
| 53 | Analyse spectrale (Représentation des harmoniques) sur réducteur                                 | 88 |
| 54 | Spectre zoom   | 98 |
| 55 | Analyse d'enveloppe  | 89 |
| 56 | Courbe de tendance des niveaux globaux au point 8RH (1ère mesure)                                | 90 |
| 57 | Courbe de tendance des niveaux globaux au point 8RH(2ème mesure)                                 | 90 |
| 58 | Analyse spectrale septembre 2012   | 91 |
| 59 | Analyse d'enveloppe septembre 2012   | 92 |
| 60 | Courbe de tendance du niveau global accélération, vitesse et facteur défaut roulement à l'entrée | 92 |
| 61 | Analyse spectrale septembre 2013   | 93 |
| 62 | Courbe de tendance des NG accélération palier libre  | 94 |
| 63 | Analyse spectrale du palier libre  | 94 |

# Glossaire des acronymes

---

AFNOR : Association Française de Normalisation

AMDEC : Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité.

APR : Analyse Préliminaire des Risques

APD/APR : Analyse préliminaire des dangers/risques

CHSCT : Comité d'Hygiène, de Sécurité, et des Conditions de Travail

SST : Santé, Sécurité au Travail

AOR :Analyse opérationnelle des risques

AMC :Analyse des modes communs

INSAG : Institut. Supérieur d'assurances et de gestion.

TF : Taux de Fréquence

TG : Taux de Gravité

NF : Norme française

MTBF : Moyenne des temps de bon fonctionnement, mean time between failure

MTTR : Moyenne des temps des tâches de réparation, mean time to repair

MTBO: Mean time between overhaul

PCEG : *Possible Cause and effect graph*

HDG : *Hazop-digraph*

*FFT : Fast Fourier Transform*

*MSG-3: Maintenance Steering Group -3*

MBF : Maintenance basée sur la fiabilité

TPM : Total Productive Maintenance

LCC : Life Cycle Cost

FDMS : Fiabilité ,Disponibilité, Maintenabilité ,Sécurité

MCP : Moindres Carrés Partiels

ACP :Analyse en Composantes Principales

## TABLE DES MATIERES

| TABLE DES MATIERES                          |  | Page |
|---|--|------|
|   | ملخص   |      |
|   | RESUME   |      |
|   | REMERCIEMENTS  |      |
|   | LISTE DES TABLEAUX   |      |
|   | LISTE DES FIGURES  |      |
|   | GLOSSAIRE DES ACRONYMES  |      |
|   | TABLE DES MATIERES   |      |
|   | INTRODUCTION GENERALE  | 1    |
| <b>CHAPITRE I : MAINTENANCE ET SECURITE</b> |  |      |
| <b>1</b>                                    | <b>Introduction</b>  | 5    |
| <b>1.1</b>                                  | <b>La fonction maintenance : l'émergence d'un besoin</b>                           | 5    |
| <b>1.1.1</b>                                | <b>Qu'est ce que la maintenance</b>  | 6    |
| <b>1.1 .2</b>                               | <b>De l'entretien « un mal nécessaire » à la maintenance « source de profits »</b> | 6    |
| <b>1.1.3</b>                                | <b>Différents formes de maintenance</b>  | 6    |
| <b>A</b>                                    | <b>La maintenance corrective</b>   | 7    |
| <b>B</b>                                    | <b>La maintenance préventive</b>   | 8    |
| <b>1.1.4</b>                                | <b>La fonction maintenance</b>   | 11   |
| <b>1.1.5</b>                                | <b>La fonction méthodes</b>  | 12   |
| <b>1.1.6</b>                                | <b>La fonction ordonnancement</b>  | 12   |
| <b>1.1.7</b>                                | <b>La fonction réalisation des interventions</b>                                   | 12   |
| <b>1.1.8</b>                                | <b>Management de la maintenance</b>  | 12   |
| <b>1.1.9</b>                                | <b>Politique de maintenance</b>  | 13   |
| <b>1.1. 10</b>                              | <b>Stratégie de maintenance</b>  | 13   |
| <b>1.1. 11</b>                              | <b>La méthode MBF Maintenance Basée sur la Fiabilité</b>                           | 13   |
| <b>1.1. 12</b>                              | <b>La stratégie TPM Total Productive Maintenance</b>                               | 14   |
| <b>1.1. 13</b>                              | <b>La stratégie LCC Life Cycle Cost</b>  | 15   |
| <b>1.2</b>                                  | <b>Le concept de sécurité au travail</b>   | 16   |
| <b>1.2.1</b>                                | <b>Quelles sont les obligations du fabricant des machines ?</b>                    | 17   |
| <b>1.2.2</b>                                | <b>Les différentes étapes pour une machine sûre Évaluation des risques</b>         | 17   |
| <b>1.2.3</b>                                | <b>Quelques définitions de la sécurité</b>   | 20   |
| <b>1.2.4</b>                                | <b>Stratégie d'analyse des risques</b>   | 20   |
| <b>1.2.5.</b>                               | <b>L'intérêt d'une stratégie de prévention des risques</b>                         | 20   |
| <b>1.2.6</b>                                | <b>Méthodes d'analyse</b>  | 20   |
| <b>1.2.7</b>                                | <b>Management des risques</b>  | 22   |
| <b>1.2.8</b>                                | <b>Les bases historiques de la sécurité</b>  | 24   |
| <b>1.2.8.1</b>                              | <b>la sûreté de fonctionnement</b>   | 24   |
| <b>1.2.8.2</b>                              | <b>Les concepts de la sureté de fonctionnement</b>                                 | 26   |
| <b>1.2.9</b>                                | <b>Notions fondamentales des concepts de la sureté de fonctionnement</b>           | 27   |

## TABLE DES MATIERES

|   |   |    |
|---|---|----|
| <b>1.2.9. 1</b>   | <b>La fiabilité</b>   | 27 |
| <b>1.2.9. 2</b>   | <b>La disponibilité</b>   | 28 |
| <b>1.2.9. 3</b>   | <b>La maintenabilité</b>  | 28 |
| <b>1.3</b>  | <b>La prescription comme outil de la sécurité</b>                                 | 28 |
| <b>1.3.1</b>  | <b>Rôle de la prescription</b>  | 28 |
| <b>1.3.2</b>  | <b>Application de la prescription dans l'industrie</b>                            | 28 |
| <b>1.3.3</b>  | <b>Les déviations par rapport aux règles de sécurité et procédures</b>            | 29 |
| <b>1.4</b>  | <b>L'émergence du concept de la culture de sécurité</b>                           | 30 |
| <b>1.4.1</b>  | <b>La culture</b>   | 30 |
| <b>1.4.2</b>  | <b>Mesure de la culture de sécurité : le questionnaire de culture de sécurité</b> | 30 |
| <b>1.5</b>  | <b>La Santé Sécurité au Travail SST</b>   | 31 |
| <b>1.5.1</b>  | <b>Les accidents de travail</b>   | 31 |
| <b>1.5.2</b>  | <b>Comportement organisationnel</b>   | 32 |
| <b>1.5.3</b>  | <b>Sécurité et conditions de travail</b>  | 32 |
| <b>1.5.4</b>  | <b>Commentaire</b>  | 34 |
| <b>1.5.5</b>  | <b>Conclusion</b>   | 35 |
| <b>CHAPITRE 2 : DIAGNOSTIC DES DEFAILLANCES : METHODES ET MODELES</b> |   |    |
| <b>2.1.</b>   | <b>Généralités sur les défaillances</b>   | 36 |
| <b>2.2</b>  | <b>Défaillances</b>   | 37 |
| <b>2.3</b>  | <b>Temps</b>  | 39 |
| <b>2.4</b>  | <b>Causes de défaillance du système</b>   | 41 |
| <b>a</b>  | <b>Causes externes de défaillance</b>   | 41 |
| <b>b</b>  | <b>Causes internes de défaillance</b>   | 41 |
| <b>2.5</b>  | <b>Modes de défaillances</b>  | 43 |
| <b>2.5.1</b>  | <b>Modes génériques de défaillance</b>  | 44 |
| <b>2.6</b>  | <b>Défaillances rencontrées sur les machines tournantes</b>                       | 46 |
| <b>2.6.1</b>  | <b>Défauts d'engrenages</b>   | 46 |
| <b>2.6.2</b>  | <b>Défauts des roulements</b>   | 48 |
| <b>2.6.3</b>  | <b>Défauts des arbres</b>   | 50 |
| <b>2.6.3.1</b>  | <b>Défaut de Balourd</b>  | 50 |
| <b>2.6.3.2</b>  | <b>Défaut d'alignement</b>  | 51 |
| <b>2.7</b>  | <b>Diagnostic</b>   | 51 |
| <b>2.7.1</b>  | <b>Méthodes de diagnostic</b>   | 52 |
| <b>2.7.2</b>  | <b>Méthodes à base de connaissances</b>   | 52 |
| <b>2.7.3</b>  | <b>Méthodes internes</b>  | 53 |

## TABLE DES MATIERES

|   |   |           |
|---|---|-----------|
| <b>2.7.4</b>  | <b>Méthodes externes</b>  | <b>53</b> |
| <b>2.7.5</b>  | <b>Diagnostic par les techniques de RdF</b>                                 | <b>54</b> |
| <b>2.8</b>  | <b>Les approches relationnelles</b>   | <b>56</b> |
| <b>2.9</b>  | <b>Les méthodes de traitement de données</b>                                | <b>58</b> |
| <b>2.9.1</b>  | <b>Le diagnostic par Analyse Qualitative de Tendances(AQT)</b>              | <b>58</b> |
| <b>2.9.2</b>  | <b>Analyse en Composantes Principales (ACP)</b>                             | <b>60</b> |
| <b>2.10</b>   | <b>Le diagnostic par reconnaissance de formes</b>                           | <b>61</b> |
| <b>2.10.1</b>   | <b>Le principe de base</b>  | <b>61</b> |
| <b>2.11</b>   | <b>Conclusion</b>   | <b>61</b> |
| <b>CHAPITRE 3 : PRESENTATIONS DE L'ANALYSE VIBRATOIRE</b> |   |           |
| <b>3.1</b>  | <b>Introduction</b>   | <b>63</b> |
| <b>3.2</b>  | <b>Notions fondamentales</b>  | <b>64</b> |
| <b>3.2.1</b>  | <b>Définition d'une vibration</b>   | <b>65</b> |
| <b>3.2.2</b>  | <b>Description d'un signal vibratoire</b>                                   | <b>65</b> |
| <b>3.3</b>  | <b>Analyse vibratoire</b>   | <b>66</b> |
| <b>3.4</b>  | <b>Surveillance et détection</b>  | <b>67</b> |
| <b>3.5</b>  | <b>Les capteurs de vibration</b>  | <b>68</b> |
| <b>3.5.1</b>  | <b>Types et caractéristiques des capteurs</b>                               | <b>68</b> |
| <b>3.5.1.1</b>  | <b>Les différents types des capteurs de vibration</b>                       | <b>68</b> |
|   | <b>A- L'accéléromètre à détection capacitive.</b>                           | <b>68</b> |
|   | <b>B- L'accéléromètre à détection à base de piezojonction de transistor</b> | <b>70</b> |
|   | <b>C- L'accéléromètre à détection piézoélectrique</b>                       | <b>71</b> |
| <b>3.6</b>  | <b>Choix de l'emplacement des capteurs</b>                                  | <b>72</b> |
| <b>3.6.1</b>  | <b>La fixation des capteurs</b>   | <b>72</b> |
| <b>3.6.1.1</b>  | <b>Les modes de fixation</b>  | <b>73</b> |
| <b>3.7</b>  | <b>Les signaux</b>  | <b>74</b> |
| <b>3.7.1</b>  | <b>Signaux harmoniques</b>  | <b>74</b> |
| <b>3.7.2.</b>   | <b>Signaux périodiques non harmoniques</b>                                  | <b>75</b> |
| <b>3.7.3</b>  | <b>Signaux transitoires et aléatoires</b>                                   | <b>75</b> |
| <b>3.8</b>  | <b>Signatures vibratoires</b>   | <b>76</b> |
| <b>3.8.1</b>  | <b>Analyse harmonique, série de Fourier</b>                                 | <b>77</b> |
| <b>3.8.2.</b>   | <b>Les analyseurs de spectre</b>  | <b>79</b> |
| <b>3.9</b>  | <b>Grandeurs physiques caractérisant une vibration</b>                      | <b>80</b> |

## TABLE DES MATIERES

|  |  |           |
|--|--|-----------|
| <b>3.9.1</b>   | <b>Choix du mode d'investigation</b>   | 81        |
| <b>3.9.1.1</b>   | <b>Mesure du niveau global</b>   | 81        |
| <b>3.9.1.2</b>   | <b>Analyse spectrale</b>   | 82        |
| <b>3.9.2</b>   | <b>Choix du paramètre à surveiller</b>   | 84        |
| <b>2.9.3</b>   | <b>Types d'indicateurs</b>   | 85        |
| <b>3.9.4</b>   | <b>La sensibilité</b>  | 86        |
| <b>3.9.5</b>   | <b>Les points de mesurage</b>  | 86        |
| <b>3.10</b>  | <b>Conclusion</b>  | <b>86</b> |
| <br><b>CHAPITRE 4 : SURVEILLANCE ET DIAGNOSTIC DU VENTILATEUR R1S07 PAR ANALYSE VIBRATOIRE</b><br> |  |           |
| <b>4.1</b>   | <b>Introduction</b>  | 87        |
| <b>4.2</b>   | <b>Application de l'analyse vibratoire à un ventilateur zone cru (cas de la Cimenterie d'Elmalabiod)</b> | 91        |
| <b>4.2.1</b>   | <b>Suivi vibratoire du ventilateur R1S07</b>   | 93        |
| <b>4.3</b>   | <b>Méthode de détection des défauts des réducteurs (palier, roulement, dent)</b>                         | 94        |
| <b>4.3.1</b>   | <b>Comportement vibratoire après l'incident</b>  | 96        |
| <b>4.3.2.</b>  | <b>Première Analyse</b>  | 96        |
| <b>4.3.2.1</b>   | <b>Deuxième Analyse</b>  | 97        |
| <b>4.4</b>   | <b>Application à l'Etude du Ventilateur RS107</b>  | 97        |
| <b>4.4.1</b>   | <b>Matériel et méthodes</b>  | 97        |
| <b>4.4.2</b>   | <b>Configuration des points de mesure</b>  | 99        |
| <b>4.4.3</b>   | <b>Discussion des résultats</b>  | 100       |
| <b>4.4.3.1</b>   | <b>Points de mesure sur moteur</b>   | 100       |
| <b>4.4.3.2.</b>  | <b>Les paliers du ventilateur</b>  | 104       |
| <b>4.5</b>   | <b>Conclusion</b>  | 108       |
| <b>4.6</b>   | <b>Recommandations</b>   | 109       |
|  | <b>CONCLUSION GENERALE</b>   |           |
|  | <b>BIBLIOGRAPHIE</b>   |           |
|  | <b>ANNEXES</b>   |           |

# Introduction générale

---

Avec l'ouverture du marché, la problématique de l'entreprise est d'être compétitive dans les meilleures conditions de production, de bien être des salariés, de qualité, de cout et des délais les plus courts pour satisfaire sa clientèle. Malheureusement, l'altération par les arrêts non programmés des équipements industriels perturbés par des dysfonctionnements affectent les conditions suscitées. Pour remédier à ce fléau de dysfonctionnement, des méthodes et des moyens de maintenance sont développés afin de permettre d'évaluer les conditions de production et d'augmenter la disponibilité des machines de production tout en préservant la santé et la sécurité des salariés. De plus, aujourd'hui le service de maintenance approche à connaitre l'état de santé de ses machines, à diriger la procédure d'exploitation vers les maillons les plus pénalisant dans l'entreprise, à améliorer la résolution des problèmes courants, à définir les recommandations nécessaires et à dresser les plans de maintenance appropriée. Désormais, les performances demandées aux équipements de production et les enjeux économiques associés amènent les utilisateurs de ces moyens de production à s'intéresser aux défaillances des matériels, à leurs conséquences et aux organisations qui en découlent. Désormais, pour optimiser les dépenses de ces enjeux et atteindre les attentes imposées par l'industrie, l'entreprise donne une grande importance aux composantes essentielles de la production : la sécurité et la maintenance et surtout la maintenance conditionnelle. De ce fait, quelle que soit l'activité et la taille de l'entité, la maintenance industrielle doit être au cœur de la gestion quotidienne de toute entreprise. En l'absence d'une gestion efficace de la maintenance c'est l'entreprise toute entière qui est mal gérée : la santé de l'entreprise c'est la santé dans l'entreprise.

Aujourd'hui, la maintenance est devenue un facteur de compétitivité et de pérennité décisive visant à répondre aux impératifs industriels à savoir améliorer la fiabilité des équipements et la qualité de ses produits tout en réduisant les coûts. C'est l'une des composantes stratégiques de toute entreprise. Désormais, les entreprises qui survivent et prospèrent sont celles qui ont su à chaque foi évaluer et repositionner leur maintenance pour s'adapter en permanence aux nouvelles conditions imposées par l'âge des matériels de production et la concurrence du marché. Là, les entreprises sont de plus en plus sensibles à l'importance et l'intérêt de la maîtrise des coûts induits par les défaillances accidentelles des systèmes de production. Afin de maintenir cette opportunité et mettre en place un système de gestion de maintenance performant, l'industrie algérienne avec des machines très anciennes, est amenée à évaluer son système existant par rapport à ce qu'il devrait l'être d'une part et prendre les décisions stratégiques prioritaires de maintenance qui s'imposent d'autre part, objectif de notre travail.

Or, comme l'économie Algérienne est dominée par le secteur de l'habitat et de la construction (logement social, autoroutes est-ouest, barrages, nouvelles villes, etc.), notre étude est axée sur la maintenance des équipements vitaux des unités fondamentales de l'industrie des ciments. Ces équipements, sont principalement les machines trains (compresseurs, pompes, turbomachines, moteurs, fours, broyeurs, concasseurs, etc.). Ils constituent les principaux maillons de la chaîne de production, voire l'économie de notre pays. Désormais, une maintenance mieux maîtrisée, c'est moins de dépenses pour causes d'accidents ou arrêt imprévu. C'est dans cette vision que ce travail a été mené.

Désormais, l'efficacité de la maintenance des systèmes industriels est un enjeu économique majeur pour leur exploitation commerciale. Les principales difficultés et sources d'inefficacité résident dans le choix des actions de maintenance à entreprendre au moment opportun surtout lorsque la machine joue un rôle vital dans le processus de production, cas de notre machine d'étude. Ces défauts peuvent s'avérer lourdes de conséquences. Ainsi pour éviter des arrêts de production imprévus et des retombés économiques considérables qui en découlent, il faut surveiller en permanence ces équipements et « traquer » tous les signes précurseurs de défauts avant qu'il ne soit trop tard. C'est le cas de l'industrie du ciment :

- Dispose de machines et d'installations complexes où latente de la casse n'est plus économique et les interventions systématiques sont souvent inutiles, coûteuses en pièces de rechange, main d'œuvre, perte de production et les erreurs qui peuvent découler durant les opérations de démontage et remontage des machines;

- Anciennes où les exigences de haute sécurité, la réduction des coûts d'exploitation et la maîtrise de la disponibilité de ces équipements s'imposent. Compte tenu des erreurs humaines inévitables, lors des arrêts et des remises en service, ces interventions peuvent nuire à la fiabilité des équipements et la sécurité du personnel, voire la pérennité de l'entreprise.

Pour atteindre ces objectifs, le travail de cette thèse est organisé autour de deux grandes questions: la première sert à évaluer la culture de sécurité du personnel en répondant à un questionnaire mis à leur disposition. Ainsi, arriver à déterminer l'influence de la politique de maintenance sur la sécurité des employés et d'obtenir des indications sur la perception des personnes sur l'importance et le management de la sécurité. La deuxième consiste au diagnostic des défaillances en appliquant la maintenance conditionnelle, en faisant appel à l'outil de surveillance par analyse vibratoire.

Le document présenté est constitué de 4 chapitres qui peuvent être résumés et évalués comme suit. :

Le chapitre 1 consiste à donner un aperçu général de la première partie du sujet de la thèse. Deux contributions sont attendues : d'une part appréhender les différents aspects de la gestion des risques, de la prévention de la santé de la sécurité du travail, puis l'évaluation des résultats d'un questionnaire fait dans différentes cimenteries de l'est Algérien. D'autre part une introduction décrivant le contexte maintenance (notamment les différentes formes de maintenance, la fonction méthodes et la stratégie de maintenance). Le chapitre se termine par les concepts de la sûreté de fonctionnement et une conclusion.

Le chapitre 2 consiste à la présentation des méthodes de diagnostic de défaillances étendue sur la fouille de textes. Il commence par des définitions, puis liste les différentes méthodes et modèles de diagnostic dans le domaine de la maintenance. Ensuite il décrit les méthodes de traitement de données. Il se termine par une conclusion sur les enjeux de défaillances. Ce chapitre offre un aperçu très large du domaine de diagnostic.

Le chapitre 3 décrit l'analyse vibratoire et présente les différents types des signatures vibratoires.

Il commence par décrire une vibration, types et caractéristiques des capteurs, le choix de l'emplacement de ces derniers sur des points significatifs de l'équipement en question. Ensuite, il explique comment utiliser les différentes analyses vibratoires, à savoir (l'analyse spectrale, l'analyse en niveaux global, en accélération et en vitesse, et l'analyse d'enveloppe ou bandes latérales). A la fin, on obtient une vue claire quant à la manière dont ces analyses peuvent montrer le changement de fonctionnement d'un équipement avec précision, et pouvoir faire un diagnostic juste tout en aboutissant à la cause probable de dysfonctionnement de la machine.

Le chapitre 4 est une application de la maintenance conditionnelle en faisant appel à l'outil de surveillance par analyse vibratoire. Ce chapitre commence par présenter l'état de l'équipement de commande du ventilateur à étudier avec une discussion à propos de mesures effectuées après un incident qui a touché l'équipement. Il se poursuit en décrivant d'autres mesures effectuées sur tous les composants de l'équipement de commande (moteur, réducteur et paliers). Ce chapitre se termine par une discussion des résultats de mesures suite à l'application des analyses des niveaux vibratoires globaux relevés en accélération, en vitesse et DEF, spectrale et d'enveloppe. L'objectif est de montrer l'utilisation de l'analyse vibratoire dans le domaine de la localisation des défaillances (diagnostic) et de l'anticipation ou de la prédiction des

éventuelles dégradations pouvant affecter un système et aussi l'identification des causes de ces défaillances.

Le travail est terminé par une conclusion dégagant des perspectives et des recommandations importantes pour l'entreprise.

# CHAPITRE 1

## CONCEPTES DE LA MAINTENANCE ET DE LA SECURITE

### 1. Introduction

Depuis des décennies, le mot sécurité prend de plus en plus d'espace dans le jargon utilisé. Tout particulièrement avec l'émergence du concept de système de management et l'arrivée des normes qui caractérisent la sécurité. Parallèlement, l'évolution du mot sécurité est marquée aussi par l'évolution des approches et techniques, parmi les premières tentations, nous trouvons la définition qui est largement répandue en industrie, qui considère la sécurité comme l'« aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques » (**Essehmoudi et Hammoumi, 2015**). Ainsi aujourd'hui, la maintenance est devenue un facteur de compétitivité et de pérennité décisive visant à répondre aux impératifs industriels, à savoir améliorer la fiabilité des équipements et la qualité de ses produits tout en réduisant les coûts (**Monchy, 2003**). C'est l'une des composantes stratégiques de toute entreprise. Désormais, les entreprises qui survivent et prospèrent sont celles qui ont su à chaque fois évaluer et repositionner leur maintenance pour s'adapter en permanence aux nouvelles conditions imposées par l'âge des matériels de production et la concurrence du marché.

**1.1. La fonction maintenance : l'émergence d'un besoin :** La maintenance est l'une des fonctions de l'entreprise, mais elle n'est pas une fin en soi. A ce titre, elle est peu lisible et parfois méconnue des décideurs qui sous-estiment son impact. Et pourtant, elle devient une composante de plus en plus sensible de la performance de l'entreprise. Il est donc important de la faire mieux connaître. Concevoir, produire et commercialiser sont des fonctions « naturelles » facilement identifiables et rarement négligées, à juste titre. Par contre, la maintenance n'est qu'un soutien à la production, son principal client. C'est donc une fonction « masquée », agissant comme prestataire de service interne et, de plus, fortement évolutive.

Bien organisée, elle est un facteur important de qualité, de sécurité, de respect des délais et de productivité, donc de compétitivité d'une entreprise évoluée : c'est incontestable après expérience, mais ce n'est pas évident de prime abord. C'est souvent « par défaut » que preuve est faite : le coût des conséquences d'une panne majeure, sa médiatisation parfois, joue un rôle

moteur dans la prise de conscience qu'on ne peut pas faire l'économie d'une maintenance efficace (**Monchy , 2003**).

L'automatisation accrue, la complexité et le coût croissant des équipements et par conséquent la nécessité de réduire les temps d'indisponibilité de ces derniers, donne à la maintenance une importance croissante (**Grusenmeyer , 2005a**). La maintenance constitue en effet une fonction essentielle des entreprises. On estime aujourd'hui qu'elle représente près de 3% du chiffre d'affaire annuel des industries françaises (soit 22 milliards d'euros) et plus de 250000 emplois (**Afim, 2007**).

**1.1.1. Qu'est ce que la maintenance :** Selon la norme FD X60-000 (**AFNOR, 2002a**), la maintenance est « l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise ». Cette définition peut être complétée par « bien maintenir, c'est assurer ces opérations au coût global optimal ».

Les actions de maintenance ne sont pas seulement techniques, elles sont par définition économiques et managériales. Ses actions se rapportent au cycle de vie d'un bien, ce qui implique une vision à moyen et long terme de la stratégie de maintenance (**Villemeur, 1988**)

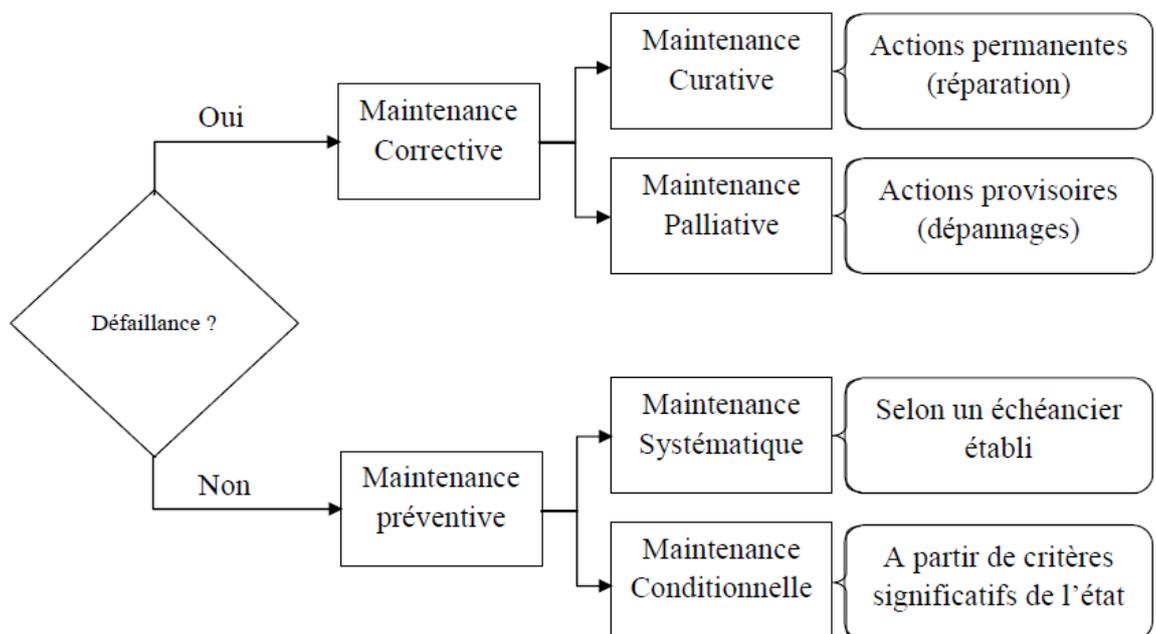
**1.1.2. De l'entretien (*un mal nécessaire*) à la maintenance (*source de profits*):** « *L'entretien est une nécessité que le producteur subit et que le financier trouve coûteuse* ». Depuis une vingtaine d'années, la maintenance a acquis ses lettres de noblesse et n'est plus considérée comme un mal nécessaire. L'entretien, se résume aux actions physiques apportées aux moyens de production pour assurer leur disponibilité, selon les critères définis par la politique maintenance. Il existe une distinction entre la maintenance et l'entretien, autrement dit, la maintenance est l'optimisation des paramètres de l'entretien. Si l'entretien d'hier n'était pas considéré comme productif, la maintenance d'aujourd'hui le devient (**FrancasteL, 2005**).

On peut faire du sous-entretien ou du sur-entretien. Dans un cas, la démarche conduira à une dégradation prématurée des équipements, dans l'autre cas le surplus d'interventions inutiles conduira à un gaspillage financier pour l'entreprise. On peut considérer désormais que « la maintenance devient une activité productive et non une charge pour l'entreprise. Maintenir c'est assurer la disponibilité de la production, donc l'assurance de la quantité, mais également la qualité » (**Souris, 1993**).

Face aux marchés concurrentiels, les entreprises sont de plus en plus conscientes de l'enjeu économique que représente la maintenance, et en particulier celle des outils et équipements de production (Mouss et al, 2003).

La maintenance est désormais considérée comme une source de productivité et un pilier de l'activité industrielle. Elle peut en effet contribuer à limiter les prix de revient par la diminution des arrêts et l'augmentation de la disponibilité des équipements, et ainsi augmenter la productivité, la continuité et la qualité de la production (DE Groote, 1993).

**1.1.3. Différentes formes de maintenance :** Deux grandes classes de maintenance ont été défini par les experts et ceci selon la présence de défaillance: La maintenance corrective (en présence de défaillance) et la maintenance préventive (en absence de défaillance) comme illustré sur la figure 1.



**Figure1 : Types de maintenances et évènements associés (Razafindrazato, 2010)**

**A. La maintenance corrective :** Dans le projet de norme CEN WI 319-003, la maintenance corrective est définie ainsi : « maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise ». Elle peut être « différée » si « elle n'est pas exécutée immédiatement après la détection d'une panne, mais est retardée en accord avec des règles de maintenance données ». Elle peut être « d'urgence » si « elle est exécutée sans délai après détection d'une panne afin d'éviter des conséquences inacceptables » (Monchy, 2003).

- **La maintenance est acceptée**, lorsque la recherche permanente du meilleur rapport usage/coût, conduit à accepter la défaillance d'un équipement, avant d'envisager des actions de maintenance. Cette maintenance peut être légitime pour les équipements de criticité mineure ou nulle.

- **La maintenance est palliative**, lorsque l'action corrective est destinée à permettre à l'équipement d'accomplir provisoirement tout ou partie de la fonction requise.

- **La maintenance est curative**, lorsque l'action de maintenance corrective a un caractère permanent et a pour objet de rétablir l'équipement dans un état spécifié pour lui permettre d'accomplir une fonction requise (AFNOR, 2002a).

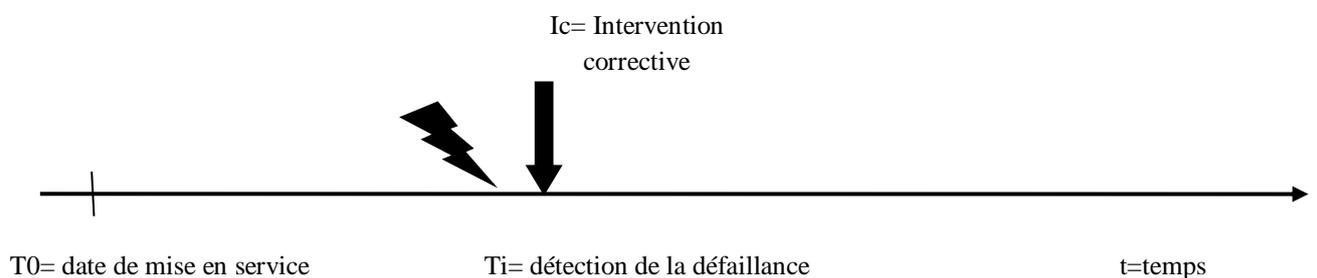


Figure 2 : La maintenance corrective (AFNOR, 2002a)

**B. La maintenance préventive :** Dans la définition de la maintenance préventive, nous incluons l'ensemble des contrôles, visites et interventions effectuées préventivement. La maintenance préventive s'oppose en cela à la maintenance corrective déclenchée par des perturbations ou par les événements, et donc subie par la maintenance.

La maintenance préventive comprend :

- Les contrôles ou visites systématiques,
- les expertises, les actions et les remplacements effectués à la suite de contrôles ou de visites,
- les remplacements systématiques,
- la maintenance conditionnelle ou les contrôles non destructifs. (Heng, 2003)

$I_p$  = Intervention préventive

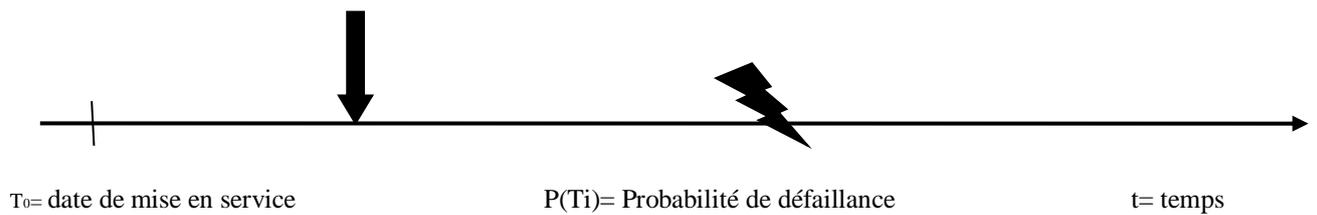


Figure 3 : La maintenance préventive (AFNOR, 2002a)

- **Cette maintenance est systématique**, si elle est effectuée selon un échéancier établi ou selon le temps écoulé ou le nombre d'unités produites, mais sans contrôle préalable de l'état de l'équipement.
- **Cette maintenance est conditionnelle**, lorsqu'elle est subordonnée à un type d'évènement prédéterminé (résultat d'une analyse des huiles, mesure d'une vibration etc.).
- **Cette maintenance est prévisionnelle**, lorsqu'elle est exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien. (AFNOR, 2002a).

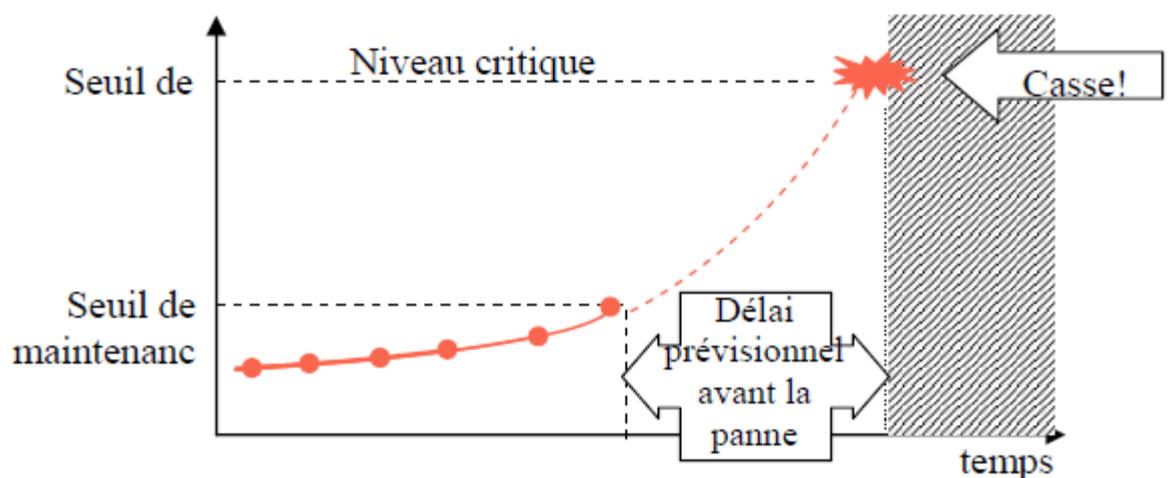


Figure 4 : La maintenance conditionnelle (intervention seuil d'urgence) (Belhour, 2008)

Elle se rapporte au suivi par mesures périodiques d'une dégradation jusqu'au seuil d'alarme qui déclenche une intervention préventive conditionnelle

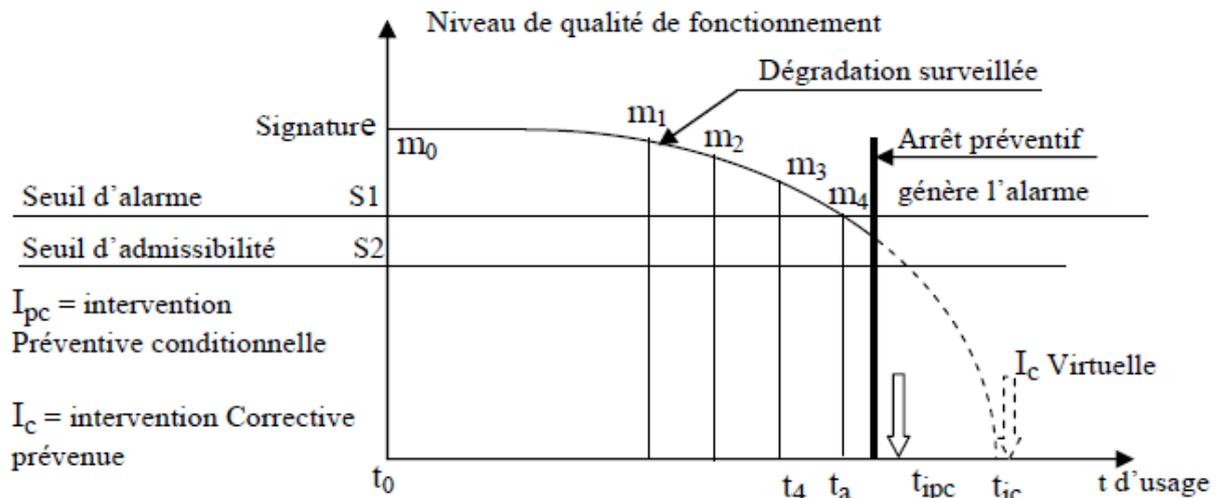


Figure 5 : Principe de la maintenance conditionnelle (Monchy, 2000)

Le schéma suivant illustrera mieux la différence entre ces deux méthodes de maintenance préventive (systématique et conditionnelle) :

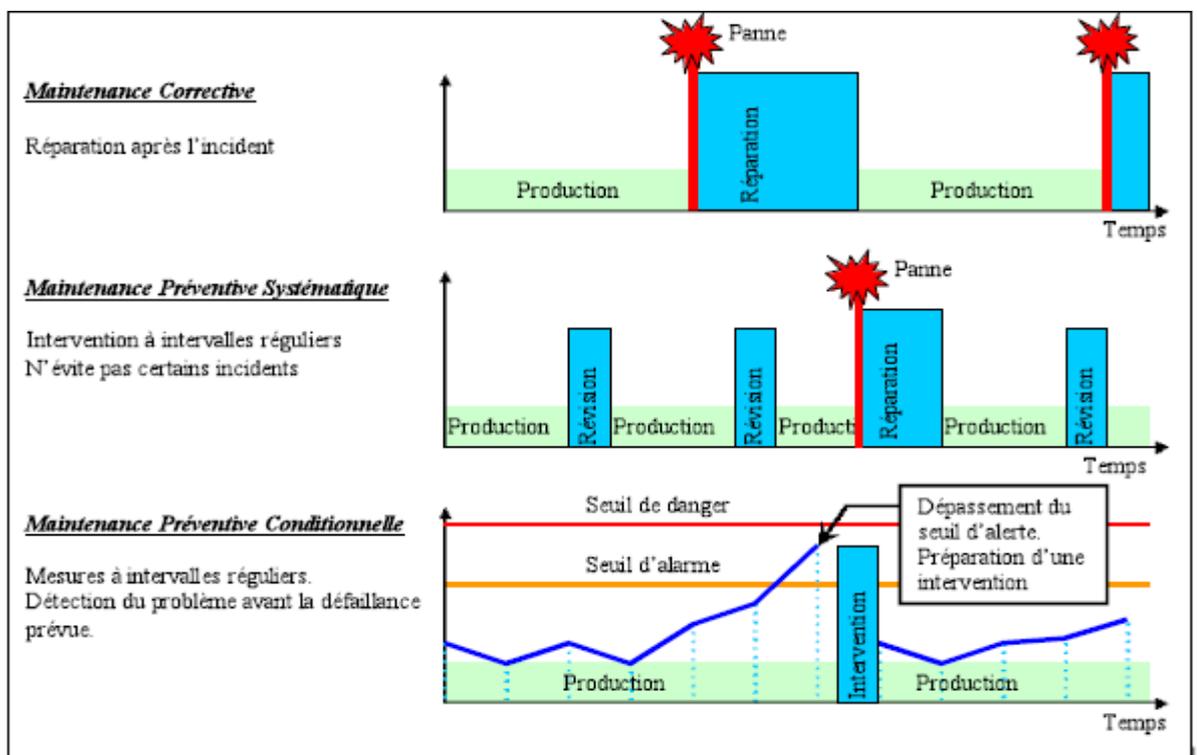


Figure 6 : Comparaison des différentes formes de maintenance (hubeirfaigner,2017)

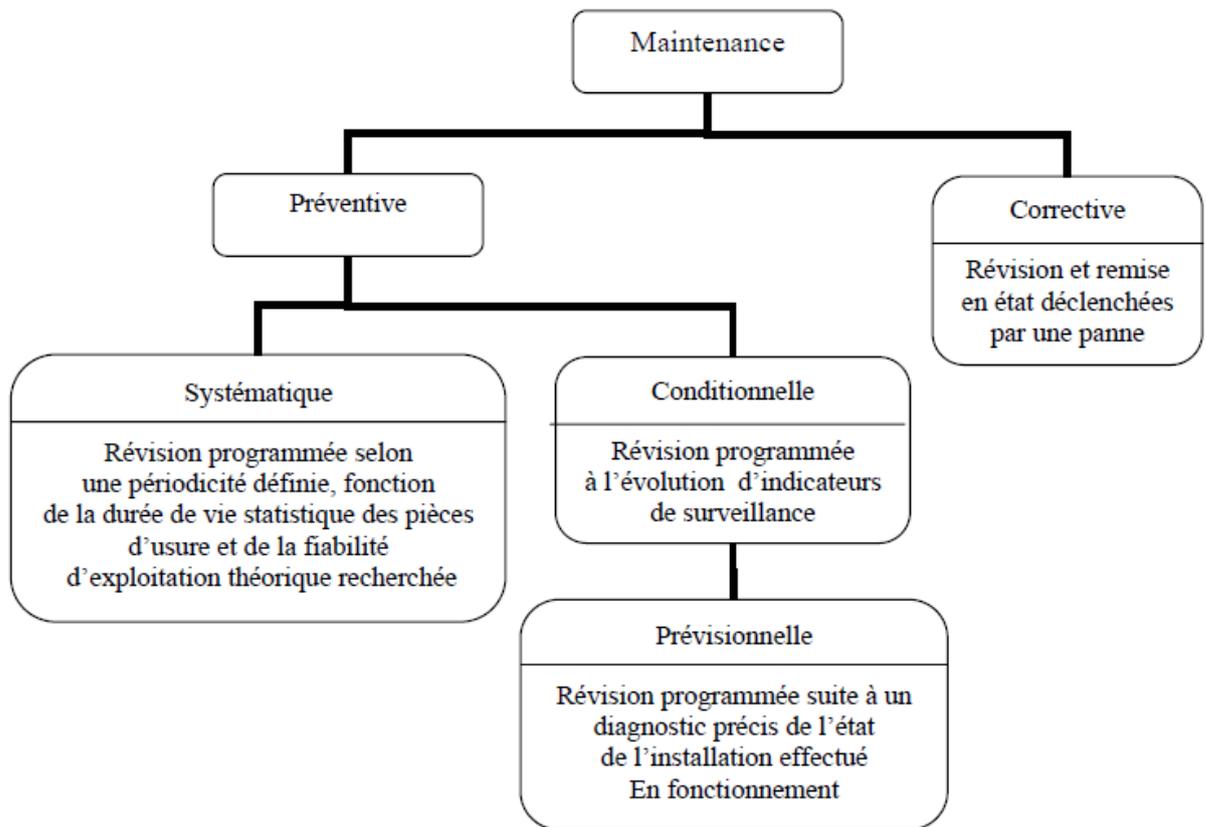


Figure7 : Les stratégies de maintenance ( Boulenger & Pachaud,1998)

**1.1.4. La fonction maintenance :** La mission principale de la fonction maintenance est le maintien par des actions préventives et correctives de la disponibilité de l’outil de production; c’est-à-dire de son aptitude à accomplir une fonction requise, dans des conditions d’utilisation données, pendant une période donnée (AFNOR, 2002a). Autrement dit, la mission principale de la maintenance est la gestion optimisée des équipements de production en fonction des objectifs propres à l’entreprise.

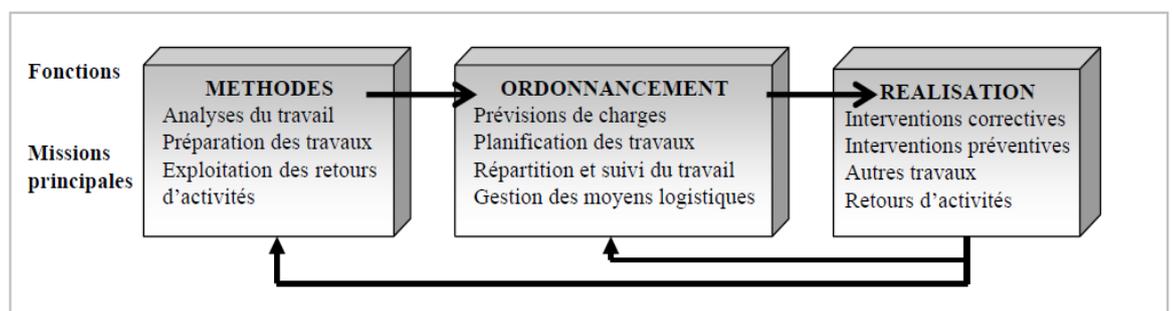


Figure 8 : Les trois fonctions opérationnelles de la maintenance (Monchy , 2003)

**1.1.5. La fonction méthodes :** La préparation est la vocation première des services méthodes. Pour la maintenance corrective, la préparation passe par l'anticipation des risques encourus, puis par une anticipation des problèmes qui peuvent freiner l'intervenant.

Pour la maintenance préventive, elle consiste à définir le plan de maintenance d'un équipement, puis à évaluer son coût et son efficacité afin de les optimiser.

Pour la maintenance externalisée, la préparation consiste à définir les règles et les procédures destinées au prestataire choisi, puis « d'accompagner » le prestataire lors de ces travaux sur site.

D'autres activités sont généralement confiées au service méthode, à savoir :

- Propositions d'améliorations techniques et/ou organisationnelles ;
- Assistance technique sur site - soutien aux intervenants sur site - aide au diagnostic.

**1.1.6. La fonction ordonnancement :** La fonction ordonnancement est le chef d'orchestre de la maintenance. Elle a la responsabilité de la synchronisation des actions de maintenance internes ou externalisées. Les missions principales de l'ordonnancement sont la planification des travaux, l'optimisation des moyens en fonction des délais et chemins critiques, et le contrôle de l'avancement des travaux. Cela peut s'exprimer sous la forme : prévoir à l'instant  $t$  et un endroit  $x$  où un personnel  $p$  muni d'un outillage  $o$  et des matières  $m$  exécutera la tâche  $M$  en harmonie avec les autres travaux connexes.

La difficulté principale de l'ordonnancement vient du caractère fortuit de la panne : comment intégrer les dépannages à un planning ? Certains services de maintenance prétextent cette contradiction pour ne pas ordonnancer leurs activités, si 90% de leurs activités sont fortuites, ils ne peuvent guère faire autrement. Mais si grâce à une politique de prévention, ce taux passe à moins de 50% ce fortuit devient programmable.

**1.1.7. La fonction réalisation des interventions :** La fonction réalisation a pour objet d'utiliser les moyens mis à disposition, suivant les procédures imposées, dans les délais préconisés, pour réaliser dans les règles de l'art, une tâche définie et remettre le matériel dans un état spécifié (Monchy, 2003).

La réalisation peut nécessiter un diagnostic c'est-à-dire identifier et caractériser la défaillance.

**1.1.8 .Management de la maintenance :** Les personnes responsables du management de la maintenance ont pour mission de piloter toutes les actions qui concourent à atteindre aux meilleures conditions techniques et économiques, les buts et objectifs qui leurs sont définis par la direction en matière de coûts, qualité, sûreté de fonctionnement, fiabilité, maintenabilité, disponibilité, sécurité, environnement, etc.

Responsable de l'état de conservation du matériel, la maintenance ne peut parachever sa vision à long terme que si elle n'est pas en état de dépendance hiérarchique et budgétaire par rapport à la production.

**1.1.9. Politique de maintenance :** La politique de maintenance fixe les orientations (méthode, programme, budget etc.) selon les objectifs fixés par la direction. Les activités de maintenance ont un effet de levier important sur la disponibilité des équipements de production de biens, la qualité du service ou du produit, le coût d'exploitation comprenant en particulier les coûts de maintenance optimums (**DE Groote, 1993**).

Les contraintes à faire respecter et les objectifs à atteindre concernent généralement la sécurité des biens et des personnes, la préservation des équipements et leur durée de vie jusqu'à leur obsolescence, ainsi que la préservation de l'environnement.

Ces exigences, performances et contraintes peuvent être contradictoires et les objectifs ne peuvent être que le résultat d'un compromis. C'est donc à partir de celui-ci que les activités de maintenance sont définies et planifiées (**Pellegrin, 1997**)

La politique de maintenance conduit en particulier à faire des choix entre :

- maintenance préventive et/ou corrective, systématique ou conditionnelle ;
- maintenance internalisée ou externalisée.

**1.1.10. Stratégies de maintenance :** La stratégie de maintenance est l'ensemble des décisions qui conduisent à définir le portefeuille d'activité de la maintenance et conjointement, à organiser structurellement le système pour y parvenir dans le cadre de la mission impartie (objectifs techniques, économiques et humains).

**1.1.11. La méthode MBF Maintenance Basée sur la Fiabilité :** La MBF correspond à une politique de maintenance qui identifie d'abord les matériels critiques dont les conséquences des défaillances sont importantes pour les objectifs de l'entreprise (sécurité, disponibilité, coûts, maintenabilité, qualité, etc.). La maintenance MBF a pour objectif d'éviter l'apparition de défaillances dont les effets se répercutent en termes de coûts directs et indirects pour l'entreprise. Une condition insatisfaisante peut aller de la complète incapacité d'un élément à remplir les fonctions voulues à des signes physiques indiquant qu'il est sur le point d'être défaillant. par , pour les objectifs de la maintenance basée sur la fiabilité, on doit classer les défaillances soit comme défaillances fonctionnelles, soit comme défaillances potentielles.

L'intérêt de la MBF, à condition de respecter l'esprit et la méthodologie des normes MSG-3 est de donner un cadre précis et des règles pour établir un programme de maintenance à l'aide d'une méthode d'analyse structurée et rationnelle qui complète l'action des experts des matériels. En effet, chaque mode de défaillance fonctionnelle et sa criticité sont analysés de

manière systématique ; les raisons qui conduisent à préférer tel type de tâche de maintenance sont explicitées formellement (Zwinglestein, 1996).

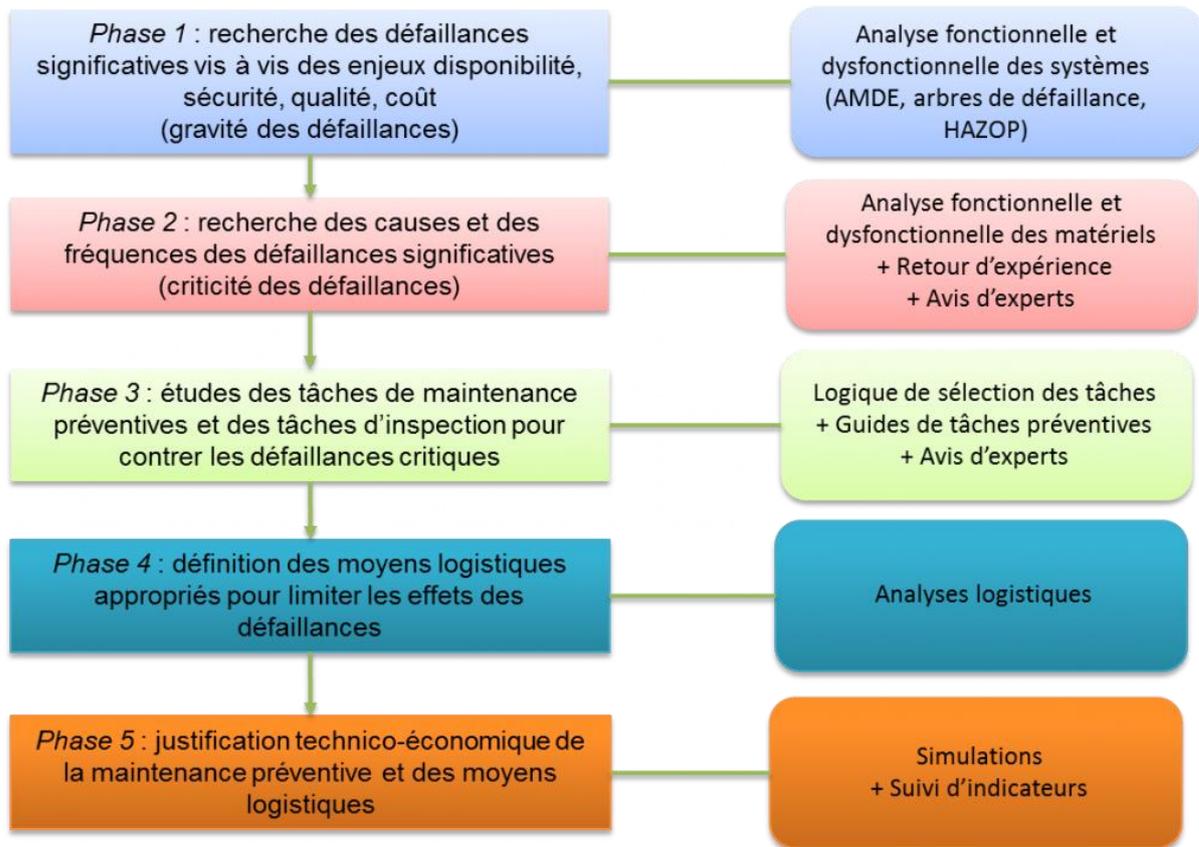
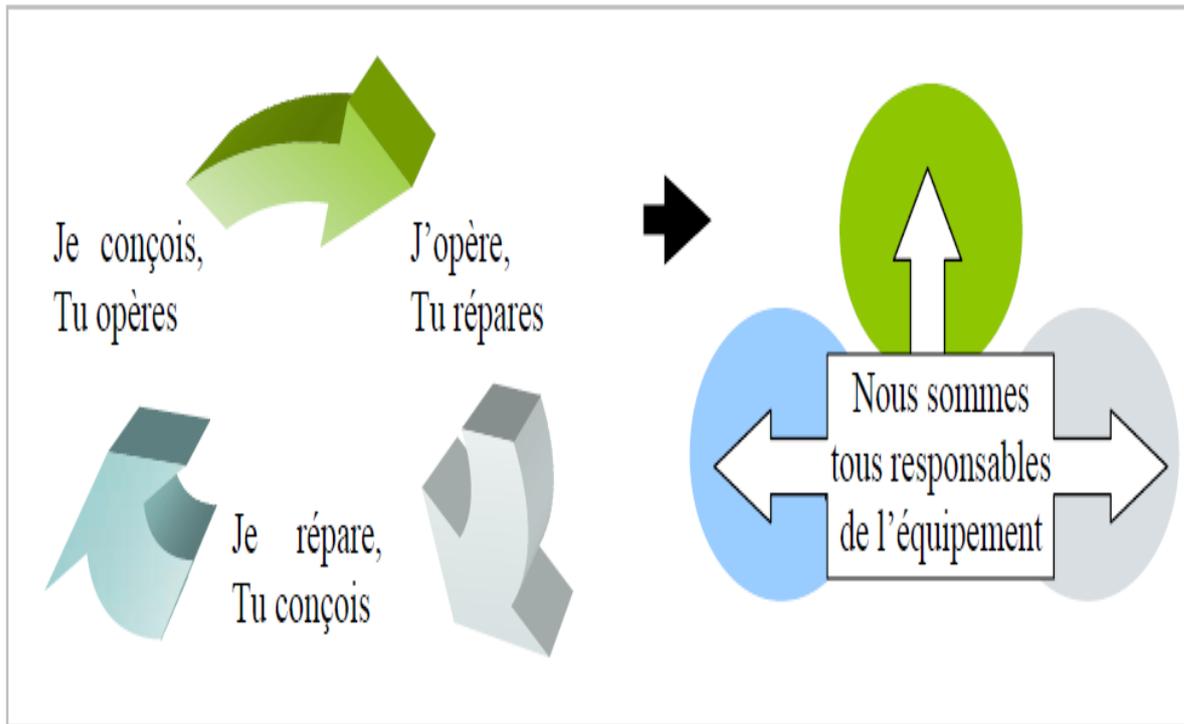


Figure 09: Différentes phases d'une étude MBF (Anonyme, 2011)

**1.1.12. La stratégie TPM Total Productive Maintenance** : Née au Japon dans les années 70, la TPM fut largement diffusée par le *Japanese Institute of Plant Maintenance*. La stratégie TPM est fondamentalement un élargissement du rôle de la maintenance à la totalité du personnel c'est-à-dire la participation de tous les services notamment ingénierie, production, maintenance et tous les niveaux hiérarchiques, des dirigeants aux opérateurs. Elle s'inscrit dans les stratégies fondamentales du juste à temps (zéro panne, zéro stock, zéro délai etc.).



**Figure 10 : De l'ancienne attitude vers l'attitude Total Productive Maintenance (Monchy , 2003)**

La TPM permet de passer d'un système où les fonctions et responsabilités envers les équipements sont très délimitées, à un système où les responsabilités sont partagées.

La TPM est définie par Renault comme la recherche permanente de l'amélioration des performances des équipements de production avec une implication concrète au quotidien par tous les acteurs.

La TPM permet de passer d'un système où les fonctions et responsabilités envers les équipements sont très délimitées, à un système où les responsabilités sont partagées **Bufferne, 2006)**

La TPM est définie par Renault comme la recherche permanente de l'amélioration des performances des équipements de production avec une implication concrète au quotidien par tous les acteurs.

**1.1.13 .La stratégie LCC Life Cycle Cost :** Issues d'un concept développé initialement au Royaume Uni dans les années 70, ces stratégies cherchent à considérer l'impératif de maintenance sur l'ensemble du cycle de vie de l'équipement. Plus précisément, le LCC désigne la somme du coût d'investissement de l'équipement, des coûts cumulés d'utilisation sur la vie de l'équipement, des coûts cumulés de maintenance en fonction d'une politique donnée ainsi que des coûts liés à l'élimination de l'équipement (**Dhillon , 1989)**

**1.2. Le concept de sécurité au travail :** Le deuxième concept auquel nous nous intéressons est la sécurité. La notion de sécurité s'applique à des domaines très variés. Elle peut être relative aux actes de vandalisme, d'intrusion ou d'agression (sécurité dans le métro, sécurité et surveillance, sécurité informatique, sécurité nucléaire, etc.). Elle peut également avoir une connotation sociale (sécurité de l'emploi, sécurité sociale, etc.) ou territoriale (sécurité nationale, sécurité intérieure, etc.). Pour distinguer ce type de sécurité les anglo-saxons utilisent d'ailleurs le terme spécifique de Security (**Gayon, 2001**). D'autres aspects de la sécurité sont rassemblés en anglais sous le terme safety. Ils peuvent concerner par exemple la fiabilité des moyens de transports (sécurité routière, sécurité aérienne, sécurité ferroviaire) ou encore la fiabilité des produits consommés (sécurité sanitaire, sécurité alimentaire). La sécurité dont il est ici question est celle liée aux activités industrielles.

Ainsi, la sécurité des machines assure la sécurité juridique du fabricant et de l'exploitant. De ce fait, l'amélioration de la sécurité et la réduction des accidents du travail constituent pour des raisons à la fois éthiques, économiques et juridiques une préoccupation majeure des législateurs et des industriels. Les utilisateurs de machines attendent qu'on leur propose exclusivement des machines et des appareils sûrs, et ce, partout dans le monde. Parallèlement, il existe partout dans le monde des règles visant à protéger les utilisateurs de machines. Ces règles varient d'une région à une autre. Cependant, elles sont largement unanimes sur les procédés imputables au fabricant pour la construction et la modernisation de machines :

- Lors de la construction de machines, le fabricant doit procéder à une évaluation des risques (également appelée analyse des risques ou étude de risque) pour identifier et évaluer tous les risques et points dangereux possibles.

- En fonction de cette évaluation des risques, le fabricant de la machine doit éliminer ou réduire le risque par des mesures adéquates. Si le risque ne peut être éliminé par des mesures structurelles ou si le risque résiduel n'est pas tolérable, le fabricant de la machine doit sélectionner et utiliser des équipements de protection adéquats et, le cas échéant, informer l'utilisateur des risques résiduels.

- Pour s'assurer que les mesures prévues sont efficaces, une validation globale est obligatoire. Cette validation globale doit évaluer les mesures structurelles aussi bien que techniques ainsi que les mesures d'organisation dans le contexte.

La sécurité est un besoin fondamental de l'homme. La réduction des accidents du travail dépend de la sécurité des machines et des installations. Elle procède également des hommes, de

leur implication, de leur formation professionnelle. L'objectif est donc le suivant : les opérateurs et le personnel de maintenance doivent pouvoir faire confiance à la sécurité d'une machine !

Les décideurs de l'industrie sont responsables de leurs salariés ainsi que d'une production rentable et efficace. C'est seulement si l'encadrement place la sécurité au sommet de ses préoccupations quotidiennes que le reste du personnel ne s'opposera pas au sujet. Désormais, la sécurité des machines dépend en grande partie de l'application correcte des directives et des normes.

### **1.2.1. Quelles sont les obligations du fabricant des machines ?**

- **Concevoir des machines sûres** : Les fabricants sont tenus de concevoir leurs machines de manière à respecter les principes de sécurité et de santé de la Directive Machines. Les fabricants doivent tenir compte de l'intégration de la sécurité dès la construction des machines. En pratique, cela signifie que le constructeur doit effectuer une évaluation des risques dès la phase de conception d'une machine. Les mesures en résultant peuvent être intégrées directement à la construction.

- **Élaborer une notice d'instructions** : Le fabricant des machines doit élaborer un manuel d'utilisation appelé « notice d'instructions originale ». Chaque machine doit être accompagnée d'une notice d'instructions dans la langue officielle du pays d'utilisation. Cette notice peut être soit la notice d'instructions originale, soit une traduction de cette notice, auquel cas la notice originale doit également être fournie.

- **Élaborer un dossier technique** : Le fabricant des machines doit élaborer un dossier technique. Ce dossier doit :

- ✓ doit contenir tous les plans, calculs, protocoles de contrôle et documents pertinents pour le respect des principes de sécurité et de santé de la Directive Machines ;
- ✓ doit être conservée pendant au moins 10 ans après le dernier jour de fabrication de la machine (ou du type de machine) ;
- ✓ doit être fourni aux autorités sur demande justifiée.

**1.2.2. Les différentes étapes pour une machine sûre Évaluation des risques** : Lors de la conception d'une machine, les risques possibles doivent être analysés et, si nécessaire, des mesures doivent être prévues pour protéger les opérateurs des risques existants.

Pour assister le fabricant de machines dans cette tâche, les normes définissent et décrivent le processus d'évaluation des risques. Une évaluation des risques est une suite d'étapes logiques

permettant l'analyse et l'évaluation systématiques des risques, (figure11). La machine doit être conçue et construite en tenant compte des résultats de l'évaluation des risques.

Lorsque c'est nécessaire, l'évaluation des risques est suivie d'une réduction des risques, étape au cours de laquelle des mesures de protection adéquate sont mises en œuvre. L'application de mesures de protection ne doit pas générer de nouveaux risques. Il peut être nécessaire de répéter tout le processus d'évaluation et de réduction des risques pour éliminer autant que possible les dangers et réduire suffisamment les risques identifiés.

De nombreuses normes présentent l'évaluation des risques en fonction de la machine et des applications. Lorsqu'aucune norme n'est applicable ou si les normes existantes sont insuffisantes, on peut utiliser les informations d'autres normes.

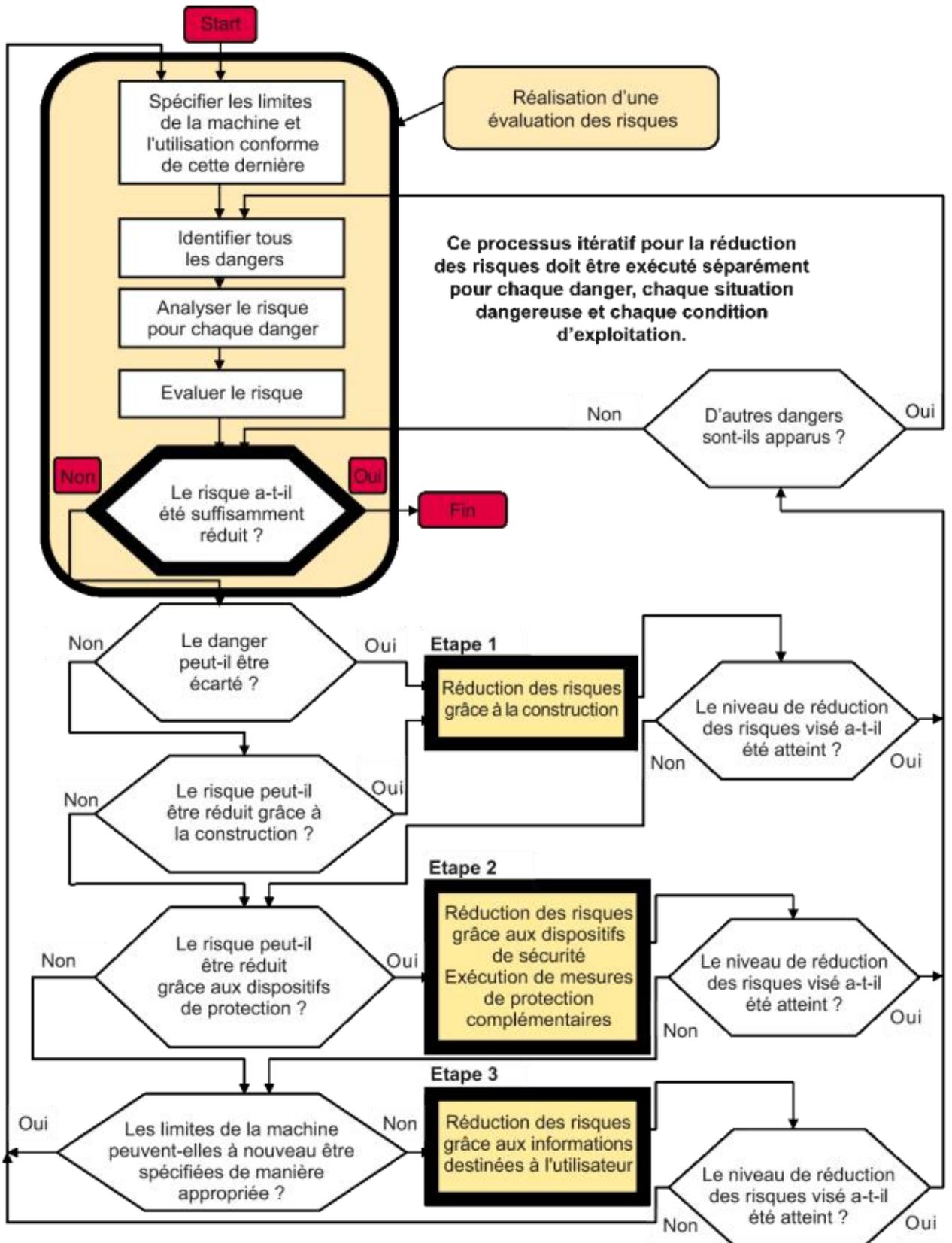


Figure11 : Processus itératif pour la réduction des risques selon EN ISO 12100-1 ( ISO 12100,2010)

### **Attention :**

- Le processus doit être appliqué à tous les dangers. Il doit être répété (processus itératif) tant que le risque résiduel n'est pas réduit à un niveau acceptable.
- Les résultats de l'évaluation des risques et la procédure appliquée doivent être consignés dans le dossier technique.

L'évaluation des risques commence en définissant les fonctions de machine. Il peut s'agir :

- des spécifications de la machine (ce qu'elle produit, sa productivité maximale, les matières premières prévues) ;
  - de son encombrement et du lieu d'installation prévu ;
  - de sa durée de vie prévue ;
  - des fonctions et modes de fonctionnement souhaités ;
  - des dysfonctionnements et défaillances à prévoir ;
  - des personnes prenant part au processus de la machine ;
  - des produits associés à la machine ;
  - de l'usage correct mais aussi des comportements inopinés des opérateurs ou des mauvaises utilisations raisonnablement prévisibles (abus) de la machine ;
- **Mauvaise utilisation prévisible :** Exemples de comportements inopinés raisonnablement envisageables des opérateurs ou de mauvaises utilisations prévisibles :
  - perte de contrôle de l'opérateur sur la machine (en particulier pour les machines tenues à la main ou mobiles) ;
    - comportement réflexe de personnes en cas de dysfonctionnement, de défaillance ou de panne pendant l'utilisation de la machine ;
    - comportement erroné par manque de concentration ou d'attention ;
    - comportement erroné dû à l'exécution d'une tâche sur le principe du « chemin de moindre résistance » ;
    - comportement lié à la pression de maintenir la machine en service à tout prix ;
    - comportement de groupes de personnes spécifiques (par ex. enfants, jeunes, personnes handicapées)
- **Dysfonctionnements et défaillances à prévoir :** Les dysfonctionnements et défaillances des composants nécessaires aux fonctions de la machine (en particulier du système de commande) génèrent un fort potentiel de danger. Exemples :
  - changement de direction de laminage (mains happées) ;
  - déplacement du robot hors de sa zone de travail habituelle.

Une fois les fonctions de la machine définies vient l'étape la plus importante de l'évaluation des risques. Il s'agit de procéder à l'identification systématique des dangers, situations dangereuses et/ou événements dangereux prévisibles, tableau 1.

**Tableau 1 : Situations dangereuses et/ou événements dangereux prévisibles**

| <b>Dangers à prendre en considération par le fabricant</b>                                       | <b>Dans toutes les phases de durée de vie des machines</b> |
|--|--|
| <b>Dangers mécaniques</b>  | <b>Transport, assemblage et installation</b>               |
| <b>Dangers électriques</b>   | <b>Mise en service</b>                                     |
| <b>Dangers thermiques</b>  | <b>Réglage</b>   |
| <b>Dangers dus au bruit</b>  | <b>Fonctionnement normal et dépannage</b>                  |
| <b>Dangers dus aux oscillations</b>  | <b>Maintenance et dépannage</b>                            |
| <b>Dangers dus au rayonnement</b>  | <b>Mise hors service, démontage et élimination</b>         |
| <b>Dangers dus aux matériaux et aux substances</b>   |  |
| <b>Dangers dus à la négligence des principes ergonomiques lors de la conception des machines</b> |  |
| <b>Dangers de glissade, faux pas et chute</b>  |  |
| <b>Dangers liés à l'environnement d'utilisation de la machine</b>                                |  |
| <b>Dangers résultants de combinaison des dangers ci-dessus</b>                                   |  |

**1.2.3. Quelques définitions de la sécurité :** Face aux dommages qu'a vécu le monde industriel, il est apparu nécessaire de se reposer la question des enjeux de la sécurité industrielle à moyen et long terme et d'identifier les enjeux technologiques qui y sont associés. La sécurité industrielle est une notion plus ou moins bien perçue selon le secteur industriel et la taille des industries considérées (**Digitip, 2003**)

**1.2.4. Stratégie d'analyse des risques :** L'élimination des risques ou leur réduction sous un seuil acceptable ne peut se faire au premier abord de la situation de travail que si toutes les compétences et tous les moyens sont à priori disponibles. Cependant, le nombre de facteurs de risques et le nombre de situations de travail sont à ce point grands qu'il serait utopique et impossible de vouloir les étudier tous et toutes, a priori, en détail.

**1.2.5. L'intérêt d'une stratégie de prévention des risques**

- Mettre en place une gestion dynamique des risques permettant de diminuer les risques d'accidents et de maladies professionnelles et les couts importants qui y sont associés, et

de parvenir à un meilleur fonctionnement de l'entreprise et un meilleur bien-être du personnel.

- Instaurer dans l'entreprise une culture participative tout en tenant compte des limites de chacun, afin de donner la possibilité aux membres du personnel de devenir les véritables acteurs de leur prévention et de celle de leurs collègues.
- Se mettre en conformité avec la loi sur le bien-être au travail qui demande qu'une analyse des risques soit réalisée pour tout le personnel. En cas de non respect de la réglementation, des sanctions civiles et pénales peuvent être infligées aux dirigeants des entreprises et à ceux qui les secondent.

**1.2.6. Méthodes d'analyse :** La plupart des méthodes d'analyse des risques considèrent le risque comme un événement non désiré ou une défaillance survenant dans le fonctionnement des installations et de leurs équipements techniques. Elles prennent en considération les facteurs (de risque) qui peuvent affecter en terme de dysfonctionnement ou de problème ou encore d'erreur humaine les aspects suivants des systèmes de travail :

- i. la fiabilité du système, c'est-à-dire le non défaillance (F) ;
- ii. la maintenabilité, c'est-à-dire l'aptitude à la réparation, la poursuite du fonctionnement du système lors d'activités de maintenance (M) ;
- iii. la disponibilité, c'est-à-dire l'aptitude à l'emploi, à la production. C'est le résultat de F.M ;
- iv. la sécurité, c'est-à-dire la non- création de dommage à l'homme, à l'environnement, à l'installation, au public ;
- v. la capacité, c'est-à-dire la performance du système en terme de production, de consommation d'énergie et d'inputs.

Dans un certain nombre de cas, ces méthodes donnent l'apparence d'être orientées sur la protection des travailleurs, alors qu'en fait ce sont les aspects de fiabilité, de maintenabilité, et disponibilité du système qui sont visés et qui sont l'objectif premier de la démarche. Il suffit d'examiner les mesures de prévention proposées, elles visent essentiellement à rencontrer les exigences de sécurité et de sûreté des systèmes de travail. Ces méthodes lorsqu'elles sont utilisées doivent être complétées par l'étude des conséquences et des effets en terme de dommage que les événements non souhaités que peuvent produire sur les travailleurs. Cela implique surtout l'identification de tous les facteurs de risque, l'examen de leur variabilité et l'impact de cette variabilité sur le risque.

Le problème est le suivant : il n'existe pas de méthode universelle et il n'y'a pas non plus de solution toute faite pour les problèmes en matière d'analyse des risques. Les méthodes existantes ont chacune leur spécificité. En outre elles ne sont pas clairement délimitées : il existe des variantes et des combinaisons de méthodes (Tazi, 2008)

Pour Dauphiné le risque est le produit d'un aléa et d'une vulnérabilité.

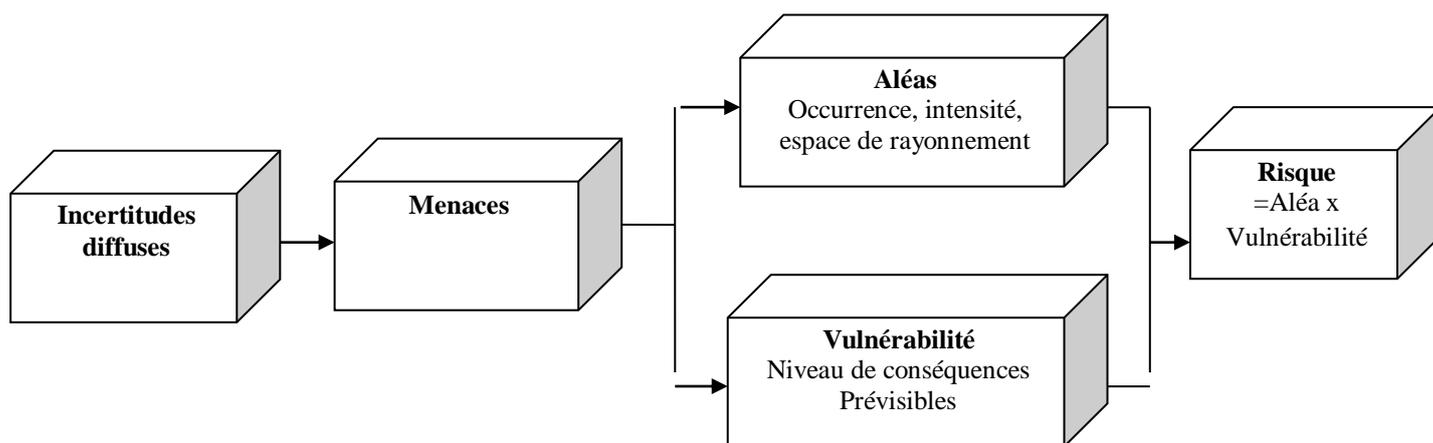


Figure12 : Risque = Aléa X Vulnérabilité (Dauphine, 2001)

L'aléa représente un évènement exprimé par sa probabilité d'occurrence, ainsi que la mesure de son intensité, de sa durée et de son espace de rayonnement.

La vulnérabilité représente les conséquences visibles d'un évènement vis-à-vis des enjeux de la sécurité, de maintien de patrimoine.

Dans la norme **ISO 73 (2002)**, le risque est défini comme la combinaison de la probabilité de survenue d'un évènement et de ses conséquences et qui reprend l'idée de **Villemeur (1988)** selon laquelle le risque est la mesure d'un danger associant une mesure de l'occurrence d'un évènement indésirable et une mesure de ses effets ou conséquences. Selon **Watel (2001)** à chaque risque est associé des facteurs de risque dont la présence accroît la probabilité d'occurrence du risque, mais sans en constituer une cause nécessaire et suffisante.

**1.2.7. Management des risques :** Le management des risques est l'ensemble des démarches permettant d'identifier l'ensemble des risques auxquels un système est exposé, d'évaluer ces risques, de les hiérarchiser selon des critères les plus explicites possible, permettant de situer leur

importance relative et absolue, puis de décider et d'agir de façon appropriée selon cette importance, afin de contrôler de façon permanente l'évolution de ces risques (**Magne et Vasseur , 2006**).

Les principales méthodes d'analyse des risques techniques sont (**Laurent, 2003**):

– **L'APR** Analyse Préliminaire des Risques consiste à identifier les éléments dangereux dans un système et étudier comment ils pourraient conduire à une situation accidentelle. Cette méthode est préalable aux autres méthodes ;

– **L'arbre des défaillances** : Contrairement à l'analyse des modes de défaillances, l'arbre de défaillances est une méthode déductive (déductif : procédant d'un raisonnement logique rigoureux). Elle permet de savoir comment un système peut être indisponible. Il s'agit de représenter les différents événements et leurs liaisons par des portes de logique (fonction ET ou fonction OU selon que la défaillance du matériel se produit lorsque les événements se réalisent ensemble ou séparément). Cette méthode déductive (de l'effet vers ses causes) a pour objectif la recherche de toutes les combinaisons de défaillances élémentaires pouvant aboutir à un événement redouté, parfois identifié par une AMDEC. A partir de cet « événement sommet », on construit une arborescence (schéma graphique en forme d'arbre inversé) représentant l'enchaînement logique des « événements intermédiaires » jusqu'à la mise en cause des « événements élémentaires » (défaillance d'un composant).

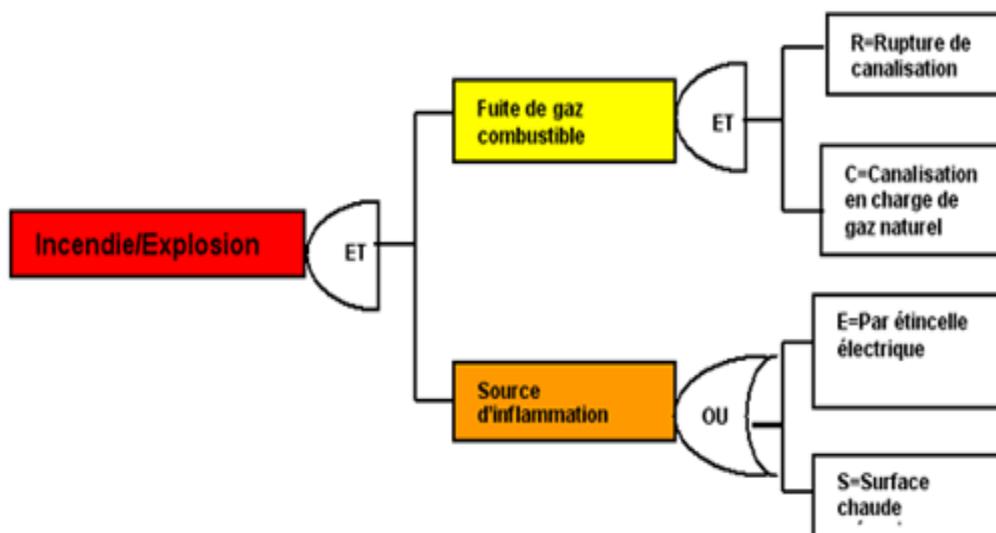
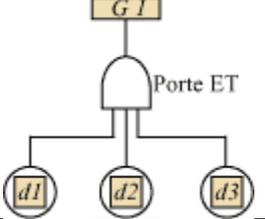
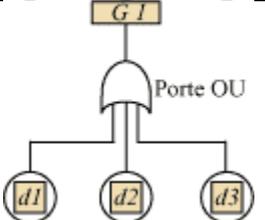
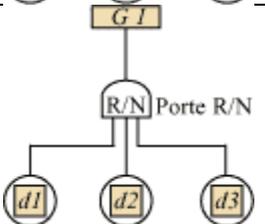


Figure 13 : Exemple d'arbre de défaillances ( Brihac , 2006)

## Portes logiques

Les portes logiques permettent de représenter la combinaison logique des événements intermédiaires qui sont à l'origine de l'événement décomposé (Tableau 2).

Tableau 2 : Portes logiques ( Brihac , 2006)

|  |  |
|--|--|
| <p style="text-align: center;"><b>Porte ET</b></p> <p>L'événement G1 ne se produit que si les événements élémentaires d1, d2 et d3 existent simultanément.</p>                               |   |
| <p style="text-align: center;"><b>Porte OU</b></p> <p>L'événement G1 se produit de manière indépendante si l'un ou l'autre des événements élémentaires d1, d2 ou d3 existe.</p>              |   |
| <p style="text-align: center;"><b>Porte R/N</b></p> <p>Si R=2 et N=3 alors il suffit que deux des événements élémentaires d1, d2, d3 soient présents pour que l'événement G1 se réalise.</p> |  |

– **L'arbre des événements ou conséquences** : Consiste à élaborer un diagramme représentant les éventualités résultantes de diverses combinaisons d'évènements. Le développement de l'arbre débute par un évènement initiateur et progresse selon une logique binaire.

– **L' HAZOP Hazard and Operability studies**: Consiste à étudier l'influence des déviations de paramètres régissant le procédé par rapport à des valeurs nominales de fonctionnement.

– **L'AMDEC Analyse des Modes de Défaillances de leurs Effets et de leur Criticité** : Consiste à considérer systématiquement l'un après l'autre les composants du système et à étudier et analyser les causes et les effets de leurs défaillances potentielles.

– **MOSAR Méthode Organisée et Systémique d'Analyse des Risques** : Consiste à identifier les risques d'un système et leur impact sur l'homme et l'environnement puis d'identifier les moyens de prévention et de protection nécessaires pour les neutraliser.

Lorsque l'on veut évaluer les risques, on se rapporte à une matrice de criticité. Chaque zone correspond à un niveau de criticité ou niveau de risque. Dans ce cas le risque est une fonction de la fréquence potentielle de défaillance (ou probabilité de défaillance) et de la gravité des conséquences de cette défaillance.

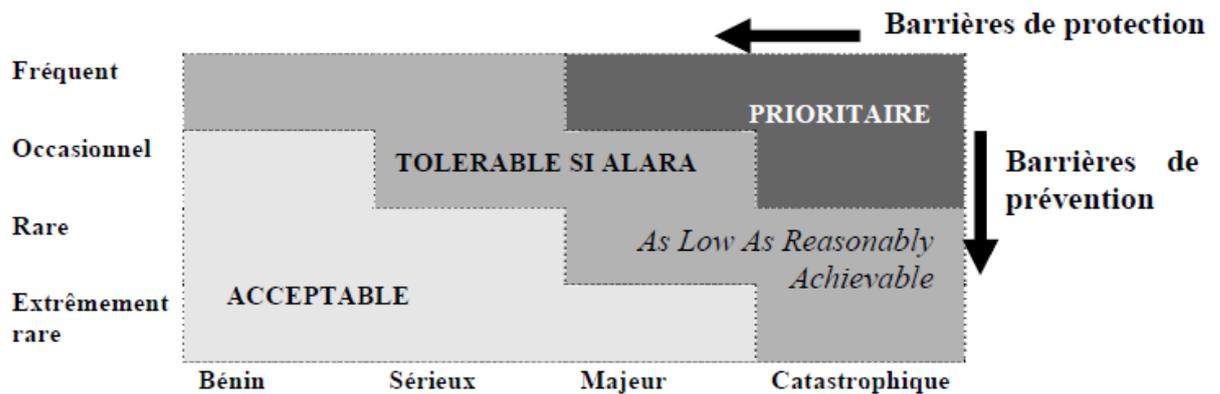


Figure 14 : Matrice de criticité (Dauphine, 2001)

## 1.2.8. Les bases historiques de la sécurité

**1.2.8.1. La sûreté de fonctionnement :** Ces dernières années, la notion de sûreté de fonctionnement a préoccupé plusieurs chercheurs, partant des concepts qu'elle intègre, telle que la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité, la sécurité et la vulnérabilité. C'est à partir des années 60 et 70 que des études de sûreté de fonctionnement ont été lancées, quand des défaillances considérables ont touché l'industrie de l'armement et le secteur du nucléaire.

A ce moment la sûreté de fonctionnement a pris un grand essor et s'est développée comme une discipline multi outils :

- Méthodes d'analyse et de gestion des défaillances ;
- Méthodes de calcul de la fiabilité et de la sûreté de fonctionnement ;
- Méthodes d'analyse des risques industriels ;
- Constitution des bases de données sur la fiabilité des systèmes et composants.

De nos jours, la compétitivité des marchés industriels fait que les aspects de la qualité des produits et services ont une grande importance. De même la productivité d'une usine est liée directement au bon fonctionnement de son fonctionnement. Donc l'amélioration de la fiabilité du produit vendu ou acheté est devenue une nécessité chez tous les clients et fournisseurs.

La sûreté de fonctionnement d'un système/équipement se caractérise par la mise en place d'un processus d'étude intégré aux phases du cycle de développement du système/équipement, qui vise à déterminer le niveau de confiance relatif au fonctionnement défini pour ce système/équipement. Ce processus d'étude de sûreté de fonctionnement, souvent appelé étude FDMS, est axé autour de quatre points principaux d'étude :

- L'étude de la fiabilité, permet de déterminer au système/équipement concerné, une durée de fonctionnement garantie avant l'apparition d'une défaillance (MTBF). Cette durée de fonctionnement doit être la plus proche possible de la réalité. La fiabilité est déterminée de façon prévisionnelle, et s'appuie le plus souvent sur des valeurs issues du retour d'expérience ;

- L'étude de la disponibilité, permet de déterminer, en fonction des résultats de fiabilité, la qualité du service rendu par le système/équipement ;

- L'étude de la maintenabilité, permet de déterminer la capacité du système à être remis en état de fonctionnement ;

- L'étude de la sécurité, permet de définir l'aptitude d'un système/équipement à garantir, tout au long de sa durée d'exploitation, une fréquence constante d'apparition d'un événement identifié comme redouté, c'est-à-dire un événement qui pourrait causer la blessure voir la mort d'une ou plusieurs personnes.

Ces études de sûreté de fonctionnement sont réalisées en parallèle du cycle de développement du système/équipement et utilise, pour chacune des phases de développement, des méthodes d'analyse du type:

- Analyse préliminaire des dangers/risques (APD/APR) ;
- Analyse opérationnelle des risques (AOR) ;
- Analyse par arbre de causes ;
- Graphe de Markov ;
- Analyse des modes communs (AMC) ;
- Analyse des modes de défaillance de leurs effets et de leur criticité (AMDEC) ;
- ...,

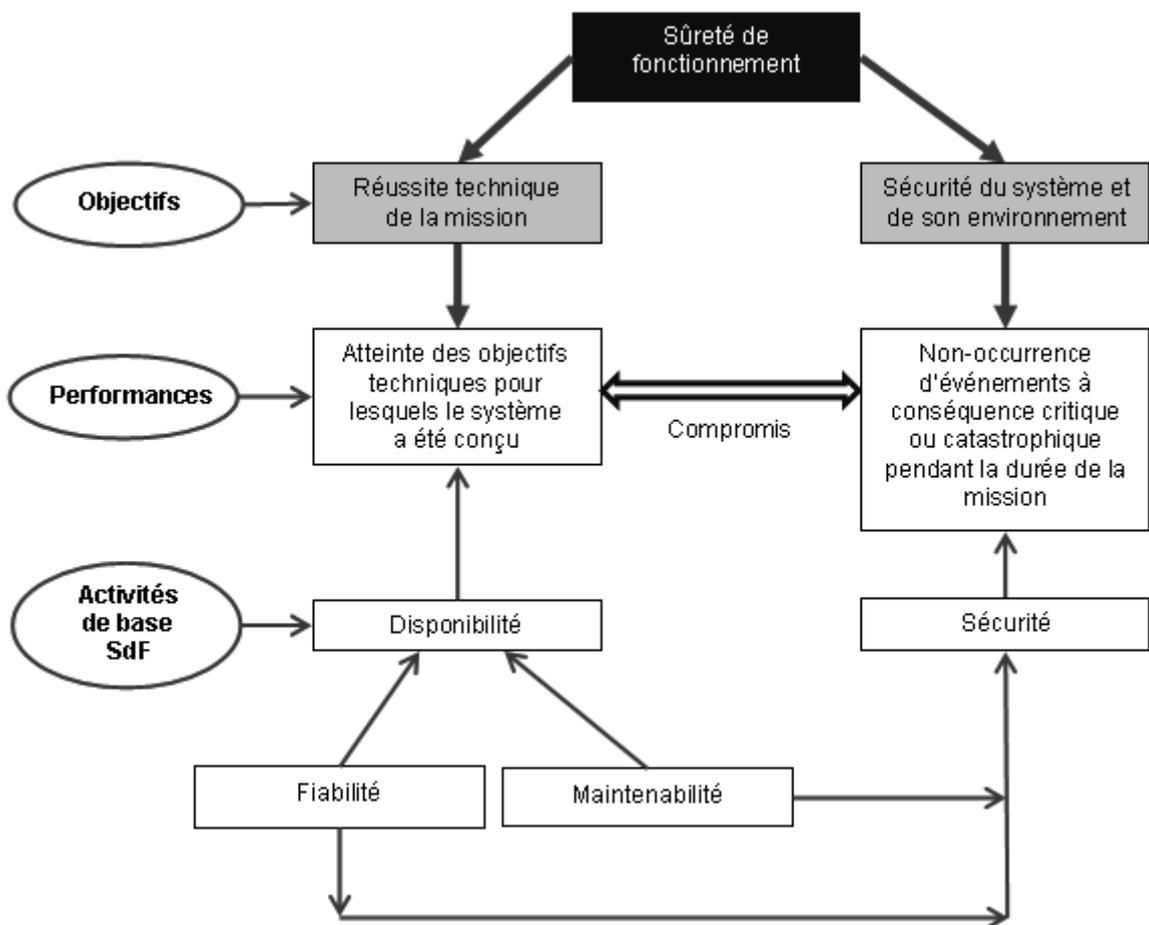
Ces méthodes permettent d'assurer, que chaque phase du cycle de développement du système/équipement, intègre bien tous les critères de fiabilité, disponibilité, maintenabilité et sécurité pour lesquels ce système/équipement est conçu.

La sûreté de fonctionnement impose, par cette rigueur, de bien connaître son système/équipement. Il n'y a pas si longtemps, la sûreté de fonctionnement n'était maîtrisée que des secteurs à forts risques tels que l'aéronautique et le nucléaire. Actuellement, grand nombre d'industriel, tous secteurs confondus, l'intègre dans leur processus de développement afin d'avoir la garantie du respect des critères pour lesquels leur système/équipement est conçu

**( Blog de la société clearsy).**

**1.2.8.2. Les concepts de la sûreté de fonctionnement :** Dans l'industrie, on parle de plus en plus de sûreté de fonctionnement (Fig15). Cette discipline, qui a acquis ce nom et sa forme actuelle principalement au cours du dernier demi-siècle et dans les secteurs de la défense, de l'aéronautique, de l'espace, du nucléaire, puis des télécommunications et des transports, serait désormais utile, voire indispensable, à tous les secteurs de l'industrie et même d'autres activités.

De quoi s'agit-il ? La sûreté de fonctionnement est une riche palette de méthodes et de concepts au service de la maîtrise des risques (**Sctrick ,2004**)



**Figure 15 : Les concepts de la sûreté de fonctionnement (Bellut , 2011)**

**1.2.9. Notions fondamentales des concepts de la sûreté de fonctionnement :** Comme nous l'avons déjà signalé au début du chapitre, la sûreté de fonctionnement est définie comme étant, la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité, la sécurité et la vulnérabilité.

**1.2.9.1. La fiabilité :** En termes de statistique, la fiabilité est une fonction du temps  $R(t)$  qui représente la probabilité de bon fonctionnement d'un matériel. La fiabilité est une science à part, qui s'applique à des produits, des services, des industries, des ateliers etc.

En termes de qualité on définit la fiabilité d'un matériel comme l'aptitude à maintenir à sa spécification d'origine (**Heng, 2003**)

Aptitude d'une entité à accomplir les fonctions requises dans des conditions données pendant une durée donnée. Elle est caractérisée par la probabilité  $R(t)$  ou  $F(t)$  que l'entité accomplissant ces fonctions à l'instant 0 les accomplisse toujours à l'instant  $t$  (**Sctrick, 2004**)

**1.2.9.2. La disponibilité :** Aptitude d'un outil de production à accomplir une fonction requise dans des conditions d'utilisation données pendant une période donnée (**AFNOR, 2002a**).

**1.2.9.3. La maintenabilité :** Dans les conditions d'utilisation données pour lesquelles il a été conçu, la maintenabilité est l'aptitude d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits. » (**NF EN 13306, 2001**).

Une autre définition ,complémentaire ,fournie par Military (**Hand Book-470A , 1997**) est la suivante : la maintenabilité est la relative facilité et économie de temps et de ressources avec laquelle un système peut être maintenue ou remis dans un état de fonctionnement spécifique, lorsque la maintenance est exécutée par un personnel ayant les compétences requises et utilisant les procédures et les ressources matérielles prescrites à chaque niveau de maintenance spécifique. Cette dernière définition indique que la maintenabilité est une caractéristique ou aptitude d'un système et que sa mesure se base essentiellement sur l'appréciation du déroulement des activités de maintenance. la maintenance désigne l'ensemble des activités destinées à maintenir ou rétablir un système dans un état spécifié ou dans des conditions données de sureté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise (**Menye ,2009**)

### **1.3. La prescription comme outil de la sécurité**

**1.3.1. Rôle de la prescription :** L'une des stratégies les plus systématiques pour améliorer la sécurité des systèmes complexes à hauts risques consiste à accroître la prévisibilité des comportements techniques et humains (**Journée , 2001**.) Cette « stratégie d'anticipation » vise à supprimer l'imprévu à travers la mise en place d'un système de règles et de procédures censé couvrir tous les cas possibles (**Wildavsky , 1988**).

**Hale et Swuste (1998)** définissent les règles de sécurité comme un état du système, ou une façon définie de se comporter en réponse à une situation prévue, établie avant que l'évènement ne se produise et imposée à et/ou acceptée par les opérateurs du système en tant que moyen d'améliorer la sécurité ou atteindre un niveau de sécurité requis.

**1.3.2 .Application de la prescription dans l'industrie :** Dans les systèmes sociotechniques à risques, l'amélioration de la sécurité se fonde le plus souvent sur quelques principes de base :

- Anticiper toutes les situations possibles, afin de définir en détail toutes les tâches, et tous les « bons » comportements au travers de règles et de prescriptions ;
- Automatiser tout ce qui peut l'être afin de déporter sur la technique ce qui ne serait pas gérable par l'homme ;
- Recruter en sélectionnant les bons profils et former les opérateurs à appliquer les règles et les procédures.

**1.3.3. Les déviations par rapport aux règles de sécurité et procédures :** Il est un débat convenu que face à des procédures à jamais incomplètes, l'individu n'a d'autre solution que de les adapter, les contourner ou les enfreindre. Deux courants de pensée se sont attachés au problème des déviations par rapport aux règles et procédures :

- le premier courant s'intéresse à la sécurité industrielle et aux risques d'accident majeur ;
- le deuxième courant se focalise sur la santé sécurité au travail.

Ces deux courants, après avoir travaillé de manière indépendante se retrouvent aujourd'hui autour du concept de culture de sécurité (**Tazi, 2008**)

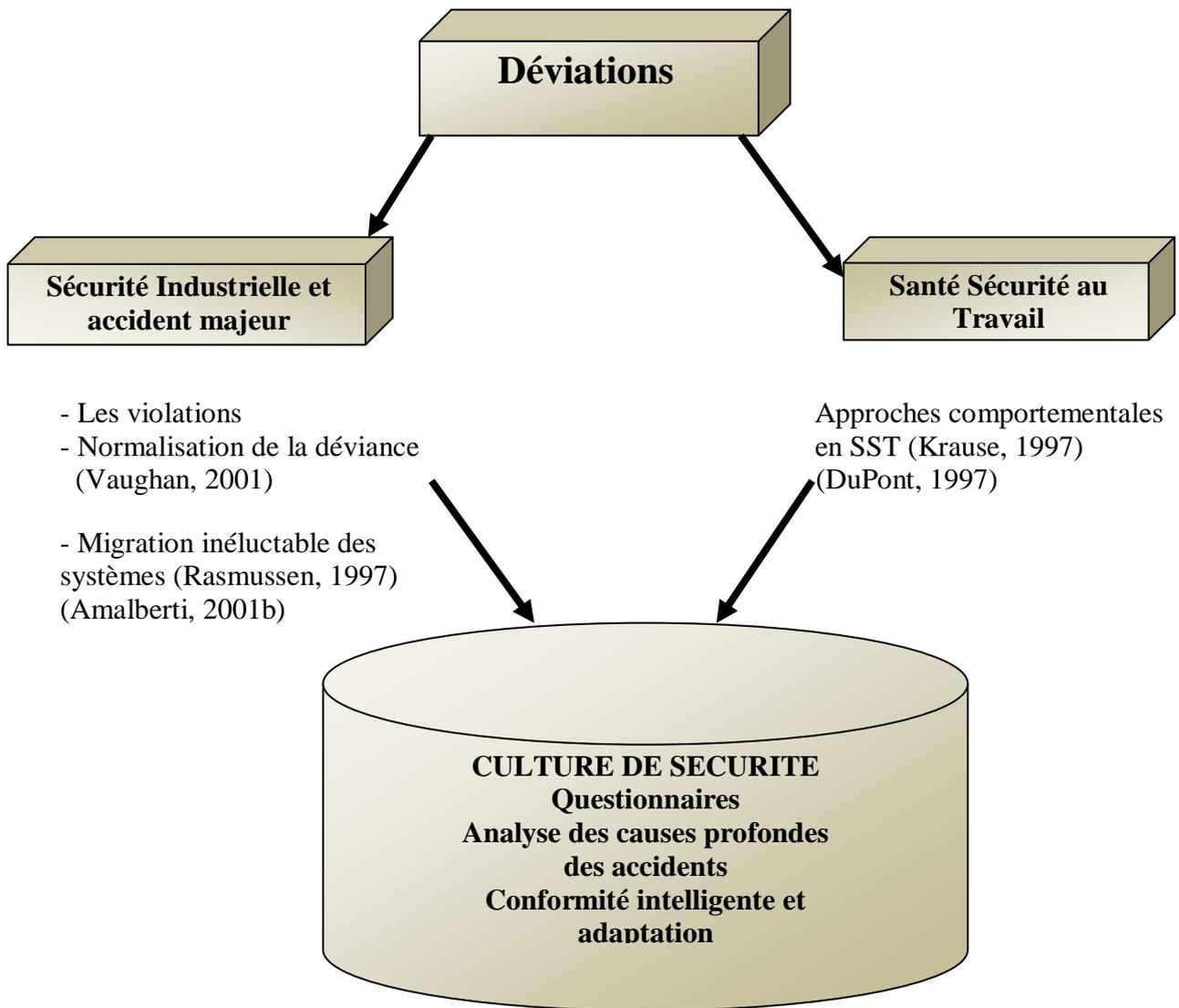


Figure 16 : Deux courants de pensée sur la question des déviations aux règles de sécurité et procédures

(Tazi , 2008 )

#### 1.4. L'émergence du concept de la culture de sécurité

**1.4.1. La culture :** Le terme de « culture de sécurité » apparaît pour la première fois dans le rapport que des experts du Groupe consultatif international pour la sûreté nucléaire (INSAG), intitulé «Rapport récapitulatif sur la réunion d'analyse de l'accident de Tchernobyl » ont rendu à propos de la catastrophe nucléaire de Tchernobyl. Ce terme s'est imposé par la suite dans l'agenda de toutes les industries dans lesquelles des risques doivent être gérés.

Dans le domaine de la santé, cette culture constitue un élément préalable incontournable à prendre en compte pour mener de manière efficace des actions d'amélioration de la sécurité des patients. Il est maintenant clairement établi que la cause des événements indésirables qui

surviennent chez les patients est rarement liée au manque de connaissance des professionnels ;le plus souvent ces évènements indésirables sont le fait de défauts d'organisation, d'absence de vérification, d'insuffisances de la coordination ou de la communication, bref qu'ils sont liés à un manque de culture commune de sécurité Améliorer la sécurité des patients implique de prendre en compte la culture de sécurité des acteurs.

Plusieurs définitions sont disponibles. Celle adoptée en 2006 par la société européenne pour la qualité des soins (*European Society for Quality in Health Care*) est la plus connue : la culture de sécurité désigne un ensemble cohérent et intégré de comportements individuels et organisationnels, fondé sur des croyances et des valeurs partagées, qui cherchent continuellement à réduire les dommages aux patients, lesquels peuvent être liés aux soins (**Tazi, 2008**)

**1.4.2. Mesure de la culture de sécurité : le questionnaire de culture de sécurité :** La mesure de la culture de sécurité apparaît comme un indicateur proactif de la sécurité (**Flin et al ,2006**) qui permet de ne pas attendre que le système soit défaillant pour identifier ses faiblesses et mettre en place les actions pour y remédier. L'industrie nucléaire après l'accident de Tchernobyl a fortement encouragé les exploitants à mesurer la culture de sécurité dans leurs installations.

La mesure de la culture de sécurité se fait par le biais du climat de sécurité. Le climat de sécurité est une photo instantanée de la culture de sécurité. Il mesure à un moment donné, dans un lieu donné, la culture de sécurité. Il permet de mesurer la perception des personnes sur les procédures et comportements dans leur environnement de travail, et indique l'importance qui ait donnée à la sécurité par rapport aux autres objectifs organisationnels (**Tazi, 2008**)

Nous croyons que dans un contexte de travail, une culture en santé et sécurité trouve ses origines et évolue à partir de ce que les travailleurs ont appris (formellement et informellement), découvert ou développé en résolvant de façon efficace les problèmes techniques et/ou humains liés à leur environnement de travail. Ces solutions deviennent à leur tour de nouvelles normes qui peuvent être enseignées aux nouveaux travailleurs comme étant la manière correcte de percevoir, de penser et de ressentir la santé et la sécurité jusqu'à ce que de nouveaux problèmes surgissent et entraînent une nouvelle fois de nouvelles solutions. Une culture SST se construit donc par apprentissage. De ce fait, au-delà des systèmes, des programmes et des procédures de travail, il y a d'abord les travailleurs, les hommes et les femmes qui sont de véritables piliers du développement durable d'une culture en matière de santé et de sécurité au travail. Nous devons donc développer le potentiel créatif que représentent les travailleurs et accompagner les gestionnaires à jouer leur véritable rôle dans le développement des apprentissages de leur équipe (**Plante, 2007**).

Pour évaluer le climat de sécurité, les courants de pensée sur la sécurité industrielle et sur la SST s'accordent sur l'utilisation d'un questionnaire destiné aux travailleurs. Un questionnaire de climat de sécurité permet d'avoir des indications sur le ressenti des personnes par rapport à l'importance de la sécurité dans l'entreprise considérée, il permet également d'avoir une idée assez précise des croyances et valeurs partagées sur la sécurité (Cox et Cheyne , 1999) Ces questionnaires essaient de capturer les pratiques et perceptions des personnes et se focalisent sur le management, les conflits potentiels entre sécurité et production, la charge de travail, les relations entre le management et la réglementation, les attitudes individuelles et du management ou encore les pratiques de travail locales et la supervision (Tazi , 2008 ).

**1.5. La Santé Sécurité au Travail SST :** « La Santé Sécurité au Travail, c'est un état d'esprit, c'est une culture et ça ne se décrète pas » (Abord, Bachelard, 2012). Elle occupe aujourd'hui une place fondamentale chez la majorité des entreprises tant les enjeux humains, sociaux, économiques et juridiques. La protection de la santé et de la sécurité au travail repose sur la prévention des risques professionnels qui regroupe l'ensemble des dispositions à mettre en œuvre pour préserver la santé et la sécurité des salariés, améliorer les conditions de travail et tendre au bien être au travail (INRS). Elle concerne les risques sur la santé physique et psychique des travailleurs et doit prendre également en compte les risques psychosociaux liés à l'intensification du travail notamment les contraintes de temps, les cadences élevées, le manque de maîtrise des tâches et les relations hiérarchiques difficiles (Tazi , 2008 )

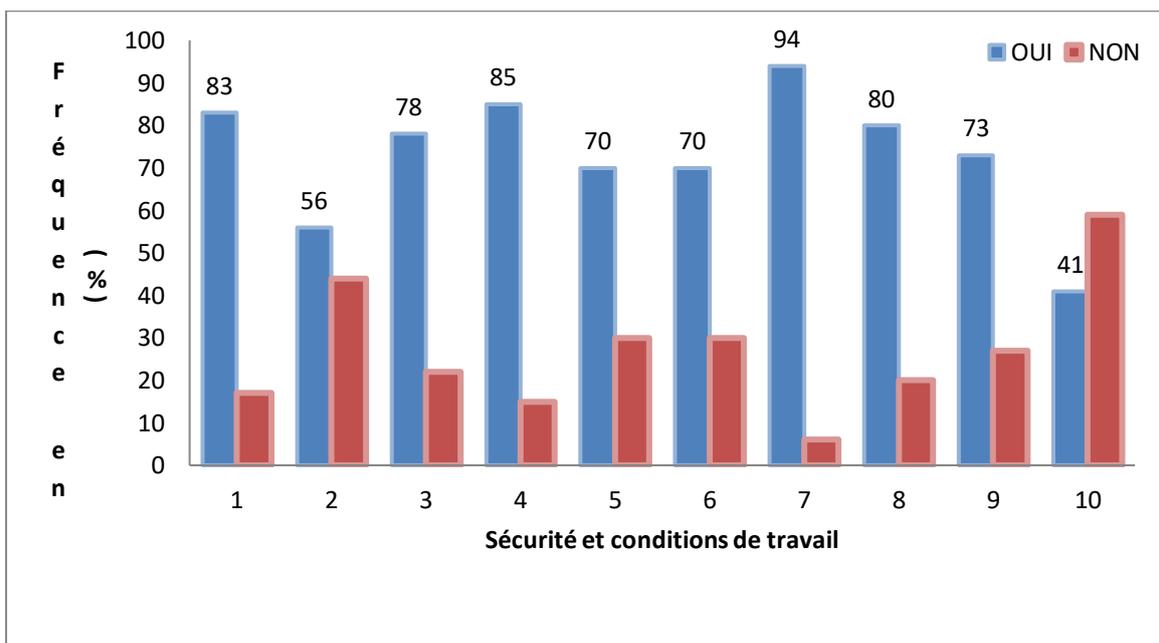
**1.5.1. Les accidents de travail :** Parmi les accidents les plus fréquents, nous pouvons citer, celui arrivé à la cimenterie Hdjar Essoud. Pendant la manutention d'un moteur de pompe, le moteur a été libéré et ait tombé sur la main de l'agent, ce qui a provoqué l'amputation de la pulpe du pouce gauche.

Nous pouvons citer aussi, celui arrivé au moment de débouillage de la goulotte de la traimie laitier, l'ouvrier a glissé de la passerelle jusqu'au tapis alimentation four ce qui a provoqué une entorse du pied gauche.

**1.5.2. Comportement organisationnel :** Une enquêtes quantitative par questionnaire auprès d'un échantillon représentatif des travailleurs, (100 salariés au moins) de la cimenterie de Tébessa nous a permis de recueillir, des réponses plus déterminants des conditions de sécurité (figures 18 ,19).

**1.5.3 .Sécurité et conditions de travail :** Parmi les résultats obtenus par questionnaire, on a énumérer, à travers les figures 17 et 18, quelques réponses aux questions qui nous semblent importantes à soulever.

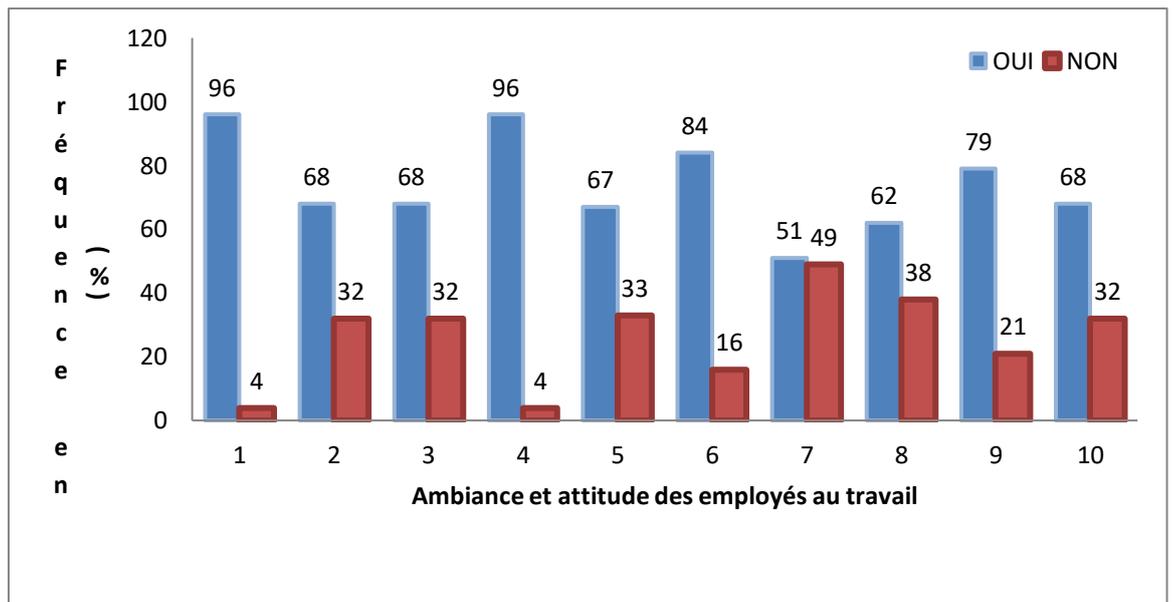
1. Conditions de travail difficiles.
2. Situation complexe sur le lieu de travail.
3. Manque d'hygiène et d'organisation.
4. Sécurité insuffisante de machine.
5. Rythme de travail élevé.
6. Changement souvent de poste de travail.
7. Absence de stratégie de prévention sécuritaire.
8. Manque de stratégie claire en matière de sécurité et santé de travail (SST).
9. Insuffisance en moyens et ressources pour utiliser efficacement les solutions en SST.
- 10.** Manque de ressources humaines et moyens financiers pour assurer une bonne gestion de la SST



**Figure 17 : Sécurité et conditions de travail**

1. Manque d'expérience et de motivation.
2. Manque de communication, d'information et de sensibilisation.
3. Imprudence.
4. Stress.
5. Manque de conscience en responsabilité.
6. Implication insuffisante des employés et de la direction.

7. Négligence des conséquences d'une lésion professionnelle.
8. Présence d'un Burn-in , être présent de corps au travail, mais absent d'esprit.
9. Certaines personnes, s'obstiner à travailler même quand ça ne va pas, même quand un médecin recommande quelques jours de repos.
10. Remise en question des processus organisationnels existants.



**Figure 18 : Ambiance et attitude des employés au travail**

**1.5.4 .Commentaire :** La (figure17) représente un histogramme relatif aux réponses des travailleurs en ce qui concerne la sécurité et les conditions de travail. La (figure 18) est l'histogramme des réponses concernant l'ambiance et l'attitude des employés au travail.

Les résultats montrent la dégradation des conditions de sécurité et de dysfonctionnement relevés par les travailleurs. Le même résultat est observé pour les conditions de travail, ce qui montre que l'entreprise est très loin de la réglementation et normes en santé et sécurité au travail et qu'il reste encore beaucoup à faire pour développer une culture des risques pour tous et garantir un niveau de sécurité acceptable néanmoins. Désormais, le bien-être au travail est l'affaire de tous. La santé et la sécurité au travail ne doivent pas être l'apanage de quelques entreprises se voulant à la pointe du progrès social où dont les responsables seraient en particulier sensibilisés à la question. En collaboration étroite, l'autorité publique et tous les acteurs de terrain doivent effectuer au jour le jour un travail d'information et d'explication des mesures de prévention des risques. Ces efforts ne pourront aboutir que si tout le monde s'implique largement et continuellement. Donc, Il est devenu primordial de donner à l'ensemble

du personnel un véritable esprit de sécurité qui lui permettra de prévoir et d'agir de façon très efficace.

**1.5.5. Conclusion :** Les réponses aux questionnaires ont montré les graves distorsions existantes entre les responsables de l'unité et les travailleurs ainsi que la dégradation des conditions de travail et de sécurité relevées à tous les niveaux. C'est pourquoi, si l'on veut parvenir à une meilleure protection des salariés, un changement de point de vue s'impose, qui doit savoir ce qui se passe et qui peut se passer pour organiser sa vie et avoir les bons réflexes en cas de nécessité. Dès lors que les responsabilités de chacun seraient précisées et comprises par tous, de nombreuses améliorations seraient plus faciles à réaliser. En fait, il s'agit de renforcer la transparence et de développer un langage et un vocabulaire communs aux professionnels et à leurs représentants sur les sujets concernant tous les partenaires du risque et d'établir et faire connaître les outils de cette communication, développer des programmes de sensibilisation à la sécurité et de formation du personnel et intensifier les besoins en moyens de protection collective et individuelle, en utilisant les analyses sécuritaires des tâches et des études ergonomiques.

## CHAPITRE 2

### DIAGNOSTIC DES DEFAILLANCES : METHODES ET MODELES

#### 2.1. Généralités sur les défaillances

Dans le langage industriel, la maintenance est liée au risque de défaillance d'un produit et consiste à palier à ce risque. Un matériel, aussi bien conçu qu'il soit, n'échappe pas, l'expérience le prouve, à certaines pannes en dehors de celles provoquées par un stockage, une mauvaise utilisation, un acte de sabotage ou un manque de précaution dans la manutention.

Il serait illusoire de vouloir construire des équipements de qualité, satisfaisant le besoin des clients et utilisateurs, dans l'ignorance de ce que seront leurs pathologies en marche dans l'environnement de fonctionnement ou de vouloir réaliser une intervention corrective, apporter un remède durable ou une amélioration technique à une défaillance non élucidée. 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), (figure19). De ce fait, la connaissance de l'installation est impérative. Donc, 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 » (Chaib, 2009)

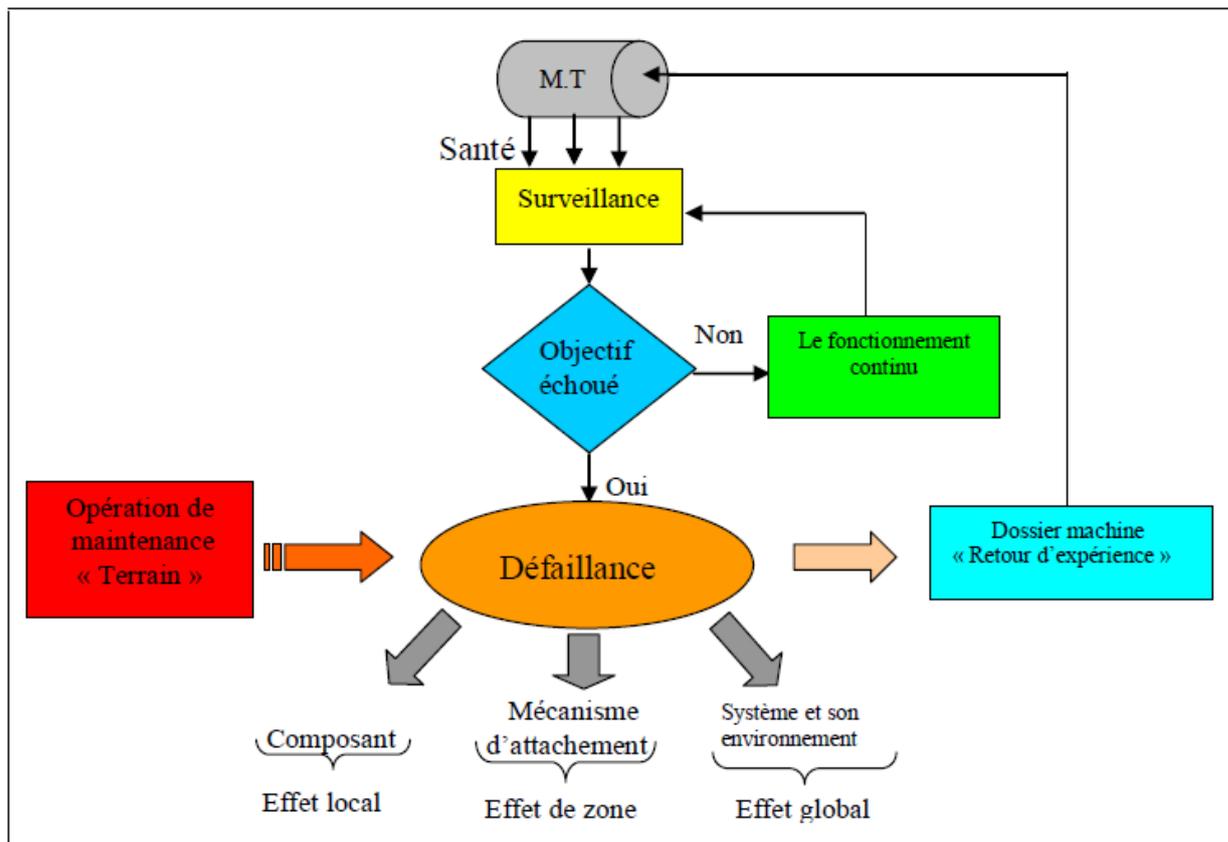


Figure19 : Les enjeux d'une défaillance (Chaib, 2009).

**2.2. 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 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 dérives (par usure ou fatigue), cataleptiques (soudaine) ou de façon aléatoire, (figure 20)

**Défaillance soudaine :** Elles sont complètes et soudaines, (figure 20C). Généralement, ses défaillances sont dues aux défauts pré existants dans les pièces en service. 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 :** Dans ce cas, on voit progresser la dégradation, (figure 20A). C'est pourquoi une connaissance des comportements des systèmes est indispensable. A la longue, une telle défaillance peut devenir une défaillance cataleptique. 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. (Chaib, 2009).

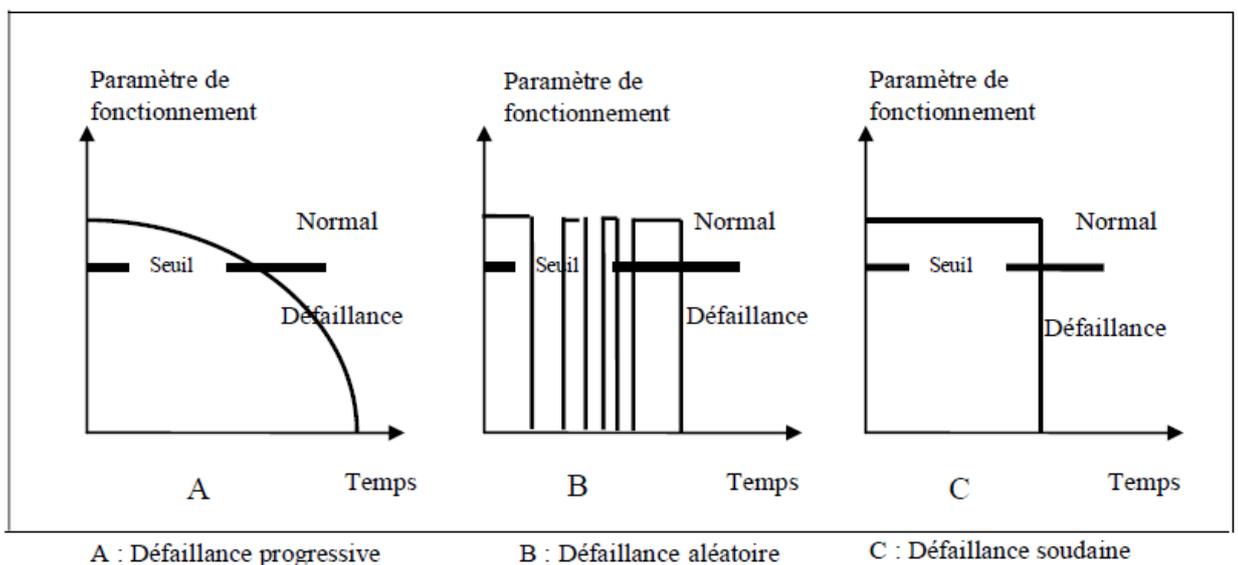


Figure 20 : Les différents processus de dégradation des pièces (Chaib, 2009).

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 21) 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.

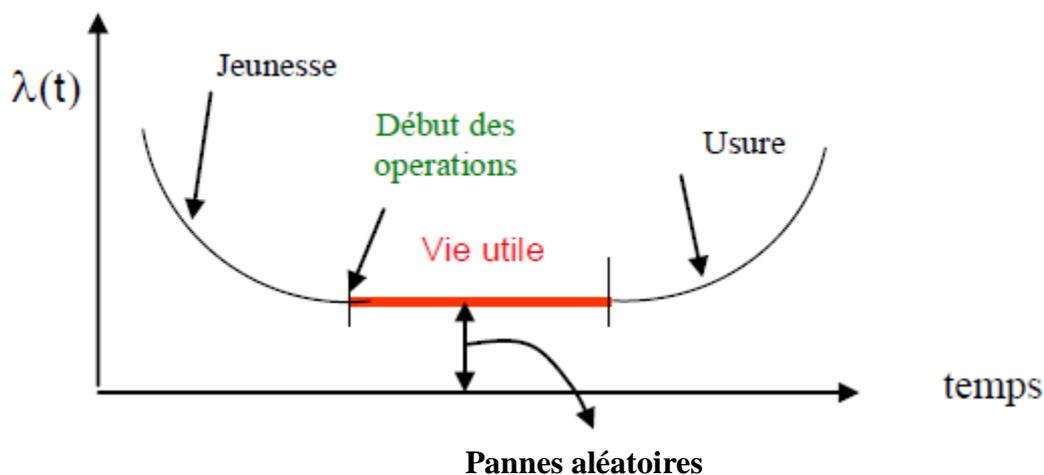


Figure 21 : Courbe d'évolution du taux de défaillance (Bouanaka ,2009)

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.

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.

**2.3 Temps :** On choisit tout d’abord une période de référence pour l’analyse des temps. Elle peut être l’année calendaire mais aussi être adaptée à l’utilisation du matériel, par exemple la durée d’un voyage aller-retour pour un navire de ligne (environ 100 jours), ou encore la durée entre deux contrôles réglementaires d’une société de classification ou d’un organisme d’État (10 ans).

La figure 22 donne l’architecture des différents temps dont voici quelques définitions :

- Temps total : période de référence ;
- Temps requis : pendant lequel l’utilisateur exige que la machine soit en mesure d’assurer la mission définie ;
- Temps effectif d’indisponibilité : partie du temps requis où la machine est incapable d’accomplir sa mission pour une cause quelconque ;
- Temps effectif de disponibilité : partie du temps requis pendant laquelle la machine est apte à accomplir sa mission, la fourniture des moyens extérieurs éventuellement nécessaires étant assurée (Gilles, 2006).

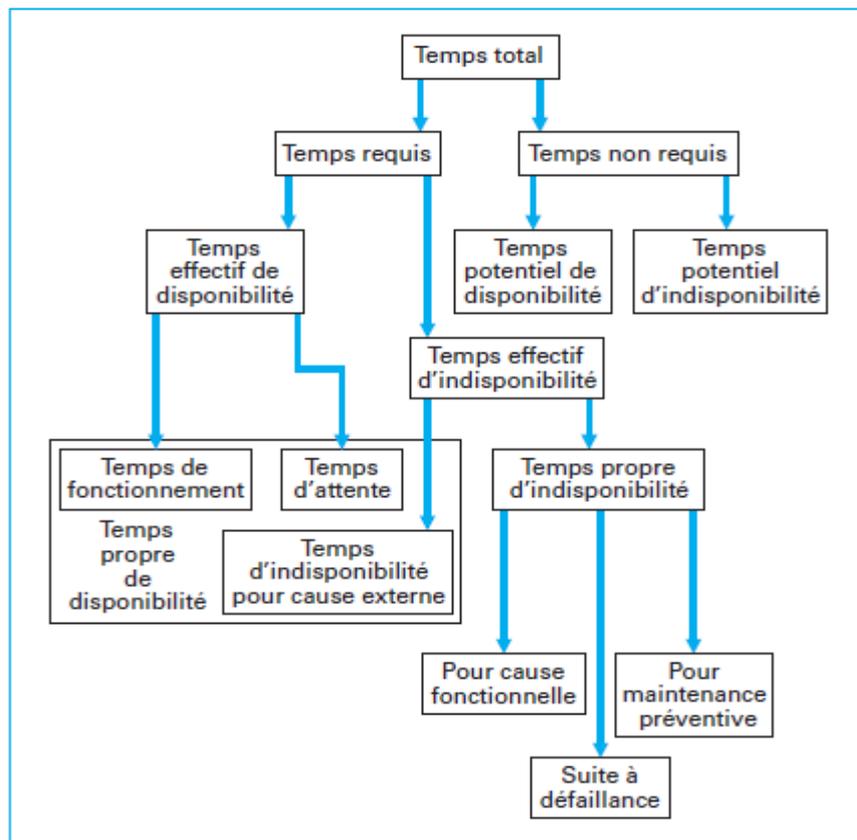


Figure 22 : Définition des temps (Gilles, 2006).

Pour faciliter la gestion des temps, on peut aussi avoir l’approche suivante : La disponibilité d’un appareil est déterminée par le rapport entre le temps moyen de bon fonctionnement (MTBF) et le

temps moyen nécessaire aux opérations de maintenance (MTTR). Cette approche, très prisée par les Anglo-Saxons, nécessite la définition de nouveaux temps :

- le MTBF (*mean time between failure*, moyenne des temps de bon fonctionnement) caractérise la fiabilité du matériel dans les conditions prescrites d'utilisation ;
- le MTTR (*mean time to repair*, moyenne des temps des tâches de réparation) caractérise la maintenabilité du matériel ;
- le MTBO (*mean time between overhaul*).

Le MTBF est généralement déterminé par une loi de fiabilité issue du calcul statistique, mais peut aussi faire appel à l'expérience obtenue lors des premiers mois de fonctionnement d'une machine.

Le MTTR dépend essentiellement de la conception de la machine, mais doit être aussi exprimé à partir de données de départ précises telles que le nombre et la qualification du personnel, l'application de procédures adaptées et la disponibilité de l'approvisionnement prescrit.

Le MTBO n'a de sens que lors de l'application de la maintenance systématique.

#### **2.4. 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.

Les causes de défaillance du système peuvent être externes ou internes :

##### **a) 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).

## b) 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.

D'une manière générale les causes de défaillance d'un élément (entité isolée), sont :

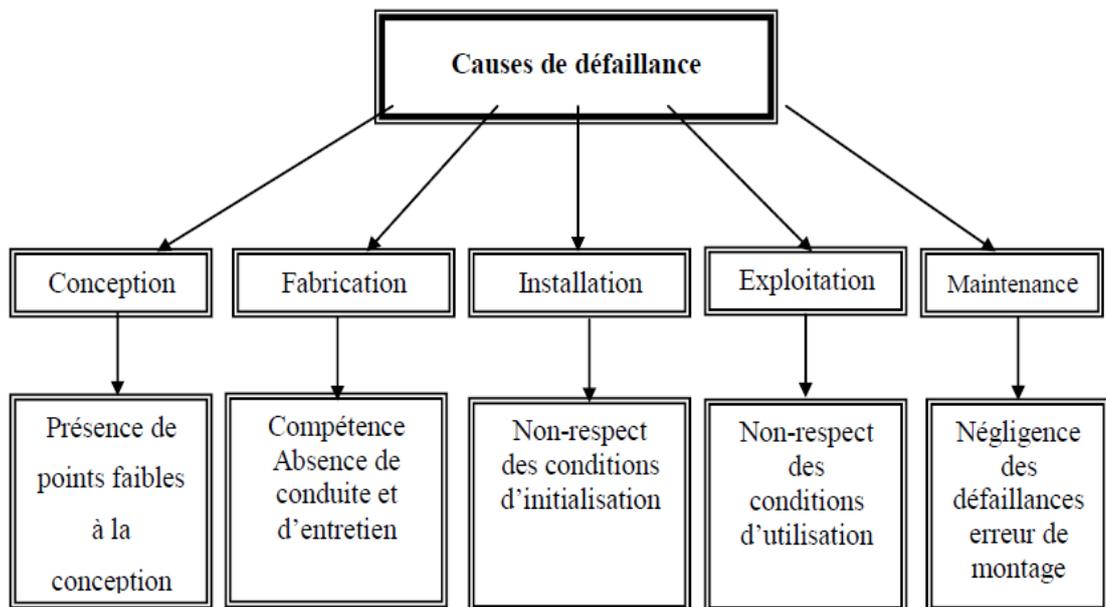


Figure 23 : Causes de défaillance (Bouanaka ,2009)

## 2.5 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 au bien, 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, desserage, coinsement, court-circuit, etc.

**2.5.1 Modes génériques de défaillance :** Il existe 5 modes génériques de défaillance, figure24 :

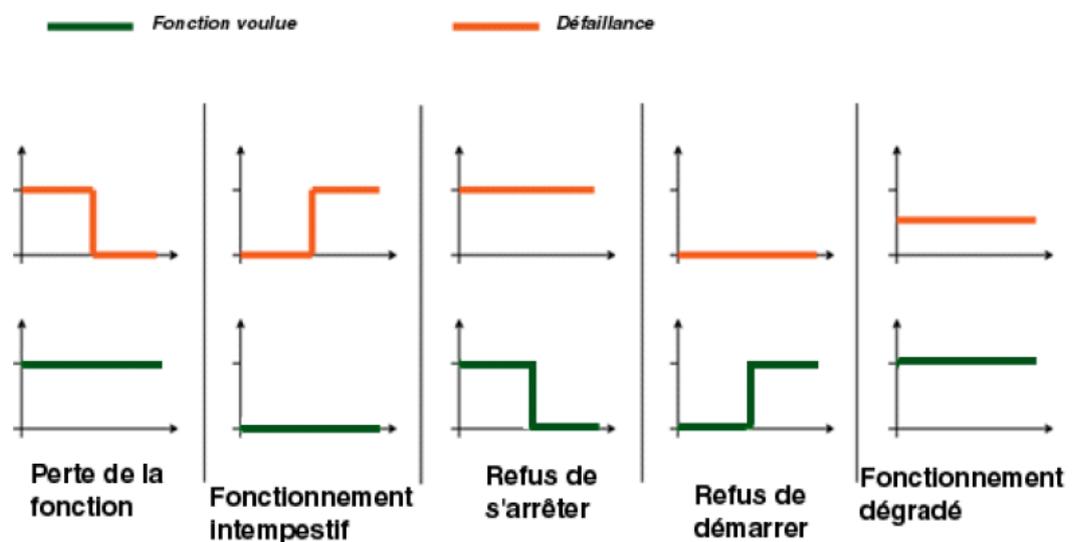


Figure 24 : Modes génériques de défaillance (AMDEC ,2004)

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 s'est voulu généraliste et 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 suivant donne les modes de défaillance .

**Tableau 3 : Modes de défaillances ( Belhomme, 2011)**

| 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 |

## 2.6. Défaillances rencontrées sur les machines tournantes

Dans le milieu industriel telles que cimenteries, mines les machines tournantes sont des équipements complexes et ne peuvent être exempts de perturbations et de défaillances, influant sur la qualité du produit, pouvant provoquer l'arrêt immédiat de toute la chaîne technologique ce qui influe directement sur la production. Les causes de défaillances sont multiples, et donnent lieu à des anomalies plus ou moins graves. Dans ce qui suit nous allons voir quelques uns des organes les plus sensibles dans les machines tournantes, ainsi que les défaillances les plus importantes qui peuvent les toucher.

**2.6.1. Défauts d'engrenages :** Les principaux défauts survenant sur un couple d'engrenages d'un réducteur simple sont les défauts répartis sur toute la denture et les défauts localisés sur une partie de la denture (**Faure,1993**) Mis-à-part les défauts de fabrication et de montage, on distingue principalement deux catégories de défauts pouvant atteindre un jeu d'engrenage, les défauts généralisés et localisés (**Feki.2012**)

- **Défauts généralisés**

- **Usure abrasive** Phénomène présent sur une grande partie de la denture se caractérisant par un enlèvement de matière dû au glissement des deux surfaces en contact. Le développement de cette usure est lié à la charge mécanique à transmettre et à la vitesse de glissement, ainsi qu'à la présence d'éléments abrasifs dans le lubrifiant.

**Pitting ou piqûres** Il s'agit de trous plus ou moins profonds qui affectent toutes les dents. Se produisant surtout sur des engrenages en acier de construction relativement dur. Cette avarie peut apparaître à la suite de légers désalignements d'axes par exemple, à cause de surpressions locales.



Figure 25: Usure abrasive (Khelf, 2014)

- **Défauts localisés**

- **Écaillage** Se manifestant par des trous moins nombreux que ceux du pitting, mais plus profonds et plus étendus. Les dégradations sont produites par fatigue en sous-couche, au point de cisaillement maximal. Ce phénomène rencontré le plus souvent dans les engrenages cémentés, évolue très rapidement vers la rupture, sans passer par une phase d'usure.

- **Fissuration** Généralement au pied de la dent, elle progresse à chaque mise en charge. Son apparition est due à un dépassement de la limite élastique en contrainte au pied de dent, du côté de la dent en traction.

- **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 favorisé essentiellement par des vitesses élevées, de gros modules, un faible nombre de dents en contact.  
( **Khelf,2014**).



**Figure 26 : Ecaillage ( Khelf,2014)**



**Figure 27 : Fissuration ( Khelf,2014)**



**Figure 28 : Grippage ( Khelf,2014)**

D'une façon générale le signal vibratoire d'un défaut d'engrenage des dents peut être représenté comme le montre la figure 29. Les systèmes d'engrenage génèrent un signal

vibratoire à la fréquence fondamentale d'engrènement des dents d'engrenage, qu'est généralement différente pour chaque paire d'engrenage (Fakhfakh, 2005)

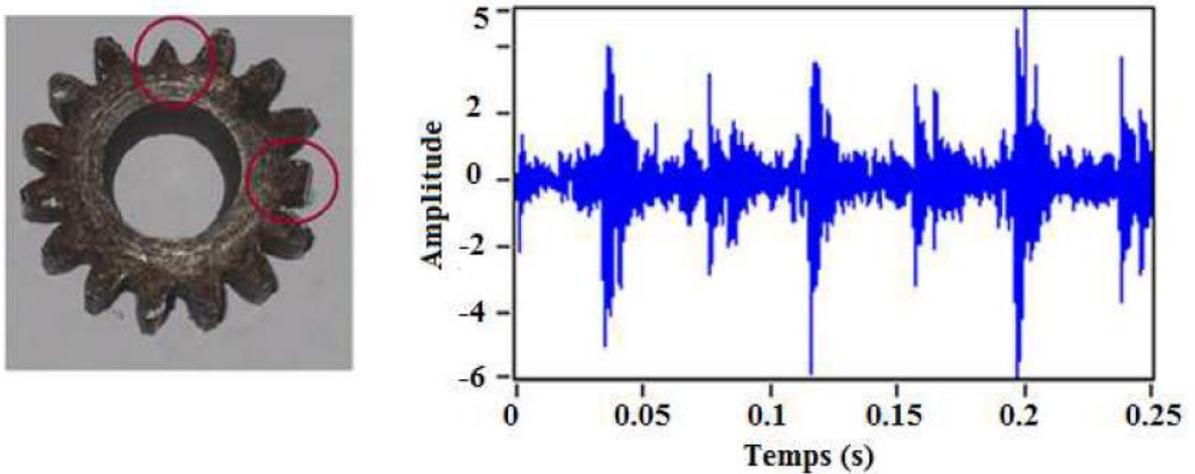


Figure 29 : Casse des dentures d'engrenage et son signal vibratoire .(Ayad,2015)

**2.6.2. Défauts des roulements :** Un roulement est constitué de deux bagues concentriques, une bague externe et une bague interne l'une fixée et l'autre tournante avec le rotor. Celles-ci sont séparées par un ensemble d'éléments roulants qui sont des billes, des rouleaux ou des aiguilles. La durée de vie du roulement est limitée par la fatigue superficielle des matériaux due aux contraintes créées par les passages répétitifs des billes sur les pistes, des micros fissures apparaissant par la suite (figure 31).

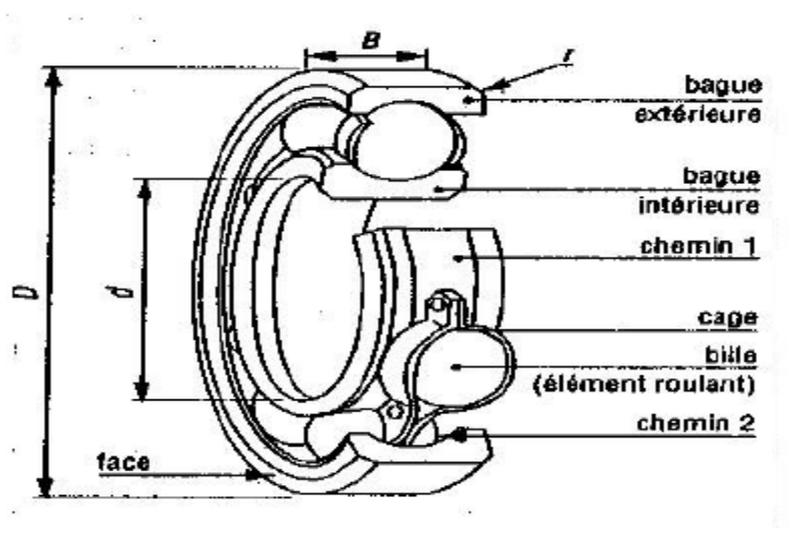
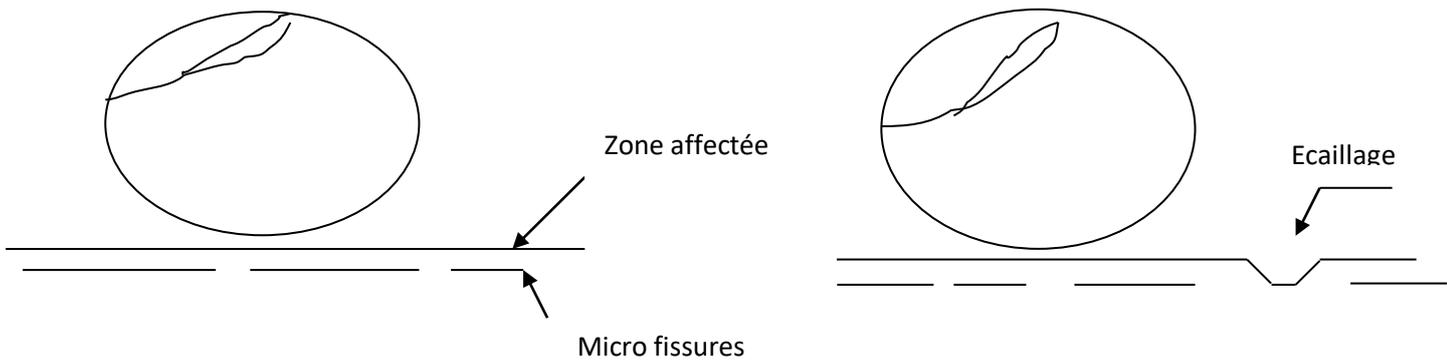


Figure 30 : Schéma d'un roulement ( Chaib ,2009)



**Figure 31 : Dégradation des roulements**

Plusieurs défaillances peuvent toucher les roulements, selon leurs applications sur les machines, c'est pour cette raison que ces éléments nécessitent un entretien préventif et une surveillance périodiques. Ces détériorations se manifestent généralement par un arrachement de matière plus ou moins important. Nous décrivons dans ce qui suit les aspects de détériorations les plus fréquents :

- **Grippage** : En mécanique, le grippage est une détérioration se produisant entre deux surfaces qui se frottent l'une contre l'autre, quand des particules du métal se détachent de l'une d'elles, et rayent l'autre plus ou moins profondément en entraînant un échauffement.
- **Ecaillage** : C'est une avarie caractérisée par l'arrachement de matières et l'apparition des traces de fissuration.
- **Usure généralisée** : Apparaissant sur des corps roulants, des pistes et des cages (teinte grise), due à l'intrusion d'une particule abrasive.



**Figure 32 – Quelques défaillances affectant les roulements a- Usure généralisée b- Cage détériorée c- Corrosion d- Présence de cratères e- Écaillage f- Fissure et cassure g- Grippage h- Trace d'empreintes (Khelf,2014 )**

### 2.6. 3.Défauts des arbres

**2.6.3.1. Défaut de Balourd :** Le balourd est un défaut qui se rencontre en présence du déséquilibre de l'arbre d'une machine tournante. Ce phénomène se produit à la vitesse de rotation et est causé par une mauvaise répartition spatiale des masses dans la structure, entraînant un déplacement du centre de gravité en dehors de l'axe géométrique du rotor de la machine tournante.(Cheikh,2005)

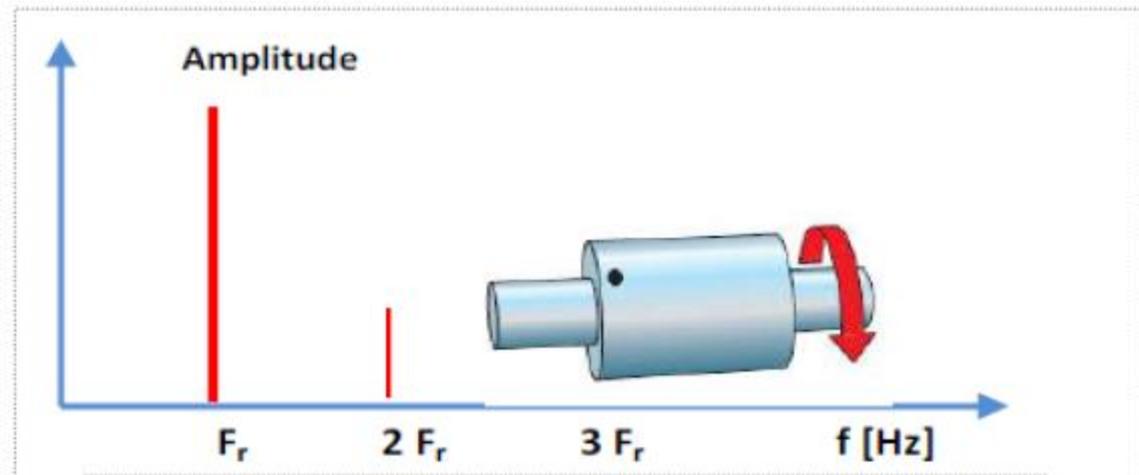


Figure 33 : Défaut de balourd (Nabti, 2011)

**2.6.3.2. Défaut de désalignement :** Un Défaut d'alignement peut être (figure 34), un défaut de concentricité : Les axes des arbres présentent un désalignement au niveau de l'accouplement. Un défaut angulaire : les axes des deux paliers d'un même arbre ne sont pas concentriques. (Cheikh,2005).

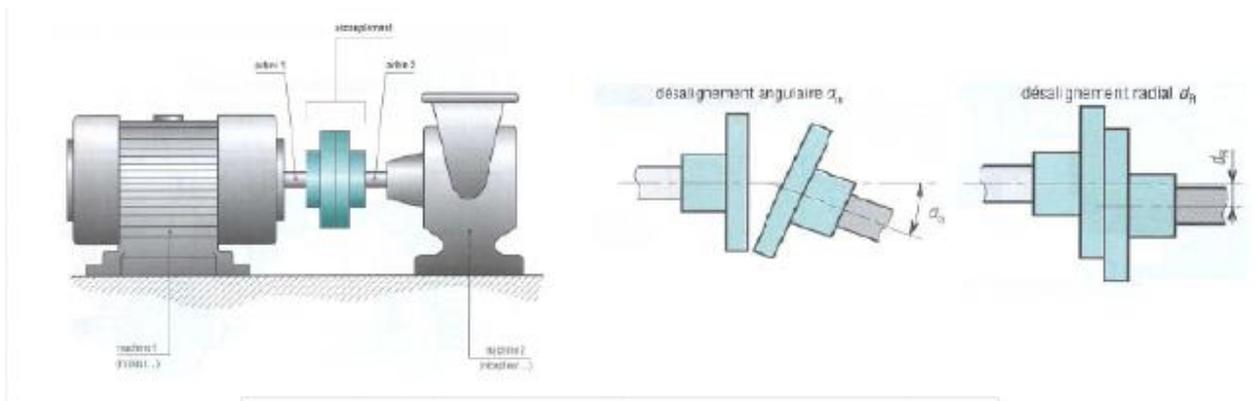


Figure 34 : Défaut d'alignement (Nabti, 2011)

## 2.7. Diagnostic

Le diagnostic est l'analyse d'un ensemble de facteurs ou de symptômes qui visent à établir l'état d'un élément ou les causes d'un désordre quelconque constaté. C'est la détermination de la nature et la localisation du défaut ; cette connaissance permettra de décider le danger émanant du défaut et l'action nécessaire à prendre, afin de remédier au problème (maintenance Corrective).

L'idée principale du diagnostic des défauts est de détecter le défaut dans le système, puis l'identifier, et ensuite prendre les mesures nécessaires pour appliquer la maintenance adéquate du système. Le diagnostic est généralement effectué après la surveillance de l'élément en question et la détection de l'anomalie dans le signal vibratoire, qui nous renseigne sur les organes qui ne fonctionnent pas d'une façon normale.

**2.7.1. Méthodes de diagnostic :** Les méthodes de diagnostic consistent à identifier ou à localiser l'origine des défauts ou des défaillances détectés sur le procédé (**Boudaoud, 1997**). Dans la littérature, différentes méthodes de diagnostic ont été développées (**Debiolles, 2007**):

1. les méthodes à base de connaissances ;
2. les méthodes internes ;
3. les méthodes externes.

Le choix de l'une de ces méthodes dépend du type de représentation de la connaissance. Lorsque les observations sont de type symbolique, les méthodes à base de connaissances sont les plus adaptées. Lorsqu'un modèle analytique du procédé est disponible, les méthodes internes sont privilégiées. En revanche si le modèle analytique du procédé est indisponible ou si la complexité du procédé le rend inexploitable, les méthodes externes offrent une alternative intéressante. Les différentes méthodes de diagnostic sont présentées par la suite.

**2.7.2. Méthodes à base de connaissances :** Le diagnostic à partir de méthodes à base de connaissances est utilisé lorsqu'une connaissance humaine sur le procédé est disponible. En effet, cette méthode exploite les connaissances qualitatives que les experts du procédé détiennent. Parmi les méthodes à base de connaissances, nous citons les systèmes experts qui sont des approches faisant appel à l'intelligence artificielle (**Chatain, 1993 ; Verron, 2007**). Actuellement, beaucoup de procédés industriels avec un nombre d'entrées/sorties restreint

utilisent des systèmes experts afin d'assurer une maintenance optimale. Un système expert qui a pour but d'imiter le raisonnement humain, comporte trois éléments : la base de connaissances, le moteur d'inférence et l'interface avec l'utilisateur (Debiolles, 2007). La base de connaissances et le moteur d'inférence sont conçus à partir du savoir des experts avant d'être intégrés à un programme donné. La base de connaissances est composée d'une base de faits et d'une base de règles : la base de faits regroupe toutes les observations faites sur le système à diagnostiquer et la base de règles contient les lois qui associent les faits entre eux. Le moteur d'inférence est un outil informatique développé de façon à raisonner et à tirer des conclusions à partir de la description d'un problème donné, en utilisant la base de connaissances. L'interface utilisateur permet aux opérateurs de consulter le système expert. Ils peuvent ainsi vérifier et également mettre à jour leurs connaissances.

**2.7.3. Méthodes internes :** Par opposition aux méthodes à base de connaissances, les méthodes internes exploitent les modèles physiques ou modèles entrées/sorties des procédés pour réaliser un diagnostic. Les méthodes internes consistent à analyser un certain nombre de valeurs numériques issues du modèle analytique du procédé et à les comparer à des données mesurées sur celui-ci. La principale méthode utilisée pour obtenir des valeurs numériques est la méthode de génération de résidus, comme illustré sur la figure 35. Les résidus peuvent être générés en utilisant le modèle physique, mais également les modèles "boîte noire" du procédé. La première phase de diagnostic par génération de résidus consiste à déterminer des grandeurs sensibles aux défauts et la seconde phase consiste à analyser ces grandeurs afin d'identifier et de localiser les défauts ou les défaillances détectées sur le procédé (Cocquempotet,al.,1998 ; Orjuela et al.,2009, ;Debiolles , 2007).

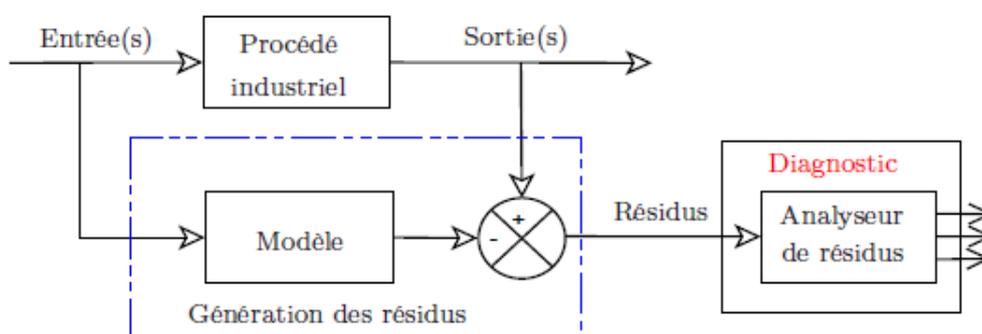
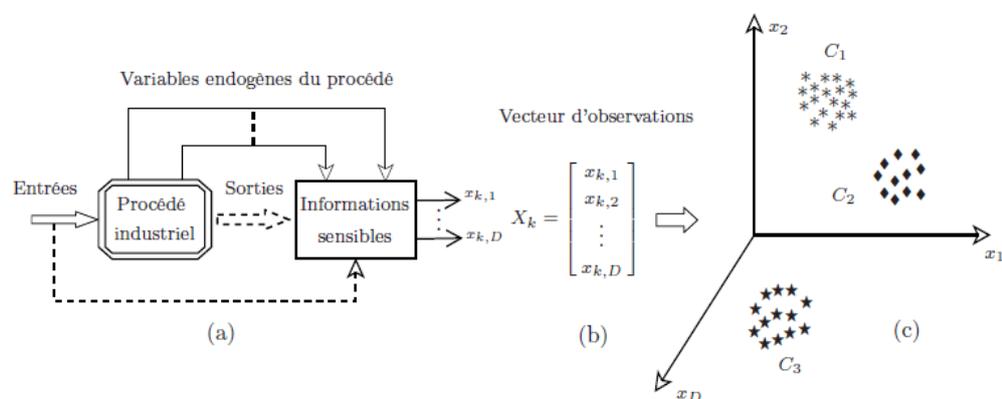


Figure 35 : Processus de diagnostic basé sur la génération de résidus (Cocquempot, et al, 1998)

Lorsque le modèle physique du procédé est inexistant ou difficile à obtenir, les méthodes externes peuvent être utilisées.

**2.7.4. Méthodes externes :** Le système de diagnostic par les méthodes externes est très répandu dans les applications industrielles, à cause, entre autres, de la difficulté liée à l'obtention de modèles physiques du procédé ou de ses composants. Les méthodes externes qui ne nécessitent pas de modèle physique du procédé sont particulièrement bien adaptées lorsque les seules informations disponibles sont les signaux issus des capteurs positionnés sur le procédé. Elles minimisent donc la connaissance a priori sur le procédé à surveiller. Les méthodes externes reposent uniquement sur l'analyse de données issues du procédé, que ce soit dans un historique ou en temps réel. Ces données sont souvent regroupées sous l'appellation vecteur d'observations. La procédure de diagnostic consiste à analyser un certain nombre de caractéristiques extraites du procédé, et à les associer à un mode de fonctionnement du procédé industriel.

Parmi les méthodes externes, nous trouvons les méthodes de diagnostic par RdF. Le diagnostic par RdF est privilégié pour des procédés complexes tels que les procédés chimique, biochimique, énergétique, etc. De nombreux travaux ont permis de montrer l'intérêt de ce type de techniques (Ondel, 2006 ; Dubuisson, 1993). Elles permettent de modéliser chaque mode de fonctionnement du procédé par une classe dans un espace de représentation (Lurette, 2003). Une classe est définie par un regroupement des observations selon leur similarité. La détermination des classes dans l'espace de représentation permet de définir l'espace de décision (figure 36C). Les classes sont obtenues par des techniques d'apprentissage et de classification utilisant un historique de données du procédé. L'affectation ou non d'une nouvelle observation  $X_k$  à l'une des classes indique une opération de classement ou de discrimination.

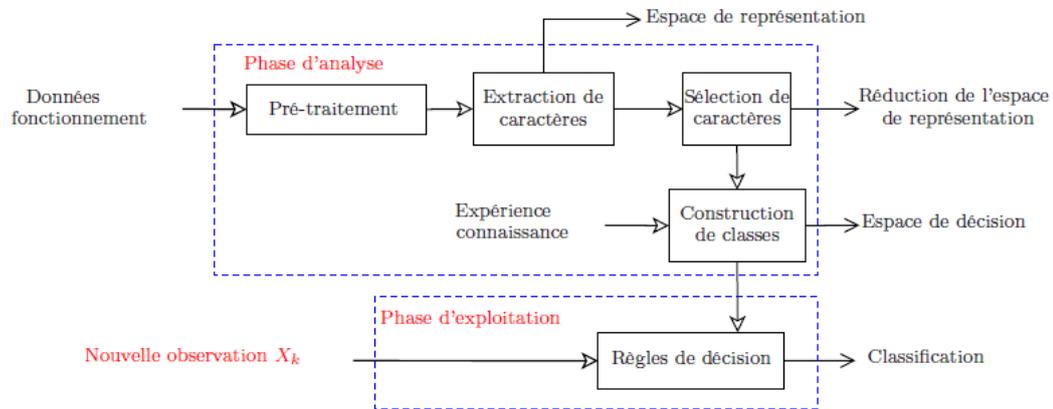


**Figure 36 : Techniques de RdF. (a) – extraction des informations sensibles à l'état du procédé, (b) – vecteur d'observation  $X_k$  et (c) – définition de l'espace de décision. (Lurette, 2003)**

**2.7.5. Diagnostic par les techniques de RdF :** Le processus de diagnostic par RdF est décomposé en deux phases importantes : une phase d'analyse et une phase d'exploitation. La figure 23 illustre la démarche à suivre pour la conception d'un processus de diagnostic par RdF.

- **Phase d'analyse :** Dans cette phase, il s'agit d'étudier les informations fournies par les différents capteurs, les historiques ainsi que l'expérience des opérateurs, afin de définir l'espace de représentation, de construire l'espace de décision du procédé et d'extraire les règles de décision. Les règles de décision permettront d'affecter ou non une nouvelle observation  $X_k$  à l'une des classes connues.

- **Espace de représentation. :** Après la phase de prétraitement, le vecteur d'observation  $X_k = (X_{k,1} \cdot \dots \cdot X_{k,D})^T$  est construit. Il est constitué des paramètres sensibles à l'état de fonctionnement du procédé. La dimension de l'espace de représentation correspond à la dimension du vecteur d'observation  $X_k$ . Les performances d'un processus de diagnostic dépendront de la pertinence des composantes constituant le vecteur d'observation  $X_k$ . Toutefois, il est important de signaler qu'un nombre important de paramètres peut être pénalisant en termes de temps de calcul. En effet, tous les paramètres calculés et constituant le vecteur d'observation initial ne seront pas forcément pertinents vis-à-vis des modes de fonctionnement du procédé.



**Figure 37 : Démarche de diagnostic par les techniques de RdF. (Hore et al, 2007)**

Il est donc nécessaire d'utiliser des méthodes permettant de réduire la dimension de l'espace de représentation en ne conservant que les paramètres les plus représentatifs et les plus sensibles aux évolutions de la dynamique interne du procédé. La réduction de l'espace de représentation peut être effectuée soit par la méthode d'extraction de paramètres, soit par la méthode de sélection des paramètres. La méthode de sélection des paramètres présente un double avantage. En effet, elle permet de réduire non seulement la dimension de l'espace de

représentation mais également le nombre de paramètres de représentation du système (**Ondel, 2006**).

- **Espace de décision** : La détermination de l'espace de décision consiste à partitionner l'ensemble d'apprentissage en un ensemble de  $N_c$  classes, c'est-à-dire de déterminer les régions de l'espace  $RD$  représentatives des différents modes de fonctionnement du système. Soit  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_N\}$  un ensemble de  $N$  observations recueillies sur le procédé, avec  $X_k = (x_{k,1} \dots x_{k,D})^T$ . L'objectif est de structurer les  $N$  échantillons en classes correspondant aux différents modes de fonctionnement du procédé industriel. Dans la littérature, il existe deux types d'approches permettant d'obtenir des frontières de décision entre les différents modes de fonctionnement : approche analytique et approche statistique (**Lurette, 2003 ; Ondel, 2006**). Une phase de validation de ces classes est nécessaire. La phase de validation peut être faite soit par un expert du système, soit par des critères de validité de la partition (**Hore et al, 2007**). Lorsque la classe correspondant à chaque observation est connue *a priori*, l'apprentissage peut être effectué en mode supervisé (classification supervisée) (**Boudaoud, 1997**). Malheureusement, il n'est pas toujours possible de disposer a priori des connaissances sur les modes de fonctionnement de chaque observation de la base d'apprentissage. Dans ce cas, le processus de diagnostic doit mettre en évidence une structure de classes dans un ensemble d'observations pour lesquelles aucune information quant à leur appartenance aux modes de fonctionnement n'est disponible. Il s'agit alors d'un apprentissage en mode non supervisé (classification non supervisée ou automatique). Lors de l'apprentissage non supervisé, il est important de noter que la labellisation des classes en termes de modes de fonctionnement reste très délicate, mais indispensable au processus de diagnostic. Cette tâche est généralement réalisée par un expert du système. Par ailleurs, il est possible de ne disposer que d'informations partielles sur les données d'apprentissage. Dans ce cas, la classification est faite en mode semi-supervisé. L'avantage de l'apprentissage semi-supervisé réside dans le fait que les deux types d'apprentissages supervisé et non supervisé cohabitent et se complètent (**Bissol, 2005**).

- **Phase d'exploitation** : La phase d'exploitation permet d'affecter chaque nouvelle observation  $X_k$  recueillie sur le système à l'une des  $N_c$  classes connues de la base de connaissance.

## 2.8. Les approches relationnelles

Les approches relationnelles sont des méthodes issues du contexte de la sûreté de fonctionnement qui associe des causes à des symptômes. Elles sont basées, en général, sur des systèmes à base de règles, de dictionnaires de défauts ou de graphes avec un raisonnement de

parcours ou adductif, sur la méthode AMDEC (*Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leurs Criticités*), sur les graphes PCEG (*Possible Cause and effect graph*), HDG (*Hazop-digraph*) ou sur les réseaux Bayesiens. Ce sont des approches de diagnostic fondées sur une connaissance associative dépendante du système et sur une connaissance a priori des défauts et de leurs effets. Elles manquent d'un pouvoir de réutilisabilité et nécessitent une énumération de tous les défauts possibles. Dans le cas des procédés complexes qui nous préoccupent, le nombre élevé de variables, de composants et de modes opératoires, rend leur utilisation peu adaptée. Nous présentons ces méthodes, issues des études de risques et de sûreté de fonctionnement, qui peuvent être utilisées pour identifier les causes des défaillances de processus industriels. Il s'agit, en fait, de l'analyse fonctionnelle et matérielle du système (**Mokhtari , 2007**).

- AMDE (Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets) : La méthode de l'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets fût employée pour la première fois, à partir des années 1960, dans le domaine de l'aéronautique pour l'analyse de la sécurité des avions (**Recht, 1966**). L'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE) est l'une des méthodes utilisées qui consiste à une méthode de travail d'équipe (systématique et proactive) et qui permet de trouver les défaillances possibles d'un processus ou d'un système. L'AMDE permet aussi de déterminer les effets de cette défaillance et la façon de rendre le processus ou le système plus sécuritaire.

**But** : Analyse préventive d'une conception du système en étudiant toutes les sources possibles de défaillances des composants de ce système et en déterminant les effets de ces défaillances sur le comportement et la sécurité du système. Doit mettre en évidence tous les risques potentiels.

**Description** : Les composants d'un système sont analysés les uns après les autres pour établir l'ensemble des modes de défaillance du système, leurs causes et leurs effets. On en déduit des procédures et recommandations pour la détection et la prévention des fautes. S'applique à un produit, un procédé, un service, un projet.

Permet d'en optimiser la fiabilité, en détectant les erreurs à un stade précoce et en les prévenant.

## **2.9. Les méthodes de traitement de données**

Les méthodes de traitement de données consistent dans l'exploitation des observations (le plus souvent quantitatives mais aussi parfois qualitatives). La seule information disponible, sur le procédé est sous la forme de données historiques ou de résultats de traitement en ligne des signaux issus de capteurs.

**2.9.1. Le diagnostic par Analyse Qualitative de Tendances(AQT) :** La représentation et l'analyse qualitative (symbolique) de signaux à travers l'information des dérivés de premier et deuxième ordre représentent l'une de principales techniques pour le diagnostic et la supervision basées sur des données et sur l'abstraction de la dynamique continue. L'*analyse qualitative de tendance* des signaux est basée, en général, sur la segmentation temporelle des signaux en unités, appelées épisodes, en fonction de leur pente et de leur convexité et d'une classification de ces épisodes. (Meléndez, 2001) énumèrent les besoins des systèmes de supervision qui motivent l'utilisation des méthodes d'analyse qualitative de tendances :

- L'incertitude, l'incomplétude et l'hétérogénéité (différentes échelles de temps par exemple) des données demandent un raisonnement qualitatif.
- Un raisonnement temporel est nécessaire non seulement sur des informations instantanées mais aussi sur le comportement historique.
- Face au volume de données présent dans les procédés complexes, il est souhaitable de posséder une représentation symbolique et adaptée au système de surveillance.
- La représentation de la connaissance doit être adaptée à l'interprétation de l'opérateur humain.

Relativement simple conceptuellement, l'AQT se trouve alourdie par certaines contraintes. L'observation des dérivées des signaux s'avère délicate. L'AQT implique la mise en œuvre d'un étage de filtrage de bruits et de traitement des discontinuités ou même la suppression de l'information d'ordre supérieur (dérivées). Pour le suivi et le diagnostic, le contexte temporel des tendances est fondamental. Le synchronisme ou l'alignement temporel entre le dictionnaire (signature) de tendances et les observations n'est pas facile à obtenir et des écarts faibles peuvent induire des erreurs d'interprétation et d'inférence au niveau du diagnostic. D'autres travaux fondés sur l'analyse qualitative de tendances (AQT) sont proposés pour le suivi, le diagnostic et la supervision des procédés complexes. La classification de tendances pour le diagnostic de procédés chimiques à travers une inférence floue est proposée par (Meléndez, 2001). Une matrice de similarité des primitives quantifie la mesure de distance (indices de similarité) ( $SI_j$ ) entre l'observation et la signature à travers une inférence floue qui permet une robustesse de l'identification de tendance.  $SI$  considère non seulement la séquence des primitives mais aussi l'intervalle de temps ( $\Delta t_i = t_{i+1} - t_{i-1}$ ). Un module de connaissance à base de règles s'appuie sur les indices des variables pour raisonner sur les hypothèses des défauts et les classer en fonction de l'indice de confiance globale ( $CI_i$ ). La figure 38 montre le schéma de l'approche.

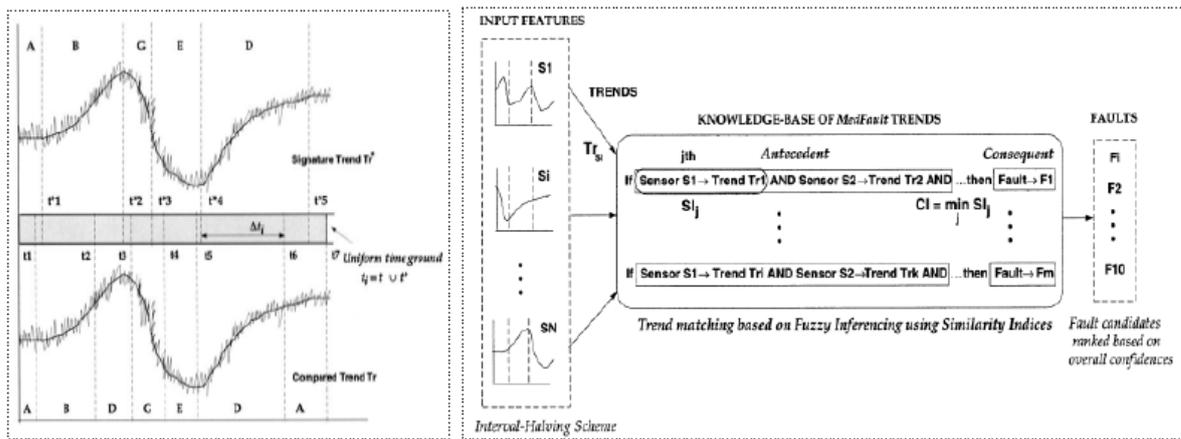


Figure 38 : L'approche d'AQT pour le diagnostic de défaut. (Meléndez, 2001).

D'une manière générale, les approches d'AQT présentent une contrainte importante pour le diagnostic. L'information individuelle de chaque variable, sans aucune vérification des influences entre elles, exige une description exhaustive des modes du procédé, et des comportements de défauts  $f_i \in F$ . La discriminabilité de défauts dépend alors d'un grand volume de données. L'information sur la dérivée de premier ordre de la trajectoire de comportement normal ne subissant pas un changement abrupt, l'approche s'avère inappropriée dans le cas de dérives lentes. Le mécanisme d'inférence floue de (Dash et al, 2003) ne distingue pas les écarts marginaux observés entre le dictionnaire et les observations. Il nous semble cependant que la démarche pourrait être étendue vers une solution permettant la discrimination de la nature des écarts.

**2.9.2. Analyse en Composantes Principales (ACP) :** L'analyse en composantes principales (ACP) est une technique statistique multi variable, Les techniques statistiques multi-variables sont des outils puissants, capables de comprimer des données et de réduire leur dimensionnalité de sorte que l'information essentielle soit maintenue et plus facile à analyser que dans l'ensemble original des données. Ces techniques peuvent également manipuler le bruit et la corrélation pour extraire efficacement l'information. La fonction principale de ce type de techniques est, par le biais d'une procédure mathématique, de transformer un certain nombre de variables corrélées en un ensemble plus petit de variables non corrélées.

L'ACP est essentiellement basé sur une décomposition orthogonale de la matrice de covariance des variables du processus le long des directions qui expliquent la variation maximale des données, c'est-à-dire que cette méthode recherche une projection des observations sur des axes orthogonaux. De ce fait, le premier axe contient la plus grande variation. Le deuxième axe contiendra la seconde plus grande variation orthogonale au premier.

Le but principal de l'ACP est donc de trouver un ensemble de facteurs (composantes) qui ait une dimension inférieure à celle de l'ensemble original de données et qui puisse décrire correctement les tendances principales. L'ACP est une procédure qui ne prend en compte que les variables du processus. Parfois, un ensemble additionnel de données est disponible, e.g. variables de qualité du produit. Il est souhaitable d'inclure toutes les données disponibles pour la surveillance du procédé et d'utiliser de cette façon les variables du processus pour prédire et détecter des changements dans les variables de qualité du produit. Pour cela, la méthode des Moindres Carrés Partiels (MCP) peut être utilisée (Venkatasubramanian et al, 2003). Cette méthode modélise le rapport entre deux blocs de données tout en les comprimant simultanément. Elle est employée pour extraire les variables latentes qui expliquent la variation des données du processus.

Divers travaux menés par Macgregor et al (2003) ; Macgregor et Kourti ,(1995) ont montré l'application des méthodes statistiques multi-variables telles que les ACP et MCP, dans l'analyse et la commande de processus, la détection et le diagnostic de défaillances, aussi bien dans le cas de procédés continus que dans les cas des procédés "batch" (continus par lots).

Une limitation importante de la surveillance basée sur l'ACP est que la représentation obtenue est invariante dans le temps, tandis que la plupart des processus réels évoluent au cours du temps. Par conséquent, la représentation issue de l'ACP nécessite également d'être mise à jour périodiquement. Un autre inconvénient est qu'elle ne possède pas des propriétés de *signature* pour le diagnostic, ce qui rend l'isolation des défaillances difficile.

## 2.10. Le diagnostic par reconnaissance de formes

**2.10.1. Le principe de base :** Un problème de diagnostic peut se définir comme un problème de reconnaissance de formes. Il a pour but la reconnaissance d'une forme parmi différentes possibilités à partir d'observations bruitées. Il existe plusieurs approches : la reconnaissance de forme *structurelle ou syntaxique* qui exploite les relations entre les composants de la forme et la reconnaissance de formes de *type numérique* (statistique, floue, etc.) qui exploite des modélisations de formes probabilistes ou floues (Denoeux, 2001).

Une forme est représentée par un ensemble de paramètres ou attributs caractéristiques qui peuvent être numériques ou symboliques. Un prototype est défini par des valeurs précises de l'ensemble des paramètres caractéristiques d'une situation particulière (défaillance dans notre contexte). Une classe est définie par un ensemble possible de valeurs des attributs et est représentée par son prototype. La classification d'un objet (la reconnaissance d'une forme) parmi M classes est la décision d'affecter l'objet à une classe particulière. Les classes peuvent être définies de façon *probabiliste* ou encore comme des *classes floues*. Dans le cadre du diagnostic,

le prototype 1 peut être lié au fonctionnement normal du procédé alors que les prototypes 2 et 3 peuvent représenter deux modes de défauts distincts. Le diagnostic consiste à décider de quel prototype cette forme est la plus proche en fonction d'un critère d'évaluation comme les distances euclidiennes (classes circulaires) ou les distances Malahanobis (classes elliptiques) par exemple. Dans (Dubuisson, 2001), les approches probabilistes et non probabilistes (*flou* et *crédibiliste*) sont développées en détail. La figure 39 nous résume le principe du diagnostic par reconnaissance de formes.

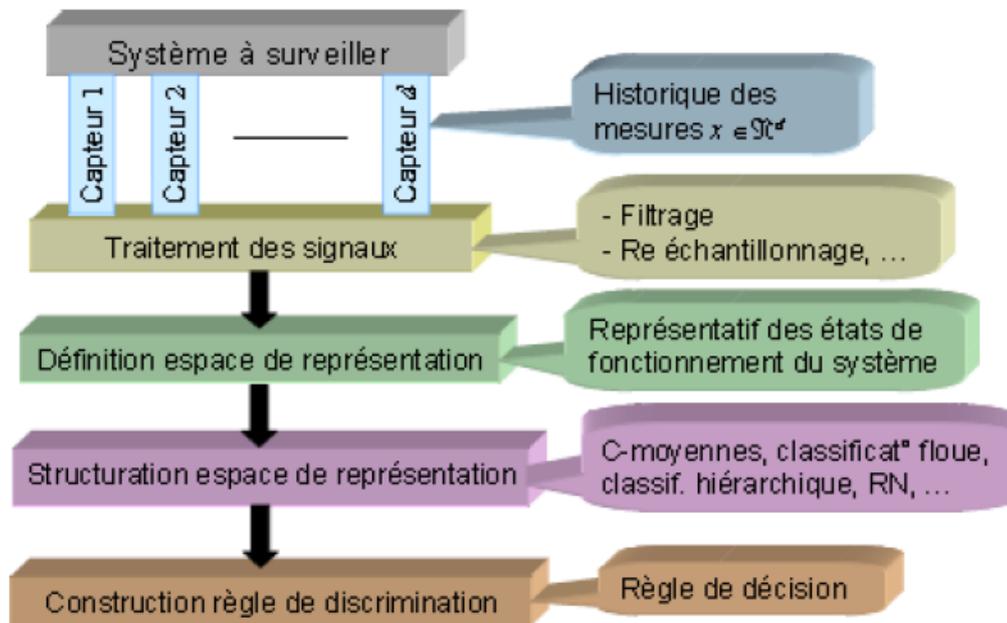


Figure 39 : Diagnostic d'un système avec l'approche par reconnaissance de formes (Dubuisson, 2001)

## 2.11. Conclusion

Nous avons présenté, dans ce chapitre, des généralités sur les défaillances, et différentes méthodes et modèles de diagnostic utilisés en maintenance pour identifier ou localiser l'origine des défauts ou des défaillances détectés sur le procédé. Nous avons donné quelques notions et définitions de base utilisés dans le domaine de diagnostic. Le prochain chapitre est consacré à la présentation des techniques de l'analyse vibratoire des machines tournantes.

Dans la littérature plusieurs techniques avancées de traitement de signal ont été proposées.

Chaque technique est basée sur un aspect théorique différent et les résultats obtenus sont généralement différents. Parmi ces techniques de diagnostic, l'analyse vibratoire a montré son efficacité et reste la méthode la plus couramment utilisée dans le domaine de surveillance et de diagnostic des défaillances. Là, les entreprises sont de plus en plus sensibles à l'importance et l'intérêt de la maîtrise des coûts induits par les défaillances accidentelles des systèmes de

production. Afin de maintenir cette opportunité et mettre en place un système de gestion de maintenance performant, l'industrie algérienne avec des machines très anciennes, est amenée à évaluer son système existant par rapport à ce qu'il devrait l'être d'une part et prendre les décisions stratégiques prioritaires de maintenance qui s'imposent d'autre part, objectif de ce travail.

## CHAPITRE 3

### PRESENTATIONS DE L'ANALYSE VIBRATOIRE

#### 3.1 Introduction

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. (Analyse vibratoire en maintenance ( **Boulenger et Pachaud , 2003**).

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 (le plus 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.

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'analyse vibratoire avec les différents aspects et définitions liées aux vibrations des machines tournantes.

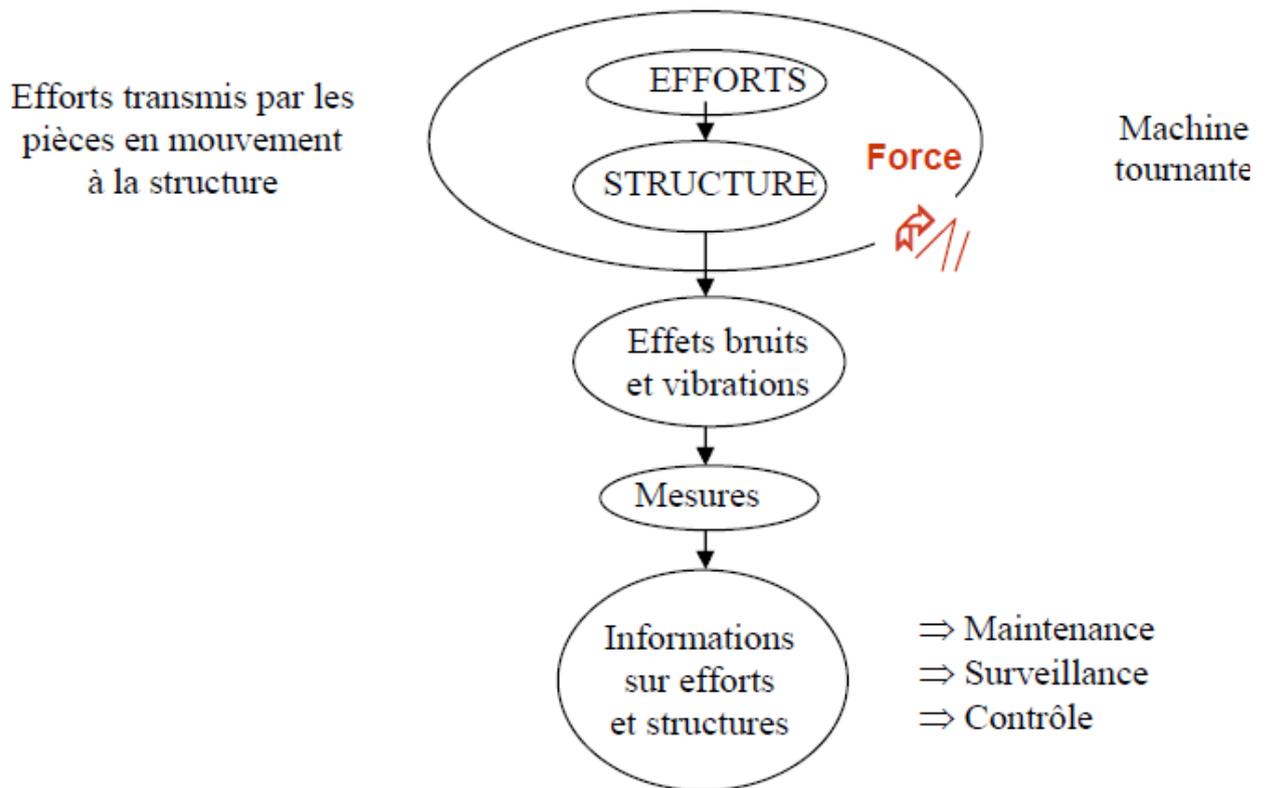


Figure 40 : Principe de la surveillance vibratoire (Belhour , 2008)

### 3.2. Notions fondamentales

Une des questions les plus importante qui se pose ici, est de savoir comment naissent et d'où proviennent les dérèglages, dysfonctionnements ou pannes sur une installation. L'analyse de la signature vibratoire est la méthode la plus célèbre de diagnostic qui répond à cette question. <sup>2</sup>

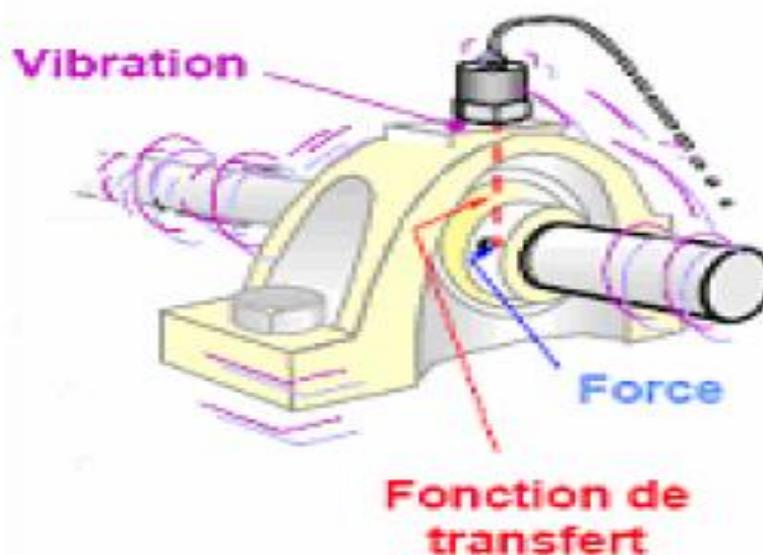


Figure 41 : Mesure d'une vibration. (Belhour , 2008)

**3.2.1. 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. Une vibration se caractérise principalement par sa fréquence, son amplitude et sa nature (**Lendolsi, 2010**).

**a. Fréquence**

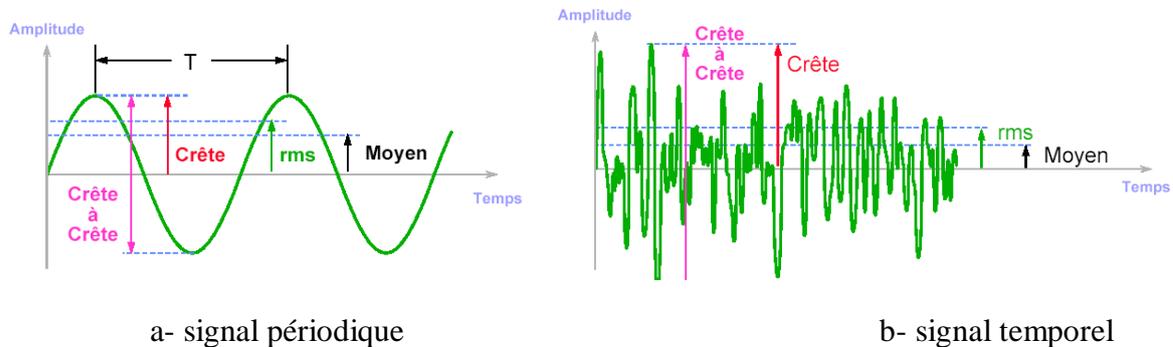
La fréquence est le nombre de fois qu'un phénomène se répète en un temps donné. Lorsque l'unité de temps choisie est la seconde, la fréquence s'exprime en hertz (Hz).

1 hertz = 1 cycle/seconde. Une vibration qui se produira 20 fois par seconde aura donc une fréquence  $f$  de 20 hertz.

**b. Amplitude**

**c. Nature d'une vibration :** n'importe quelle machine tournante en fonctionnement génère des vibrations que l'on décrira dans la partie suivante..

**3.2.2. Description d'un signal vibratoire :** Généralement, une vibration est caractérisée principalement par sa fréquence, son amplitude et sa nature, figure 42.



**Figure 42 : Description du signal vibratoire (Chaib, 2009).**

- La valeur maximale **X<sub>c</sub>** (crête) : c'est la plus grande valeur atteinte qui ne prend pas en compte l'évolution de la vibration en fonction du temps. Elle est rarement utilisée ;
- La valeur crête à crête **X<sub>cc</sub>** (crête à crête) : c'est la différence entre la plus grande valeur du signal et sa plus petite valeur ;
- La valeur moyenne absolue **X<sub>moy</sub>** : c'est la moyenne du signal redressé sur une période ; elle est peu utilisée car elle n'est pas reliée directement à une grandeur physique,

$$X_{\text{moyenne}} = 1/T \int_0^T x(t) dt \quad (3.1)$$

- La valeur efficace RMS (RootMean Square) : c'est l'image de l'énergie contenue dans un signal. Elle est exprimée en unité physique (m/s<sup>2</sup>, m/s, m ou g pour les vibrations par exemple). Elle est très bien adaptée pour les composantes déterministes du spectre (raies pures). La valeur efficace se détermine par la formule suivante :

$$\text{Valeur efficace (RMS)} = \sqrt{1/T \int_0^T x^2 dt} \quad (3.2)$$

**Le facteur de crête:** ce facteur est défini par la relation :

$$F_c = X_c/RMS \quad (3.3)$$

C'est un indicateur sans dimension. Il faut remarquer que l'amplitude nous renseigne sur l'importance du défaut surveillé, alors que la fréquence nous renseigne sur son origine.

### 3.3. Analyse vibratoire

Actuellement, les techniques à base d'analyse vibratoire sont largement les techniques les plus célèbres dans le domaine de détection des défauts des machines tournantes ( **Fakhfakh, 2005**)

L'analyse vibratoire est l'un des plus importants moyens de tests pour comprendre l'état de la machine. Le niveau et le comportement du signal vibratoire dépend des conditions internes de la machine tournante. L'analyse se fait par la comparaison avec une valeur de référence.

La figure 43 illustre un exemple de visualisation des mesures tout en effectuant les comparaisons avec les valeurs de référence.

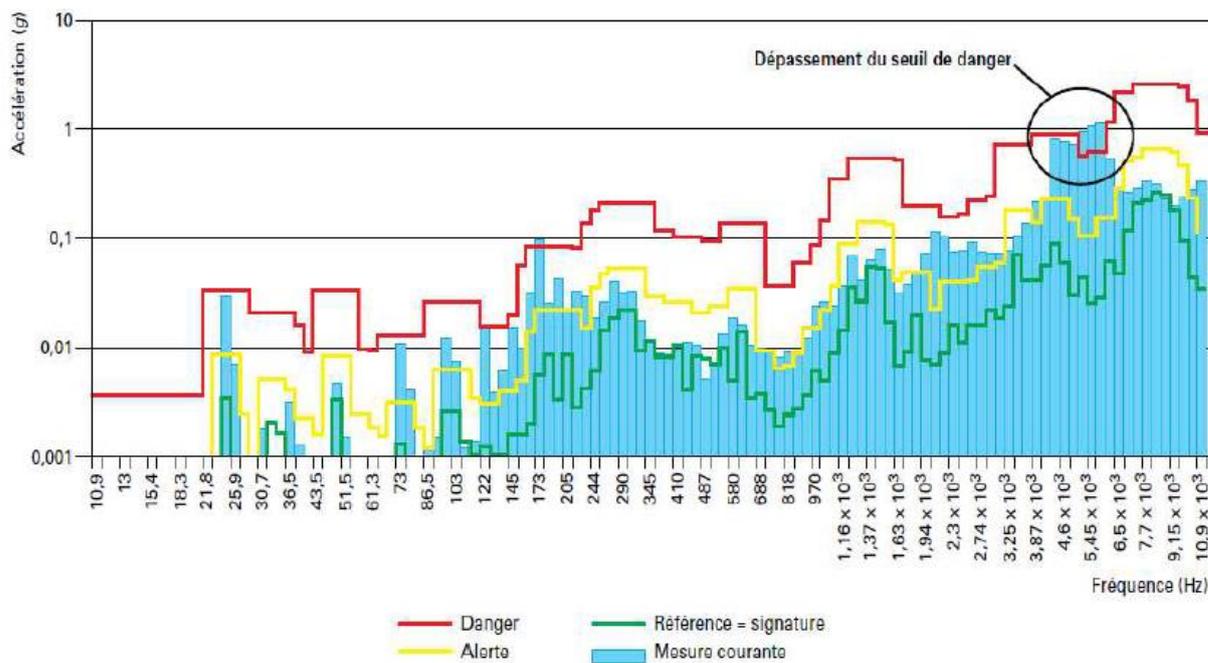


Figure 43 : Visualisation des mesures de surveillance (Augeix, 2002)

**3.4. Surveillance et détection :** Turbines, pompes, moteurs, compresseurs, alternateurs, centrifugeuses, ventilateurs...toutes ces machines, que l'on dit : tournantes, ont un point commun : elles comprennent des organes en rotation. Suivant les cas, il peut s'agir de structures relativement simples, constituées d'un seul arbre en rotation à travers un ou plusieurs roulements, ou de machines plus complexes composées de plusieurs arbres tournant à des vitesses de rotation différentes... Mais ce qui caractérise avant tout ces machines, c'est qu'elles sont composées d'organes fragiles (roulements et engrenages, notamment) soumis à des contraintes mécaniques importantes et à des environnements industriels difficiles. Les sources de défaillance sont donc multiples : l'écaillage d'un roulement, la rupture d'une dent d'un engrenage, le désalignement d'un des axes, etc. Lorsque la machine joue un rôle vital dans la production (c'est le cas par exemple d'une presse dans le domaine de l'imprimerie, d'un broyeur de cimenterie ou encore d'une centrifugeuse dans un réacteur chimique...), ces défauts peuvent s'avérer lourds de conséquences. Pour éviter des arrêts de production imprévus et les pertes économiques qui en découlent, il faut surveiller en permanence ces équipements et traquer tous les signes précurseurs de défauts avant qu'il ne soit trop tard. (Nabti, 2011) .

### 3.5. Les capteurs de vibration

Le premier élément de la chaîne de mesure est le capteur de vibrations. Dans l'industrie le type le plus utilisable est l'accéléromètre ou capteur piézoélectrique. Généralement, le principe de fonctionnement des accéléromètres est de produire un signal électrique relatif au niveau de vibration (Chaehoi, 2005).

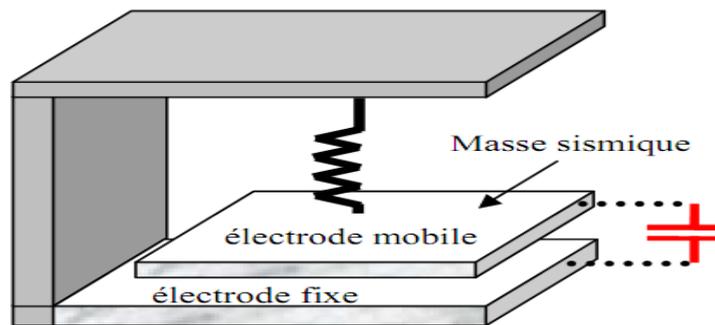
Le choix de la façon d'utilisation de l'accéléromètre joue un rôle essentiel dans la prise de mesure. Les résultats des accéléromètres sont affectés par leur mode de fixation et leur emplacement. Il faut une liaison parfaite pour réaliser la fixation du capteur sur la structure vibrante. Il existe plusieurs modes de fixation tels que le goujon vissé, l'embase collée, l'embase magnétique et la pointe touche. Ces différents modes jouent un rôle important dans la mesure correcte des vibrations. La conception du capteur est en fonction du choix de l'emplacement de ce dernier. L'accéléromètre doit être placé à un endroit où la mobilité est maximale. Pour éviter les interférences extérieures, il faut placer le capteur près du défaut potentiel.

#### 3.5.1. Types et caractéristiques des capteurs

**3.5.1.1. Les différents types des capteurs de vibration :** Dans la dynamique, La loi fondamentale est la relation entre l'accélération (A) appliquée à un corps et la force (F), alors on écrit :  $(F=M*A)$ ; où m est la masse. L'interaction entre la force et l'accélération est réciproque. La plupart des accéléromètres fonctionnent selon ce principe.

L'évaluation de l'accélération est faite par la mesure de la force exercée sur un corps d'épreuve, ou encore la déformation que cette dernière produit sur une structure. Divers techniques existes pour estimer le déplacement du corps d'épreuve. Les principaux types d'accéléromètres existants sont décrits et résumés ci-dessous (Chaehoi, 2005).

**A- L'accéléromètre à détection capacitive :** Actuellement, les accéléromètres à détection capacitive sont les capteurs les plus utilisés. Leur principe de fonctionnement est illustré dans la Figure 44. La partie du capteur sensible à l'accélération est le corps d'épreuve (est une électrode mobile). Entre le corps d'épreuve et une partie fixe du système, la capacité est formée. Lors de l'accélération, l'éloignement et le rapprochement du corps d'épreuve à l'élément fixe varie la capacité, dans ce cas la détection consiste à évaluer l'accélération.



**Figure 44 : Le principe de l'accéléromètre capacitif (Chaehoi, 2005)**

Deux types de gravure sont utilisés pour les accéléromètres à détection capacitive. Deux étapes post-process sont nécessaires pour la gravure en volume (bulk micromachining) : l'une

Pour supprimer le diélectrique et l'autre pour libérer la partie mobile. Pour obtenir des structures suspendues, il faut utiliser la gravure en surface (surface micro-machining) qui consiste à éliminer des couches superficielles. Le gap entre les différents doigts étant très petit (de l'ordre du micron) cette technique permet de réaliser des capacités (de l'ordre du femto Farad). Les avantages des structures capacitives sont: une faible sensibilité aux variations de température, une bonne réponse statique et une bonne performance en termes de bruit. À l'aide d'une force électrostatique, on utilise un retour de la force sur les structures qui permettra d'augmenter la robustesse du système face à des chocs élevés ou des vibrations de très grande amplitude, d'augmenter la linéarité et la stabilité, d'améliorer la réponse en fréquence, et enfin d'élargir la bande passante (Chaehoi, 2005).

Ces structures sont sensibles aux interférences électromagnétiques à cause de leur nature capacitive. Le conditionnement de l'électronique devient ainsi plus complexe. Une électronique performante est exigée pour obtenir une bonne résolution de petites variations de capacité lors du fonctionnement. La figure 45 montre une structure d'accéléromètre à détection capacitive. Les capacités sont formées par des poutres disposées de façon à établir des peignes inter-digités. Le corps d'épreuve est un peigne mobile inter-digité avec un peigne fixe. Des capacités sont obtenues entre les doigts des peignes. Il y a des problèmes d'alignement des éléments capacitifs car les poutres formant les capacités se courbent à l'issue de la fabrication.

Pour les accéléromètres verticaux, les performances en termes de bruit sont de l'ordre du  $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$  et pour les accéléromètres latéraux sont de l'ordre de la centaine de  $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ .

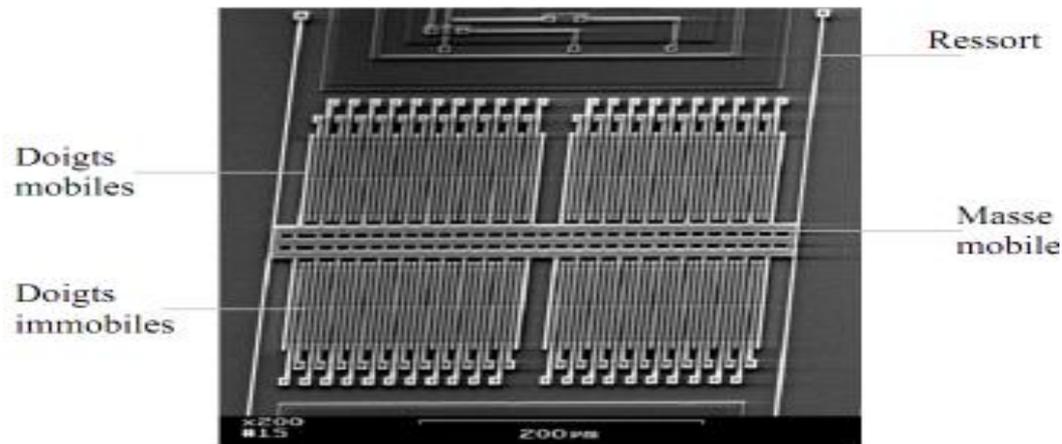


Figure 45 : Accéléromètre à détection capacitive (Roylance et Angell , 1979)

Dans les premiers accéléromètres, généralement la détection piézorésistive est utilisée jusqu'à présent dans certains capteurs commercialisés. Les microsystèmes à détection piézorésistive sont réalisés exclusivement par l'utilisation de procédé de gravure en volume (bulk micromachining). Tirant profit de la philosophie de la technologie de fabrication des capteurs de pression, les accéléromètres à détection piézorésistive micro-usinés en volume ont été développés et sont aujourd'hui en production (Roylance et Angell , 1979)

Le corps d'épreuve est une poutre ou une masse suspendue, la variation de la résistance d'un élément piézorésistif permet de mesurer la déformation de la structure lors de l'accélération, la figure 46 illustre ce principe. L'intégration de ces capteurs est facile en technologie.

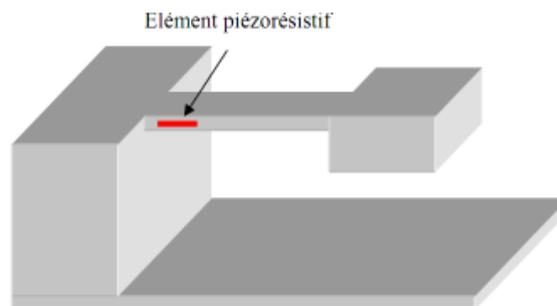


Figure 46 : Principe de l'accéléromètre à détection piézorésistive (Kwon K, Sekwang P, 1998)

## B- L'accéléromètre à détection à base de piezojonction de transistor

Les conséquences des contraintes mécaniques sur le comportement des transistors ont été étudiées car des contraintes sur les circuits électroniques peuvent apparaître lors de l'encapsulation. Dans ce type d'accéléromètre la piézo-sensibilité des transistors bipolaires est

utilisée à la place des jauges piézo-résistives pour la mesure du signal. La contrainte exigée entraîne une repopulation des électrons dans le canal du transistor et échange ainsi le mouvement des électrons. Dans ce cas, on utilise un transistor comme un élément sensible qui réduit considérablement la taille de l'élément de transduction à la place de piézo-résistances. Cette approche a l'avantage de diminuer largement la puissance consommée par rapport à la détection piézo-résistive, ce qui représente un atout pour certaines applications (Chaehoi, 2005).

**C-L'accéléromètre à détection piézoélectrique :** Un corps ayant la propriété de montrer un potentiel à ses bornes lorsqu'il est soumis à une force est appelé un corps piézoélectrique. Les matériaux utilisés sont souvent le ZnO ou le PZT (Piezoelectric lead Zirconate Titanate). Pour réaliser une contre réaction sur la structure, on utilise la propriété inverse de la piézoélectricité. Pour ce type d'accéléromètre, on peut utiliser un élément piézoélectrique unique (dans ce cas on échantillonne le temps et on le partage entre l'actionnement et la mesure) ou alors deux éléments piézoélectrique (ici les deux éléments forment un sandwich, l'un servant à l'actionnement et l'autre à la mesure). L'avantage de cette détection est la transduction à puissance consommée nulle (les variations de contraintes engendrant un potentiel).

Deux types de gravure sont utilisés dans les accéléromètres à détection piézoélectrique, le premier type est bulk-micromachining et le deuxième type est surface-micromachining. Cette méthode de détection n'est pas acceptable avec une fabrication complètement CMOS (full-CMOS), il a besoin de dépôt de films piézoélectriques sur les structures. Les Figures 47 et 48 illustrent un accéléromètre à détection piézoélectrique (Chaehoi, 2005)

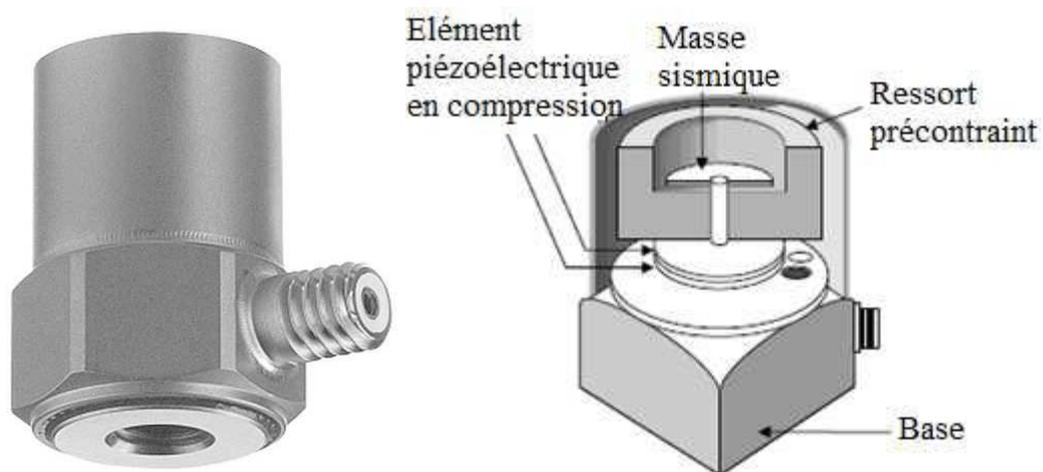


Figure 47 : Exemple d'un accéléromètre piézoélectrique (Boulenger et Pachaud ,1998)

L'effet piézoélectrique produit une accumulation de charges opposées dans le cristal. Ces charges sont proportionnelles à la force appliquée. La force appliquée au cristal de quartz alterne les ions positifs et les ions négatifs sur la surface opposée. (Ayad, 2015)

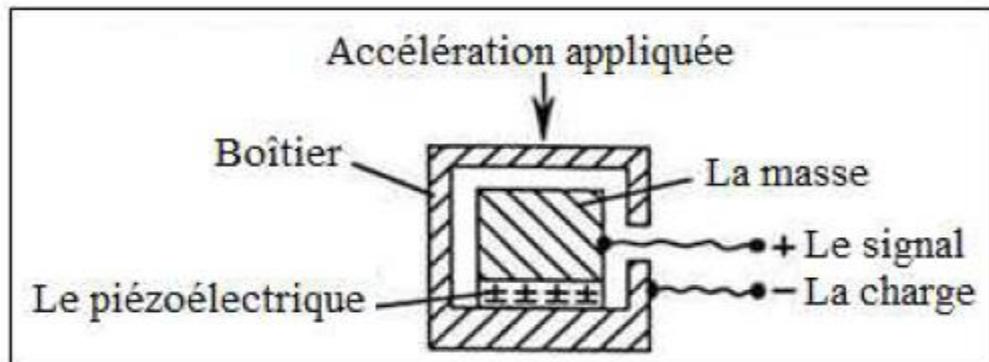


Figure 48 : L'effet piézoélectrique (Boulenger et Pachaud ,1998).

### 3. 6. Choix de l'emplacement des capteurs

#### 3.6.1 La fixation des capteurs

- Le placement des capteurs doit être lié directement avec les paliers, en bornant au strict minimum le nombre de pièces garantissant l'interface entre l'élément mouvant et le capteur
- L'endroit des points de mesure doit être propre (pas de traces de graisse ou de peinture) et les surfaces de contact avec les capteurs lisses, planes et verticales à la direction de mesure.
- La prise de la mesure est opérée par un capteur au point judicieusement choisi en fonction des raideurs lorsque le palier est difficilement abordable de manière directe.
- Les mesures sont procédées toujours au même lieu sur la machine. Les points de mesure sont repérés, soit par la peinture, soit par place de goujons (**Landolsi**).

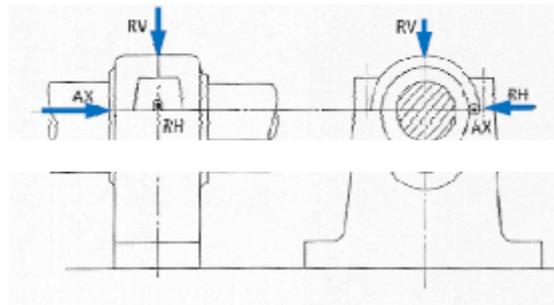
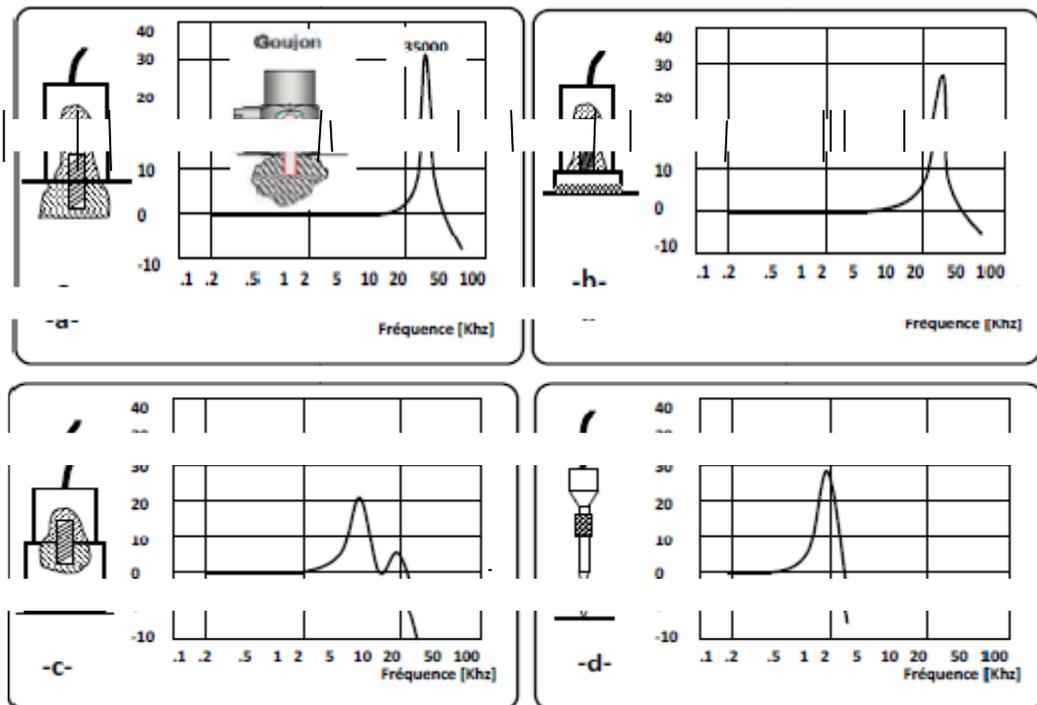


Figure 49 : Choix directionnel pour la prise de mesure (Landolsi).

**3.6.1.1. Les modes de fixation :** L'effet de la fixation du capteur sur la structure peut agir sur la qualité du signal capté. Il existe diverses façons de fixer le capteur sur la machine : lié à même structure, fixé sur une embase collée, magnétique pour les structures ferriques, ou collé avec une pointe touche. Cette fixation joue un rôle important sur les mesures, et la largeur de la bande peut être affectée. Afin que la reproductibilité et la fiabilité des mesures soient bonnes même en basses fréquences, il est recommandé d'utiliser des embases collées (cyanoacrylate de méthyle). L'accéléromètre doit être installé en des lieux (pas toujours abordables) de la structure où la mobilité est maximale pour la bande de fréquences étudiée. La tendance actuelle est de fixer le capteur près du composant à suivre, en limitant les distances et les contacts, le signal sera moins perturbé. La réponse des accéléromètres est linéaire sur une large gamme de fréquences, qui peut être réduite en fonction de leur mode de fixation (figure 50). Il faut effectuer les mesures dans une gamme de fréquences inférieures à la fréquence de résonance du capteur pour obtenir des résultats fiables et précis (**Landolsi**)



**Figure 50 : 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 (Landolsi)

### 3.7. Les signaux

On désigne, sous ce vocable très général, toute grandeur pouvant avoir un effet sur une structure pour modifier son équilibre ou son comportement : force, tension, accélération, vitesse, pression acoustique, etc. Les vibrations mécaniques sont des mouvements oscillant autour d'une position moyenne d'équilibre. Ces mouvements oscillants caractéristiques de l'effort qui les génère, peuvent être, soit périodiques, soit apériodiques (transitoires ou aléatoires) selon qu'ils se répètent ou non, identiquement à eux-mêmes après une durée déterminée. D'une manière générale, les différents signaux peuvent être classés dans l'une des catégories suivantes :

**3.7.1 Signaux harmoniques :** Les vibrations périodiques peuvent correspondre à un mouvement sinusoïdal pur comme celui d'un diapason où, plus généralement, à un mouvement complexe périodique que l'on peut décomposer en une somme de mouvements sinusoïdaux élémentaires, plus faciles à analyser. Les mouvements sinusoïdaux élémentaires sont appelés « composantes harmoniques » et leurs fréquences sont des multiples entiers de la fréquence du mouvement étudié qui est appelée « fréquence fondamentale » ou fréquence de l'harmonique d'ordre 1. Donc, une vibration harmonique est une vibration dont le diagramme *amplitude-temps* est représenté

par une sinusoïde (figure 51). Le meilleur exemple d'une vibration harmonique est celle générée par le balourd d'un rotor en mouvement.

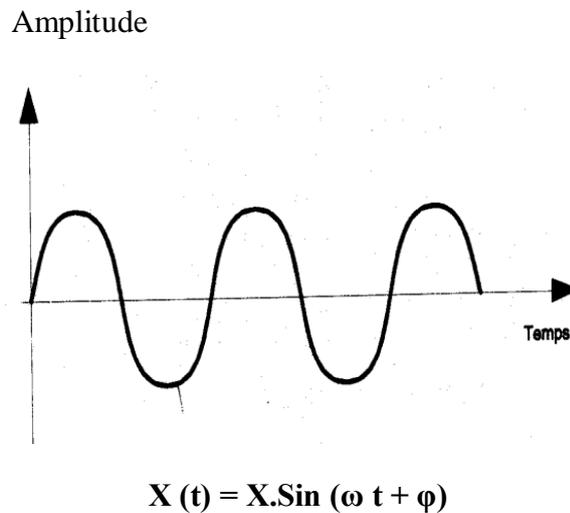


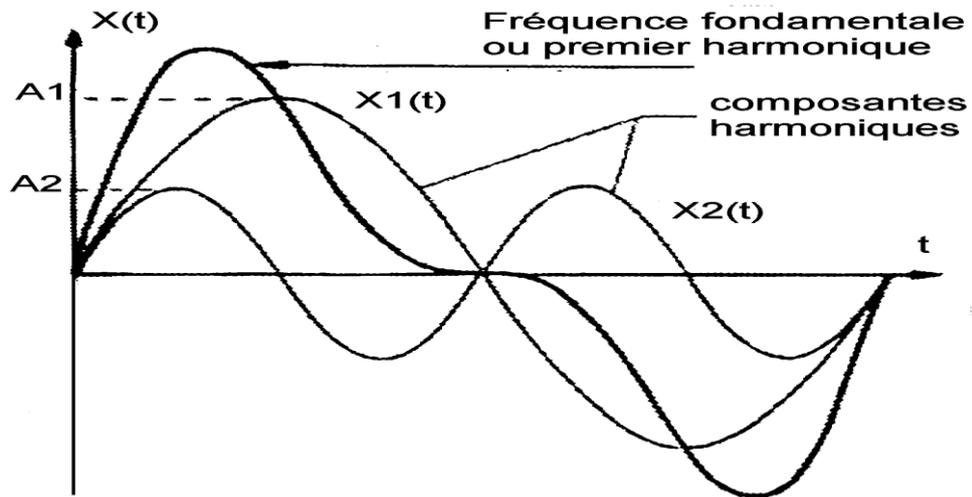
Figure 51 : Représentation d'un signal harmonique (Chaib, 2009).

Ou  $\omega$  : Vitesse angulaire ou pulsation du mouvement ( $2\pi f$ ), exprimée en rad/s ( $\omega = 2\pi f$ ).

$f$  : fréquence du mouvement (Hertz), c'est la cadence du phénomène ( $f = 1/T$ ).

$\varphi$  : phase du mouvement par rapport à un repère dans le temps.

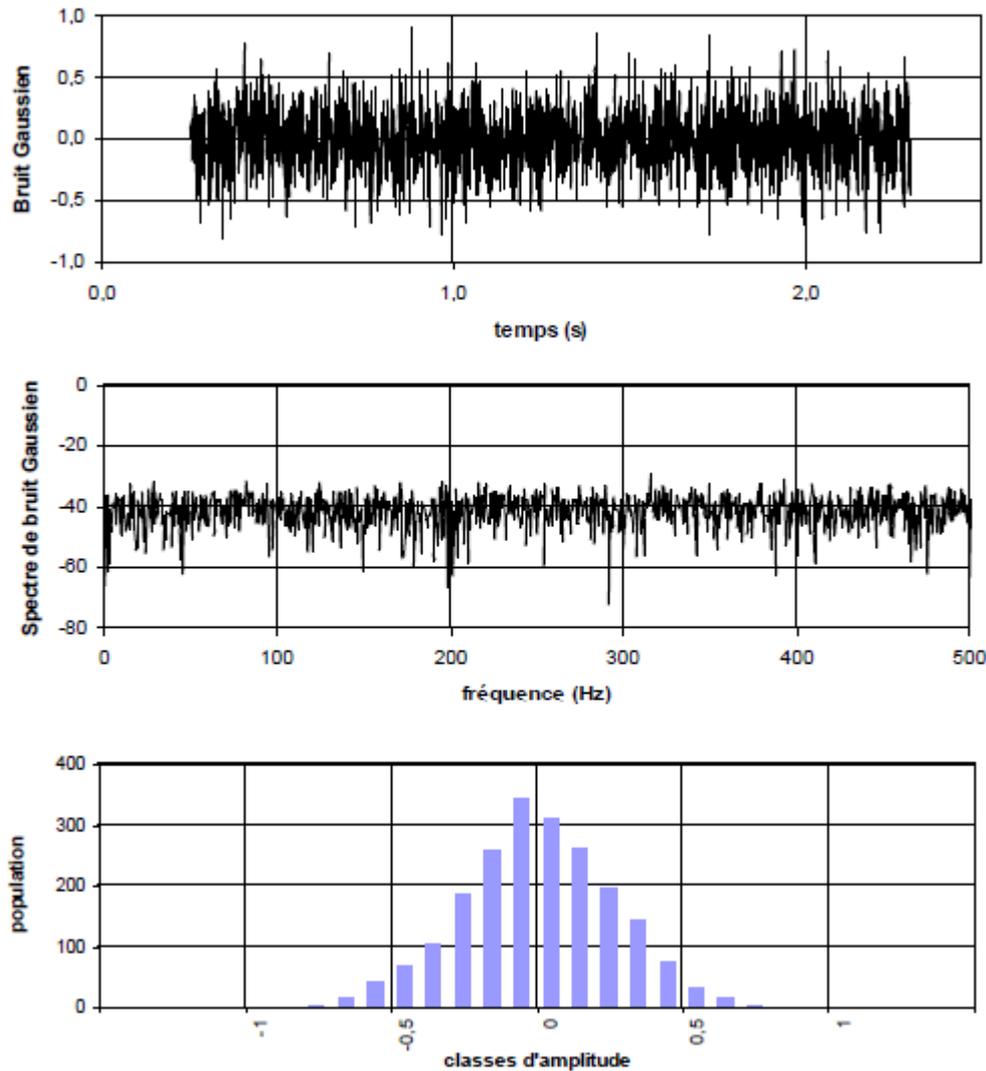
**3.7.2. Signaux périodiques non harmoniques :** Une vibration périodique est une vibration qui se produit exactement après un certain temps, appelée période. Cette vibration est créée par une excitation elle-même périodique. C'est le cas le plus fréquent rencontré sur les machines tournantes. Ce type de vibration est composé de plusieurs vibrations harmoniques. Donc, un signal périodique non harmonique est une somme de signaux harmoniques de différentes amplitudes maximales (constantes) mais dont les pulsations sont multiples d'une pulsation dite fondamentale, comme l'illustre la figure 52. Le signal est connu à l'instant  $t$  et se retrouve rigoureusement identique à l'instant  $t \pm nT$  ( $n$  étant un nombre entier).



$$X(t) = x_0 \sin \omega t + x_0/2 \sin 2 \omega t$$

Figure 52 : Représentation d'un signal périodique non harmonique (en trait fort) et ses deux composantes harmoniques (en trait fin) (Chaib, 2009).

**3.7.3. Signaux transitoires et aléatoires :** Une vibration aperiodique est une vibration dont le comportement temporel est quelconque. Dans une telle situation, on n'observe jamais la reproductibilité dans le temps, figure 53. C'est pourquoi, les vibrations aléatoires ne peuvent être représentées mathématiquement que par une série de relations de probabilités car il faudrait théoriquement un temps infini pour les analyser, mais on peut considérer que la fonction aléatoire est une fonction périodique dont la périodicité est égale à l'infini et que cette fonction est constituée d'une infinité de fonctions sinusoïdales dont la fréquence varie de façon continue. C'est le cas de chocs que l'on enregistre par exemple sur un broyeur. La figure 10 montre deux exemples de signaux non périodiques. Un signal transitoire (à gauche) se produit pendant un intervalle de temps limité. Les signaux aléatoires ont leurs caractéristiques d'amplitudes et de fréquences qui changent aléatoirement en fonction du temps. Ces vibrations caractéristiques sont donc toutes identifiables et mesurables. La tendance à l'accroissement de leur intensité est représentative de l'évolution de l'effort qui les génère et révélatrice du défaut qui se développe. Parmi l'ensemble des processus stochastiques, le processus aléatoire de Gauss est particulièrement utilisé dans l'étude des comportements vibratoires. La justification est donnée par le théorème de la limite centrale qui établit que la réponse d'un système résonant soumis à une excitation large bande tend à être Gaussienne, même si l'excitation ne l'est pas (Lalanne, 1999). C'est aussi le cas général de grandeurs qui sont la conséquence d'un grand nombre de sources de bruits indépendantes.



$$X(t) = \sum (X_i \sin(\omega_i t + \phi_i))$$

Figure 53 : Chronogramme, spectre et histogramme d'un signal aléatoire issu d'un processus Gaussien. ( Rakoto,2010)

**3.8. Signatures vibratoires** Les signatures vibratoires sont adaptées à la détection d'anomalies affectant des ensembles mécaniques dont les éléments structuraux sont soumis à des efforts mécaniques dynamiques se traduisant par des vibrations mécaniques. L'analyse vibratoire détecte les mouvements répétitifs d'une surface appartenant à un matériel mécanique dynamique (machines tournantes, machines alternatives, etc.) ou à un matériel statique (structure, tuyauteries, etc.). Le mouvement vibratoire lié à une anomalie mécanique peut se classer en trois catégories. Pour la majorité des défauts mécaniques rencontrés sur les machines tournantes, les vibrations sont de nature périodique et se répètent de façon identique au cours du temps. Pour des défauts qui se traduisent par des chocs sur des structures, les vibrations seront caractérisées par des signaux transitoires de faible durée qui sont de nature répétitive ou aléatoire. Enfin il est

possible de rencontrer des vibrations ayant un caractère aléatoire au cours du temps (exemple de la cavitation de pompe).

Essentiellement, les mouvements caractérisés par des vibrations sont appréciés par des amplitudes et des fréquences, c'est pourquoi l'interprétation des signaux vibratoires fait appel à l'analyse temporelle et à l'analyse fréquentielle utilisant le plus souvent la transformée de Fourier. Le principe de l'analyse fréquentielle des vibrations revient à considérer le signal vibratoire comme une somme de fonctions sinusoïdales dont les valeurs de fréquences sont des multiples entiers d'une fréquence appelée fréquence fondamentale. En l'absence de défauts, les différentes fréquences contenues dans le signal sont directement liées à la géométrie et à la vitesse de rotation de l'élément mécanique.

La présence d'un ou plusieurs défauts se traduit par l'apparition de nouvelles fréquences que les experts sont souvent capables d'interpréter, si la mesure de vibration est faite au voisinage direct du défaut. En revanche, si le point de mesure est éloigné de la source initiale, la contribution parasite de nombreuses sources de vibrations qui se propagent dans les structures mécaniques et qui vient masquer le signal utile, rend extrêmement complexe l'interprétation des signaux vibratoires. Le traitement des signaux industriels conduit toujours à des spectres représentés par des courbes continues comprenant de nombreux pics. La présence de pics indique que le signal contient des composantes périodiques. Le fond continu est dû à la présence de bruit ou d'informations déterministes non périodiques. Grâce aux outils modernes de la simulation en mécanique vibratoire et à leurs validations avec des essais réels, il est possible, connaissant la vitesse de rotation d'une machine, d'interpréter physiquement les pics relevés pour tous les harmoniques. Il faut souligner que l'établissement et l'analyse des signatures initiales constituent la fondation sur laquelle repose la fiabilité de la surveillance et des diagnostics ultérieurs. L'opération se déroule en trois phases distinctes : la prise de mesures, le diagnostic, l'optimisation des indicateurs de surveillance et des seuils et gabarits d'alarme.

**3.8.1. Analyse harmonique, série de Fourier :** Physiquement, les signaux sont enregistrés sous la forme de la variation d'un paramètre (force, contrainte, amplitude, accélération, tension, pression, etc.) en fonction du temps. Or il est souvent plus facile de caractériser un signal dans le domaine fréquentiel. Cette représentation est obtenue grâce au théorème de Fourier qui démontre que toute fonction périodique  $f(t)$  de période  $T$ , peut se représenter par la somme d'une série de fonctions sinusoïdales de périodes  $T, T/2, \dots, T/k \dots$  que l'on appelle série de Fourier que l'on peut écrire sous la forme d'un développement :

$$f(x) = a_0 + \sum_{K=1}^{\infty} \left( a_k \cos \frac{2\pi kt}{T} + b_k \sin \frac{2\pi kt}{T} \right) \quad 3.4$$

Où les coefficients  $a_0$ ,  $a_k$  et  $b_k$  ont les expressions suivantes :

$$a_0 = \int_0^T 1/T f(t) dt \quad 3.5$$

$$a_k = \int_0^T 2/T f(t) \cos\left(\frac{2\pi kt}{T}\right) dt \quad 3.6$$

$$b_k = \int_0^T 2/T f(t) \sin\left(\frac{2\pi kt}{T}\right) dt \quad 3.7$$

L'ensemble des valeurs des coefficients  $a_k$  et  $b_k$  forme le spectre de fréquences de la fonction  $f(t)$ . Un formalisme plus simple est possible en utilisant des fonctions exponentielles imaginaires, à savoir :

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k \exp\left(2i \frac{\pi kt}{T}\right) \quad 3.8$$

$$c_k = 1/T \int_0^T f(t) \exp\left(-2i \frac{\pi kt}{T}\right) dt \quad 3.9$$

Dans la pratique, cela veut dire que l'on peut décomposer notre fonction comme une somme de sinus (cosinus) de périodes multiples de la période de base de notre fonction. Les coefficients représentent ainsi les niveaux « énergétique de chacune des fréquences élémentaires ». L'application principale de l'analyse FFT est donc la mise en évidence des périodicités du signal et le calcul de l'énergie contenue dans le signal pour chacune des fréquences.

La notion de transformée de Fourier peut être étendue à des fonctions non périodiques (aléatoire par exemple). La fréquence  $1/T$  du terme fondamental tend alors vers 0, et les fréquences des différents harmoniques se rapprochent pour donner à la limite une fonction continue de la variable  $F=1/T$ . La fonction  $f(t)$  n'est plus représentée par une somme de composantes de fréquences discrètes, mais par une intégrale sur toutes les valeurs des fréquences  $F(v)$  (Baudy et al, 1994).

$$f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(V) \exp(2i\pi vt) dt \quad 3.10$$

Remarques :  $F(v)$ , spectre de  $f(t)$ , est appelé **transformée de Fourier** de la fonction  $f(t)$ . L'énorme avantage est que  $F(v)$  peut se déduire de  $f(t)$  par une expression comparable et qui donne les valeurs de  $C_k$  lorsque  $f(t)$  est périodique.

$$F(V) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\exp(-2i\pi vt) dt \quad \mathbf{3.11}$$

On remarquera la symétrie des deux expressions et on appellera la fonction  $f(t)$ , la transformée de Fourier inverse de  $F(v)$ . C'est entre autre grâce à cette propriété que les calculs de transformées de Fourier sont très utiles en traitement numérique d'un signal. Les appareils de mesures utilisés pour faire une analyse vibratoire utilisent ces propriétés pour déterminer les caractéristiques d'un signal mesuré. Ainsi, l'analyse FFT sert à observer des signaux qui ne sont pas périodiques. Il faut remarquer que cette extension de capacité du calcul FFT, qui n'est pas naturelle pour ce type de signal, appelle à la plus grande prudence dans l'interprétation des résultats. En conclusion, l'analyse FFT est utilisée pour la description du signal temporel dans le domaine fréquentiel avec une résolution fréquentielle constante sur une échelle linéaire de fréquence. La résolution peut être très fine pour chercher avec précision les composantes périodiques des signaux vibratoires ( **Chaib , 2009**).

**3.8.2. Les analyseurs de spectre :** Les analyseurs à FFT comportent un algorithme câblé de FFT qui ne peut fonctionner qu'avec un nombre de mots fixe (parfois variable en quelques pas). Ce nombre de mots est une puissance de 2 pour les algorithmes de Coley-Tukey et ceux qui en dérivent ou bien un produit de puissances entières de nombres premiers (algorithmes de Vinograd) . Les analyseurs de spectres à FFT nécessitent donc un sectionnement du signal numérisé en blocs de  $2^p$  mots (avec  $p$  entier compris entre 5 et 12 dans la plupart des cas) ou bien encore de 800 mots dans le cas de l'analyseur 1200 Enertec-Schlumberger qui utilise l'algorithme de Vinograd .De plus, les algorithmes de FFT réalisent la transformée de Fourier discrète qui entraîne un échantillonnage en fréquence de la transformée de Fourier, et donc de la densité spectrale, pas toujours conforme au théorème de Shannon .

Les signaux temporels analogiques (à temps continu) sont préalablement échantillonnés et numérisés. La fréquence d'échantillonnage  $F_e$  du signal temporel est supposée vérifier le théorème d'échantillonnage de Shannon, c'est-à-dire  $F_e \geq B$ ,  $B$  étant la limite supérieure de l'étendue spectrale du signal, c'est-à-dire que la partie du spectre du signal extérieure à l'intervalle de fréquence  $(- B, B)$  ne contient plus d'énergie significative.

Cette condition peut être considérée comme remplie par la quasi-totalité des analyseurs de spectre du commerce car ils comportent des filtres analogiques anti-repliement qui ont pour effet de limiter l'étendue spectrale du signal à la demi-fréquence d'échantillonnage. De plus, pour éviter tout risque de repliement du spectre, les derniers points du spectre ne sont pas donnés. Nous négligerons les erreurs dues à la quantification du signal temporel car tous ces appareils codent le signal avec un nombre important de digits binaires (bits).

Le signal échantillonné et numérisé est donc « découpé » en sections de  $N$  mots, on pondère éventuellement chaque section selon une loi choisie à l'avance ; on calcule la transformée de Fourier discrète (par FFT) de chaque section. On en prend, pour l'auto spectre, le module carré et on en fait la moyenne sur les  $n$  sections contenues dans le signal considéré (le nombre  $M$  total de mots composant le signal est alors  $M = n N$ ). Il est convenu d'appeler cette moyenne de spectres partiels, le spectre (ou densité spectrale du signal) (**Max et al, 1986**).

### 3.9. Grandeurs physiques caractérisant une vibration

Les grandeurs associées à l'amplitude d'une vibration d'un système mécanique simple qui est constitué d'une masselotte « $M$ » suspendue à un ressort sont (**Max et al, 1986**):

- Le déplacement est la variation de la position de masselotte d'une part et d'autre du point d'équilibre de la limite supérieure à la limite inférieure du mouvement.
- La vitesse sera nulle au point (haut et bas) du mouvement de la masselotte et sera maximale dans le point d'équilibre.
- L'accélération permet de passer la masselotte de la vitesse minimale vers la vitesse maximale.

On déduit que la vibration de système masse-ressort est caractérisée par trois grandeurs:

- le déplacement,
- la vitesse,
- l'accélération

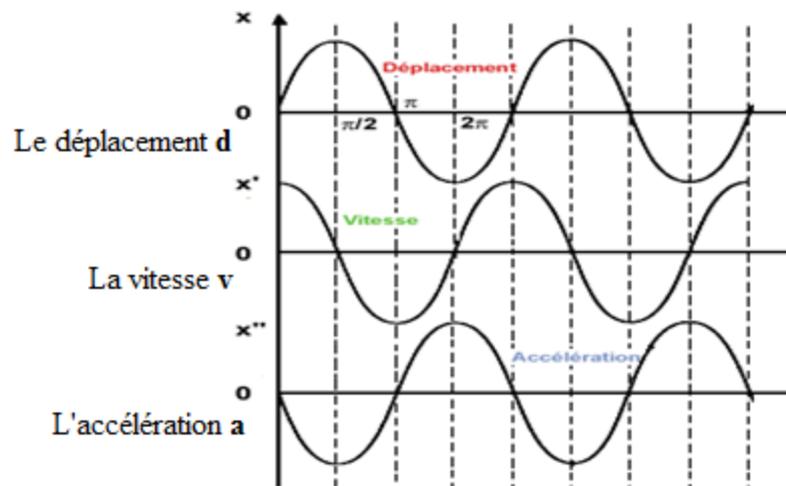


Figure 54 : Grandeurs associées à l'amplitude d'une vibration (Max et al, 1986).

La figure ci-dessus montre le décalage entre les maximums de chaque sinusoïde. Ce décalage est appelé une phase du signal.

- La représentation en accélération accentue les hautes fréquences ;
- La représentation en déplacement accentue les basses fréquences ;
- La représentation en vitesse n'accroît pas les basses et les hautes fréquences

(Grusenmeyer , 2005a).

Il existe des relations mathématiques entre les trois grandeurs de la vibration déplacement, vitesse et accélération, ces relations sont:

$$X = \frac{v}{2\pi f} = \frac{\gamma}{(2\pi f)^2} \quad 3.12$$

$$V = \frac{\gamma}{(2\pi f)} = 2\pi f \cdot X \quad 3.13$$

$$\gamma = (2\pi f)^2 \cdot X = 2\pi f \cdot V \quad 3.14$$

**3.9.1. Choix du mode d'investigation :** L'analyse des vibrations permet d'appréhender les différents efforts par tout défaut potentiel qui affecte la machine. Elle permet de rechercher toutes les informations utiles pour tirer un diagnostic correct sur son état mécanique et ainsi connaître la fonction usure de la machine. Une onde vibratoire peut-être étudiée par plusieurs

méthodes qui correspondent à des niveaux différents de connaissance du phénomène et à l'utilisation de matériels d'analyse plus ou moins sophistiqués à savoir :

- Indicateurs simples : niveau global, facteur de crête, facteur de défaut, kurtosis,...etc. ;
- Méthodes d'analyse qualitative : analyse temporelle, analyse fréquentielle, analyse d'enveloppe et analyse cepstrale (Chaib, 2009).

**3.9.1.1 Mesure du niveau global :** L'amplitude d'une vibration qui est le paramètre décrivant l'importance de la vibration peut être évaluée de différentes façons. Sur le graphe ci-après, sont indiquées les relations entre la valeur crête à crête, la valeur crête, les valeurs moyenne et efficace pour une vibration pure.

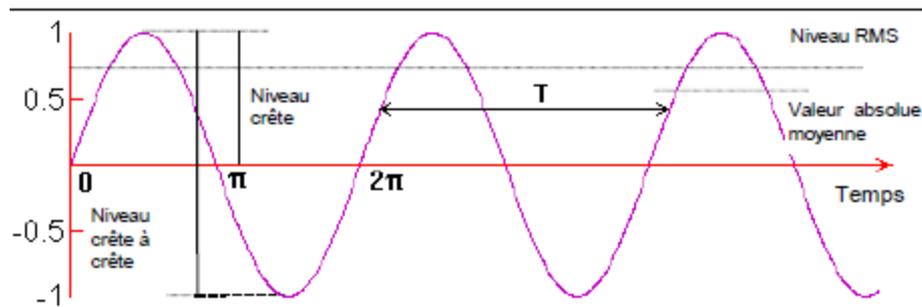


Figure 55 : Mesure du niveau global (Dumas Et Bennevault, 2001).

La valeur efficace se détermine par la formule suivante : 
$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2 dt} \quad 3.15$$

Elle correspond à une moyenne énergétique.

La valeur absolue moyenne se détermine par : 
$$V_m = \frac{1}{T} \int_0^T x dt \quad 3.16$$

La valeur moyenne correspond à la composante continue

Pour un signal sinusoïdal, les relations entre les différents paramètres sont les suivants

\* $V_{rms} = 0.707 V_c$

\* $V_{rms} = 1.11 V_m$

\* $V_{cc} = 2 V_c$

Avec  $V_c$  comme vibration crête et  $V_{cc}$  comme vibration crête à crête.

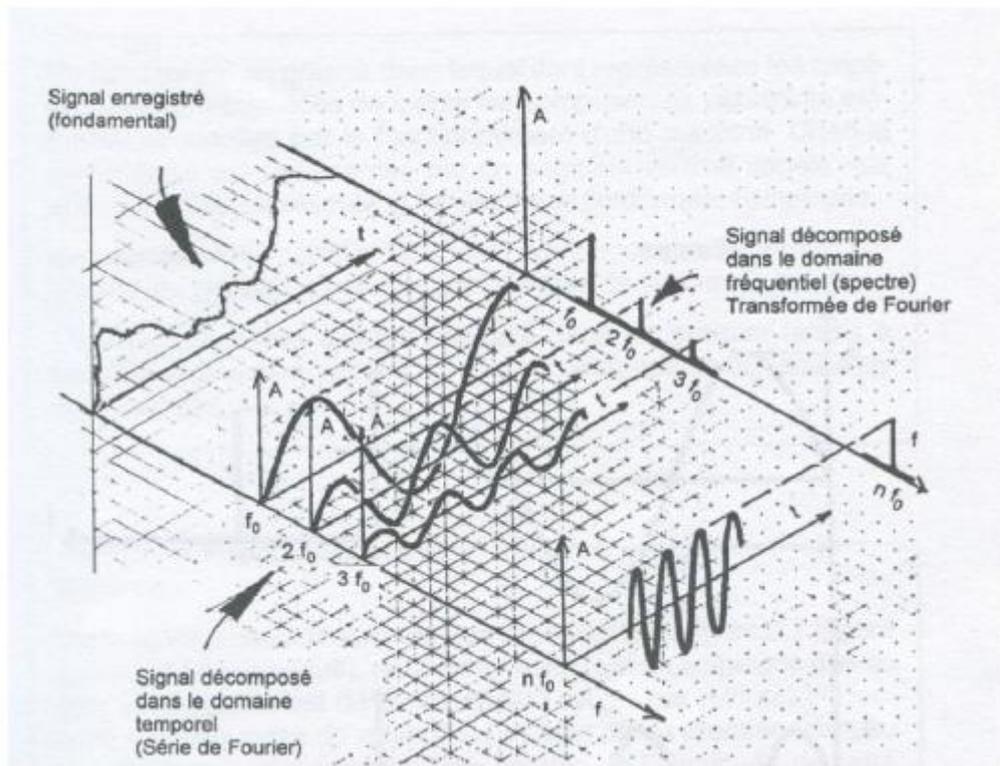
Il est évident que pour une vibration aléatoire ou harmonique ces relations ne sont plus aussi évidentes. Le rôle des détecteurs dans un système de mesure est alors important car il doit qualifier tout type de signal.

Le facteur de crête est défini par la relation :  $F_c = V_c/V_{rms}$

C'est un indicateur sans dimension. Il peut s'exprimer en dB. (AFNOR, 2002a).

**3.9.1.2. Analyse spectrale :** Toute anomalie affectant une machine tournante se traduit par des vibrations dont les fréquences correspondent aux fréquences d'apparition des forces les induisant et de leurs harmoniques. C'est pourquoi, pour le diagnostic, il est intéressant de décomposer le signal vibratoire mesuré en ses sinusoïdes élémentaires dont les amplitudes et les fréquences peuvent être lues.

L'analyse spectrale vise à identifier la fréquence et l'amplitude de ces sinusoïdes, et elle est effectuée par une transformée de Fourier du signal temporel. On obtient un spectre sous forme d'un graphique montrant l'amplitude à chaque fréquence appelée spectrogramme..



**Figure 56 : Obtention du spectre à partir du signal) temporel (Rakoto, 2010)**

Pour être efficace, cette méthode doit être appliquée en prenant soin, lors de l'acquisition et du traitement du signal temporel, de plusieurs facteurs :

- Numérisation à  $2k$  échantillons pour permettre le calcul en FFT,
- Estimation de la fréquence maximale d'analyse sur la base des conditions de fonctionnement et de la cinématique de l'installation,
- Echantillonnage à une fréquence respectant la condition de non repliement de spectre,
- Choix de la fenêtre de pondération conditionnant la lisibilité du spectre,
- Connaissance de la résolution permettant de dissocier des fréquences voisines. En cas d'insuffisance de cette finesse d'analyse, il est possible de l'améliorer par la technique de zoom.

Le spectre analysé peut être obtenu de plusieurs façons **De Almeida, (2002)** a proposé une méthode basée sur l'énergie résiduelle : utilisation de l'intégration de la différence entre la densité spectrale de puissance en condition normale et en condition avec défaut. Appliqués sur des paliers à roulement, les résultats se sont avérés meilleurs que ceux avec les indicateurs classiques. Toujours sur ce type de défaut, une méthode obtenue par la théorie de l'inférence inductive a été introduite par Mechefske (1995) (**Rakoto, 2010**). La détection des défauts est basée sur des bandes fréquentielles découpées dans le spectre et représentatives de différents états du roulement. Il est apparu que la technique convient aux faibles vitesses.

L'interprétation d'un spectre sera d'autant plus précise et pertinente que les conditions de fonctionnement et la cinématique de la machine sont connues, notamment :

- le type de moteur, le nombre de barres et d'encoques, le nombre de pales du ventilateur de refroidissement,
- le type de roulements,
- le type d'accouplement et le nombre de dents ou de doigts,
- le nombre de poulies, la longueur et le nombre de courroies,
- le nombre de dents des engrenages,
- le nombre de pales des ventilateurs, d'aubes de pompes ou d'augets de Turbine (**Rakoto,2010**).

**3.9.2. Choix du paramètre à surveiller :** Le fondement de la maintenance conditionnelle repose sur l'élaboration de diagnostics effectués à partir de l'analyse de l'évolution d'un certain nombre de paramètres. Ces paramètres sont appelés des indicateurs de défauts, ou indicateurs de surveillance ou descripteurs. Un indicateur est un quantificateur plus ou moins élaboré issu d'une grandeur dont l'acquisition est le plus souvent possible en fonctionnement. Il doit, par définition, caractériser un ou plusieurs aspects de l'état ou de la performance de l'équipement surveillé. Son évolution ou sa transformation dans le temps doit être significative de l'apparition ou de l'aggravation d'une dégradation ou d'un dysfonctionnement. Le choix de(s) paramètre(s)

mesuré(s) dépend de la complexité, de l'importance et de la valeur de la machine. Le paramètre sélectionné devra être :

- **Observable ou mesurable.** Toutes les mesures physiques habituelles sont potentiellement des paramètres utilisables ;

- **Significatif** de l'évolution du mode de défaillance à anticiper.

Remarquons que ces observations ou mesures sont faites aux frontières ou dans l'environnement du sous- ensemble dégradé ;

- **Interprétable.** L'importance est de savoir établir une corrélation entre la mesure et l'état interne (la pathologie) de la machine. Le plus important dans ce cas est d'être capable de se servir de l'observation non seulement pour connaître l'imminence d'une panne, mais pour diagnostiquer sa nature.

En effet, la connaissance de la nature des phénomènes pathologiques et de leur vitesse d'évolution permet de choisir la période entre deux observations. Le choix du type de suivi doit tenir compte :

- De l'accessibilité des capteurs pour des tests de comportements ;

- Des volumes disponibles et des chemins possibles pour les câbles des capteurs aux circuits de conditionnement et d'analyse ;

- De l'intérêt de redondances dans l'instrumentation ;

- De la fiabilité exigée ;

**3.9.3. Types d'indicateurs :** La présence de particules métalliques dans le lubrifiant ou la montée en température d'un palier sont souvent des signes de dégradation déjà avancée. Les informations délivrées par ces indicateurs sont tardives par rapport à celles fournies par certains indicateurs issus du mouvement vibratoire de l'arbre ou du palier. A titre d'exemple, dans le cas de paliers à film d'huile certains indicateurs vibratoires permettent d'identifier immédiatement toute amorce d'instabilité de palier ou de frottement au niveau des labyrinthes d'étanchéité, sources potentielles de graves dégradations. C'est pourquoi donc, en matière de surveillance, il y a donc lieu de distinguer deux classes d'indicateurs :

- Les indicateurs principaux ou précoces qui permettent d'identifier de manière précoce l'apparition d'anomalies, sources potentielles de pannes à plus ou moins long terme, et d'en suivre l'évolution. Ces indicateurs sont en relation directe avec les forces dynamiques internes et les fluctuations de couple dont la machine est le siège. La détection du défaut est alors théoriquement possible dès l'apparition de la force dynamique ou des fluctuations de couple qu'il induit ;

- Les indicateurs secondaires ou tardifs pour lesquels une évolution significative traduit déjà des dégradations conséquentes et nécessite un arrêt à brève échéance, voire immédiat, de l'installation. Ces indicateurs sont en relation directe avec les altérations induites par les défauts qui apparaissent bien après la modification des forces ou des couples dynamiques qu'ils engendrent. Cette première famille d'indicateurs est particulièrement bien adaptée aux concepts et impératifs de la maintenance préventive conditionnelle ou prévisionnelle. Les informations véhiculées par cette catégorie d'indicateurs permettent la détection de défauts à un stade précoce.

De ce fait, les informations tirées des signaux émis par une machine en fonctionnement permettent de réduire considérablement le nombre d'arrêts inopinés sur panne et de planifier les interventions nécessaires au mieux des intérêts de la production, notamment en les intégrant, dans la mesure du possible, dans les arrêts techniques de fabrication.

Cette planification se traduit par une réduction sensible des coûts de remise en état et de la durée d'immobilisation de l'équipement pour maintenance et permet d'optimiser la gestion des stocks de pièces de rechange. Ces propos ne doivent nullement discréditer l'utilisation des indicateurs tardifs. Tout au contraire, les informations fournies par l'association « indicateurs précoces, indicateurs tardifs » constituent des éléments clés dans la prise de décision d'un arrêt programmé urgent pour inspection ou engager une intervention corrective.

**3.9.4. La sensibilité :** Il ne faut pas confondre la précocité d'un indicateur à détecter un dysfonctionnement et sa sensibilité à le révéler. Le premier terme reflète l'aptitude d'un indicateur à détecter l'apparition d'un dysfonctionnement avant ou aux prémices d'altérations physiques induites par ce dernier. Par contre, le deuxième terme qualifie l'importance de l'évolution de la valeur d'un indicateur en présence d'un défaut révélé par rapport à sa valeur antérieure. Ainsi, à l'apparition d'un écaillage de denture, des indicateurs représentant le facteur de crête ou le kurtosis de l'accélération vibratoire seront beaucoup plus sensibles que des indicateurs représentant la valeur efficace de cette même grandeur.

**3.9.5. Les points de mesurage :** La plupart des vibrations de machines sont issues des parties tournantes ou oscillantes. Elles peuvent être d'origine mécanique, électromagnétique, hydraulique, etc. Elles sont transmises à la structure par l'intermédiaire des paliers, et aux fondations par l'intermédiaire des fixations. On conçoit aisément que les meilleurs points de mesurage dans le cadre de la maintenance conditionnelle des machines sont les paliers. La transmission de ces vibrations dépendra de plusieurs paramètres auxquels il faudra adapter le mode de mesurage. Cependant il faut remarquer que le mesurage sur les fixations présente en maintenance un intérêt moindre, mais trouve son application lorsque la machine perturbe son environnement.

### **3.10. Conclusion**

Plusieurs méthodes et outils peuvent être utilisées pour assurer une maintenance conditionnelle efficace ce qui n'est pas une tâche facile.

Nous citons l'analyse d'huile, la thermographie, mais l'analyse vibratoire reste la méthode de surveillance la plus répandue et la plus utilisée vue les avantages qu'elle présente en comparaison avec les autres méthodes. l'analyse vibratoire est un outil très efficace qui permet de détecter pratiquement tous les défauts susceptibles d'apparaître dans les machines tournantes à savoir les défauts de balourd, de désalignement, roulements défectueux.....ces derniers se manifestent par le changement du comportement vibratoire.

## CHAPITRE 4

### SURVEILLANCE ET DIAGNOSTIC DU VENTILATEUR R1S07 PAR ANALYSE VIBRATOIRE

#### 4.1. Introduction

La mise en place d'une politique de maintenance conditionnelle des machines tournantes par analyse vibratoire est maintenant largement répandue dans des usines du monde entier (**VasellinJ.Combet, 2015**).

Beaucoup de chercheurs se sont intéressés au domaine de la maintenance et les vibrations. Eugène propose une stratégie générale d'organisation et de gestion de la maintenance basée sur le retour d'expérience, qui consiste à représenter une structure qui intègre la dualité de l'étude sur l'aspect organisationnel et technico-économique, ce qui facilite aux responsables de prendre les bonnes décisions (**Eugène, 2004**).

L'approche proposée par B. Iung, E. Levrat (2007) emploie l'algorithme de "odds basée sur la théorie d'arrêt optimal, dont l'objectif est de choisir, parmi tous les arrêts de production déjà prévus, ceux qui seront optimaux pour développer des tâches d'entretien gardant les conditions prévus de produit (**Iung,et al ,2007**).

Dans sa thèse D.Claire Breneur (2002) a étudié le cas des défauts combinés d'engrenages et de roulements par des expériences appliquées sur un modèle de réducteur, il a été montré que le spectre et le cepstre de l'enveloppe des signaux d'accélération sont des indicateurs performants. Il a été montré par que l'analyse vibratoire présente beaucoup d'avantages comme étant une technique prédictive d'entretien. Un diagnostic du défaut de bague externe d'un roulement à bille est fait par quelques chercheurs (**Sadettin et al, 2006**).

La maintenance est définie dans la norme NF EN 13306 comme étant : « l'ensemble de toutes les actions techniques administratives et de gestion, durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise » (**Belhour,2008**).

Dans le langage industriel, la maintenance est liée au risque de défaillance d'un produit et consiste à palier à ce risque. Un matériel, aussi bien conçu qu'il soit, n'échappe pas, l'expérience le prouve, à certaines pannes en dehors de celles provoquées par un stockage, une mauvaise utilisation, un acte de sabotage ou un manque de précaution dans la manutention. Il serait illusoire de vouloir construire des équipements de qualité, satisfaisant le besoin des clients et utilisateurs, dans l'ignorance de ce que seront leurs pathologies en marche dans l'environnement

de fonctionnement ou de vouloir réaliser une intervention corrective, apporter un remède durable ou une amélioration technique à une défaillance non élucidée. La réparation définitive, opposée au dépannage provisoire, s'appuie sur le diagnostic de la défaillance : C'est une action sur la cause (**Chaib, 2009**).

Dans un procédé de fabrication, un rôle souvent stratégique est joué par Les machines tournantes, à l'image d'une presse dans une papeterie ou d'une turbine dans une centrale électrique, elles font partie de ces équipements que l'on ne peut pas se permettre d'immobiliser à tout moment. (**Zani, 2003**).

Il ne suffit pas de s'intéresser aux conséquences d'un défaut de fonctionnement mais aussi à sa cause qui peut être interne ou externe. Partant d'un constat d'un bruit anormal au niveau du ventilateur de tirage du broyeur cru de la cimenterie de Tébessa, signalant un dysfonctionnement imminent, nous avons fait appel à l'analyse vibratoire pour mettre en évidence le problème de l'équipement. Ce dernier a connu beaucoup d'avaries au niveau du réducteur les plus importantes sont : l'augmentation excessive du niveau global de la vitesse, dépassant le seuil de danger, ce qui a signalé l'existence d'un défaut de fixation, le desserrage des boulons, l'usure des roulements etc. Plusieurs défauts peuvent être rencontrés sur cet équipement pouvant véhiculer d'autres préjudices à l'ensemble de la chaîne technologique tels que balourd, défaut d'alignement, usure d'engrenages, jeu, fissures, problèmes de lubrification. Il faut que ce dernier est couramment posé dans les cimenteries à cause de la nature du produit fini.

Pour faire un bon diagnostic, un équipement de surveillance est mise en place. Le concept de la surveillance est basé sur le changement de la signature de la vibration. Dans ce contexte, deux formes de maintenance préventive sont distinguées, il s'agit de la maintenance conditionnelle et la maintenance prévisionnelle. Dès lors, surveiller une machine nécessite de choisir un certain nombre d'indicateurs, de les mesurer soit de manière continue (surveillance « on line ») soit de manière périodique (surveillance « off line ») et d'en suivre les évolutions dans le temps. Toute évolution significative de la valeur d'un indicateur doit conduire immédiatement à l'application d'une procédure adaptée (validation de l'évolution, identification de l'anomalie et de sa gravité, programmation d'actions correctives, arrêt d'urgence, exploitation en mode dégradé, etc.) (**Boulenger, Pachaud, 2003**).

Généralement, pour la surveillance des vibrations, on utilise des capteurs de vibration tels que des accéléromètres. Les paramètres mesurés sont le déplacement, la vitesse et l'accélération (**Bertrand R, 2000**).

L'efficacité de la maintenance des systèmes industriels est un enjeu économique majeur pour leur exploitation commerciale. Les principales difficultés et sources d'inefficacité résident dans le choix des actions de maintenance à entreprendre. Ainsi pour éviter des arrêts de production imprévus et des retombées économiques considérables qui en découlent, il faut surveiller en permanence ces équipements et "traquer" tous les signes précurseurs de défauts avant qu'il ne soit trop tard. Désormais, les opérations de maintenance peuvent s'avérer lourdes de conséquences pour plusieurs raisons. Tout d'abord, ces interventions peuvent nuire à la fiabilité. Elles nécessitent souvent un arrêt de fonctionnement du système. Dans ce cas, durant toute la phase de maintenance, le système n'est pas opérationnel. Plus la phase de maintenance est longue, plus elle est coûteuse dû à l'indisponibilité du système. Par conséquent la phase de maintenance doit idéalement être réduite aux opérations consistant à remplacer, sans tâtonnement, les équipements réellement en panne (**Ribot, 2009**). C'est le cas de l'industrie du ciment qui dispose de machines et d'installations complexes ou l'attente de la casse n'est plus économique et les interventions systématiques sont souvent inutiles, coûteuses en pièces de rechange, main d'œuvre et perte de production (**Chaib et Benretem, 2007**) (**Chaib et al, 2010**), délicats parce que les exigences de haute sécurité, la réduction des coûts d'exploitation et la maîtrise de la disponibilité de ces équipements s'imposent (**Taleb et al, 2012**).

La tendance actuelle est de rechercher des outils capables de révéler de manière précoce l'apparition de dysfonctionnements dans le but de remplacer progressivement la maintenance systématique par une maintenance conditionnelle moins coûteuse.

Parmi les méthodes les plus efficaces de diagnostic, l'analyse vibratoire reste la plus importante en raison des performances croissantes du traitement du signal. Elle comporte trois étapes : La première est l'acquisition de signaux délivrés par des accéléromètres piézo-électriques ou des microphones judicieusement placés. La seconde utilise les procédures de traitement du signal pour fournir des informations condensées mais pertinentes. A partir de ces informations, la troisième utilise l'analyse des données et l'intelligence artificielle pour déceler d'éventuelles anomalies et prendre les bonnes décisions.

L'analyse des vibrations se fonde sur l'idée que les machines fonctionnent jusqu'à ce que les mesures de paramètres appropriés indiquent que la condition de la machine s'est suffisamment détériorée pour nécessiter une inspection approfondie.

Suivant la tendance des paramètres mesurés, il est possible d'estimer le moment où se produira une défaillance, de prévoir et d'effectuer les préparations justes avant ce moment.

Dans ce chapitre nous présentons le diagnostic du ventilateur de tirage R1S07 de la zone cru de la cimenterie d'Elmalabiod.

On fait appel à l'outil d'approche le plus utilisé dans la maintenance conditionnelle (**Denoeux, 2001**), l'analyse vibratoire, durant les procédures de surveillance et de diagnostic. L'approche conditionnelle qui se base sur l'inspection avant une décision de réparation, peut être abordée en deux étapes : la surveillance et le diagnostic, figure 57. La surveillance est basée sur un suivi périodique d'indicateurs de dégradations qui en cas de dépassement de seuils, informent sur la présence d'un défaut, niveau global, qu'il faudra détecter avec plus de précisions par l'analyse spectrale.

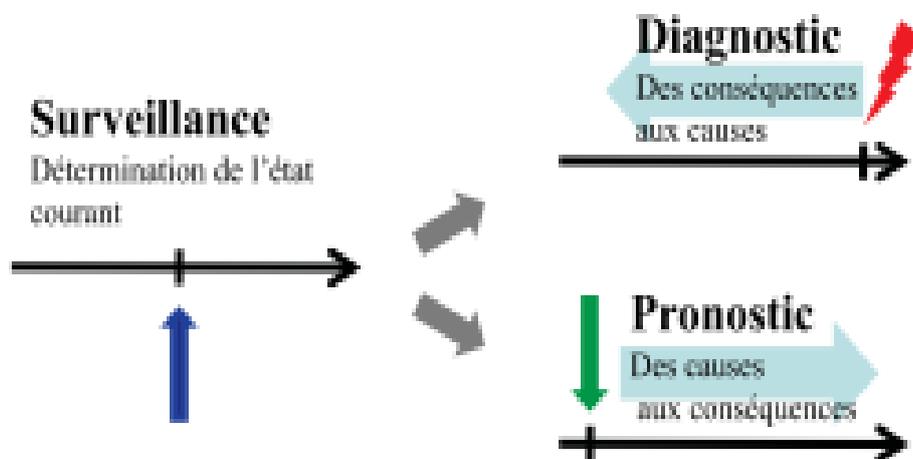


Figure 57: Principe d'un diagnostic (Peysson )

La mise en œuvre du suivi par analyse vibratoire d'une machine de production, permet et facilite la détection ainsi le diagnostic des dysfonctionnements des machines vitales complexes, telles que les moteurs, réducteurs et ventilateurs dans la chaîne de production d'une cimenterie, (figure 58).

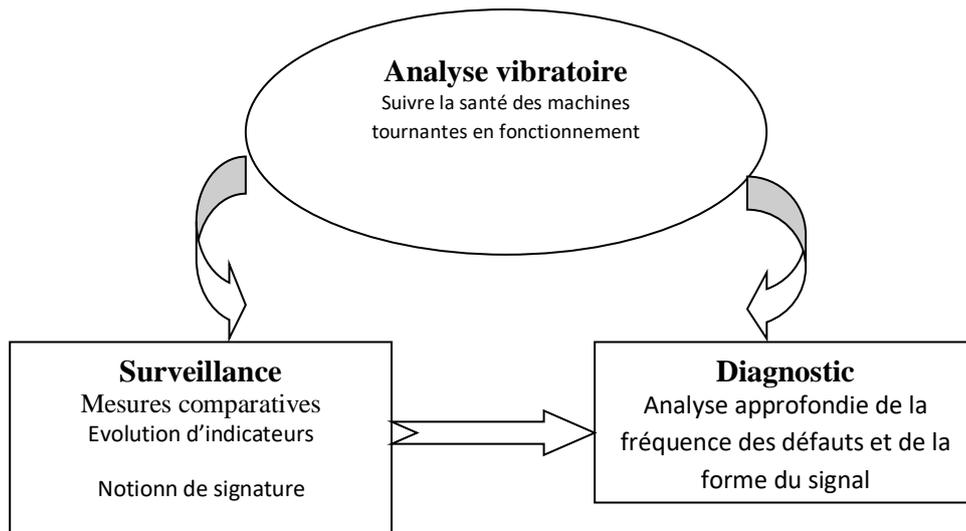


Figure 58 : Les activités de l'analyse vibratoire ( Augeix , 2002)

#### 4.2. Application de l'analyse vibratoire à un ventilateur zone cru (cas de la Cimenterie d'Elmalabiod)

Dans cette étude on s'intéresse au ventilateur tirage de la zone cru de la chaîne de fabrication de ciments d'Elma Labiod situé à 35 km de la ville de Tébessa implantée à l'Est de l'Algérie (figure59).

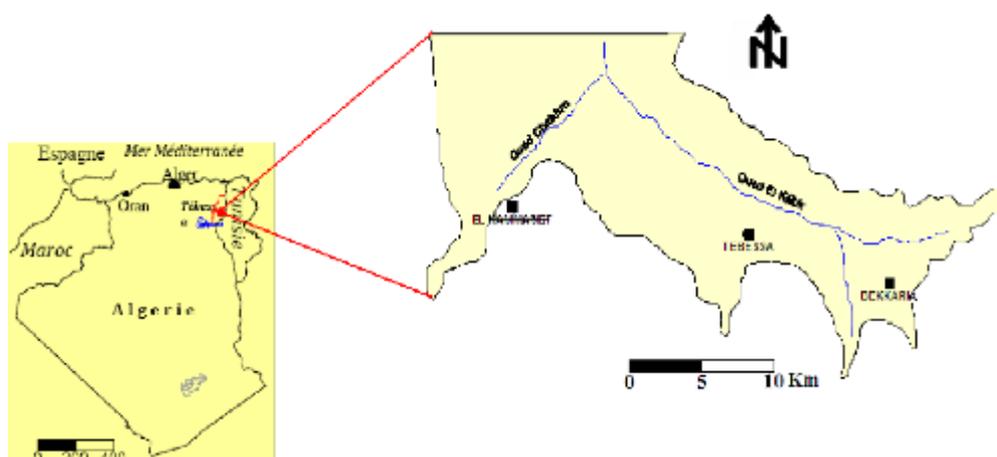
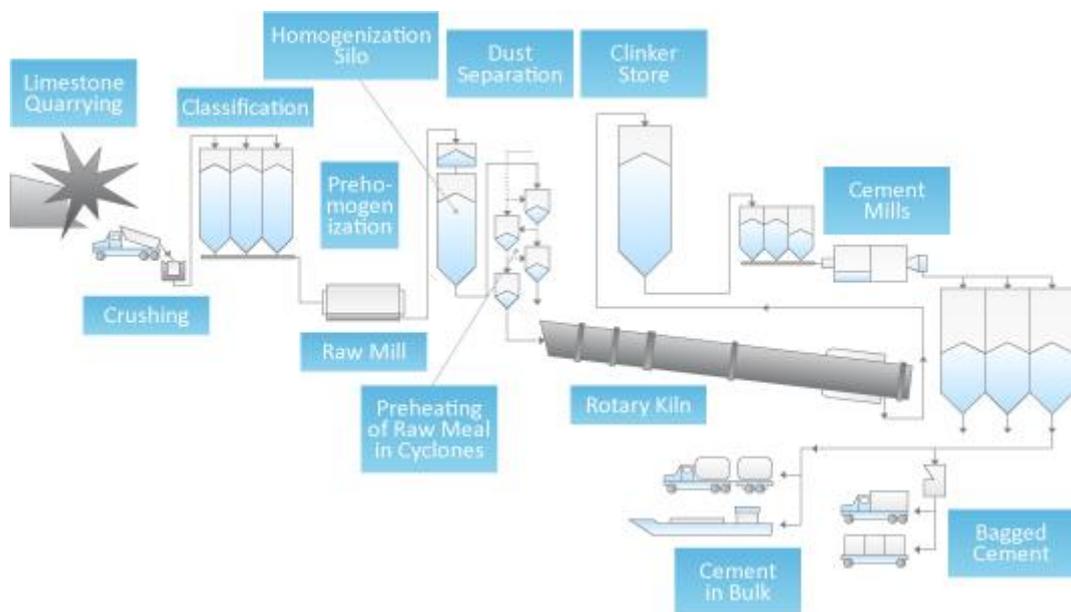


Figure 59 : Situation géographique de la cimenterie d'Elmalabiod de Tébessa

Suite à un bruit anormal signalé par les employés, et dans le but d'anticiper les dégradations qui peuvent affecter un mécanisme, détecter les défauts à un stade plus ou moins précoce, éviter des arrêts de production très coûteux en raison de défaillances imprévues, un diagnostic a été effectué en faisant appel à l'analyse vibratoire (analyse spectrale, mesures des niveaux vibratoires globaux en vitesse et en accélération et analyse d'enveloppe). L'application de cette démarche nous a permis après analyse d'en déduire l'origine et d'estimer les risques de défaillance. Une attention particulière est accordée au réducteur du ventilateur, qui représente l'un des maillons constituant la ligne de production du ciment, depuis l'extraction du calcaire jusqu'à l'expédition du ciment (figure 60).



**Figure 60 : Processus de fabrication du ciment**

Comme il a été signalé précédemment, Ce travail consiste à la surveillance d'un équipement commande ventilateur R1S07 de la zone cru de la cimenterie de Elmalabiod (figure 61), composé essentiellement d'un moteur, d'un réducteur et d'un ventilateur.



**Figure 61 : Equipements de commande du ventilateur**

La surveillance des machines ne se limite pas juste à détecter la présence d'un défaut, mais il est aussi nécessaire de pouvoir réaliser un diagnostic approfondi pour le localiser précisément et quantifier sa sévérité. L'analyse vibratoire est une technique qui permet de réaliser ce diagnostic (Chevalier, 2001). Pour plus de précision, le diagnostic par analyse vibratoire nécessite d'étudier les valeurs du niveau global des vibrations, les contenus fréquentiels des signaux à l'aide d'outils sophistiqués du traitement de signal (spectre, cepstre, analyse d'enveloppe etc.) (Djebili O, 2013).

#### **4.2.1 Suivi vibratoire du ventilateur R1S07**

Le ventilateur étant composé du moteur électrique, du réducteur, de la turbine et des paliers constituant une chaîne rigide. Un défaut sur un de ces composants peut influencer négativement sur le comportement global de l'équipement.

Les statistiques concernant les causes de défaillances, et la localisation des défauts dans les transmissions de puissance à engrenages permettent de conclure que les organes les plus sensibles sont les engrenages et les roulements (tableau 3)

**Tableau 4 : Localisation des défauts dans les transmissions de puissance à engrenages (Breneur,2002)**

| Localisation des défauts | %  |
|--------------------------|----|
| Roulements Paliers       | 60 |
| Dentures                 | 19 |
| Arbres                   | 10 |
| Carters                  | 7  |
| autres                   | 4  |

Le diagnostic portera donc sur toute la chaîne synoptique du ventilateur (figure 48), en particulier les paliers, car ces derniers constituent le chemin de passage privilégié pour les vibrations. Donc le diagnostic se fera selon les étapes effectuées suivantes :

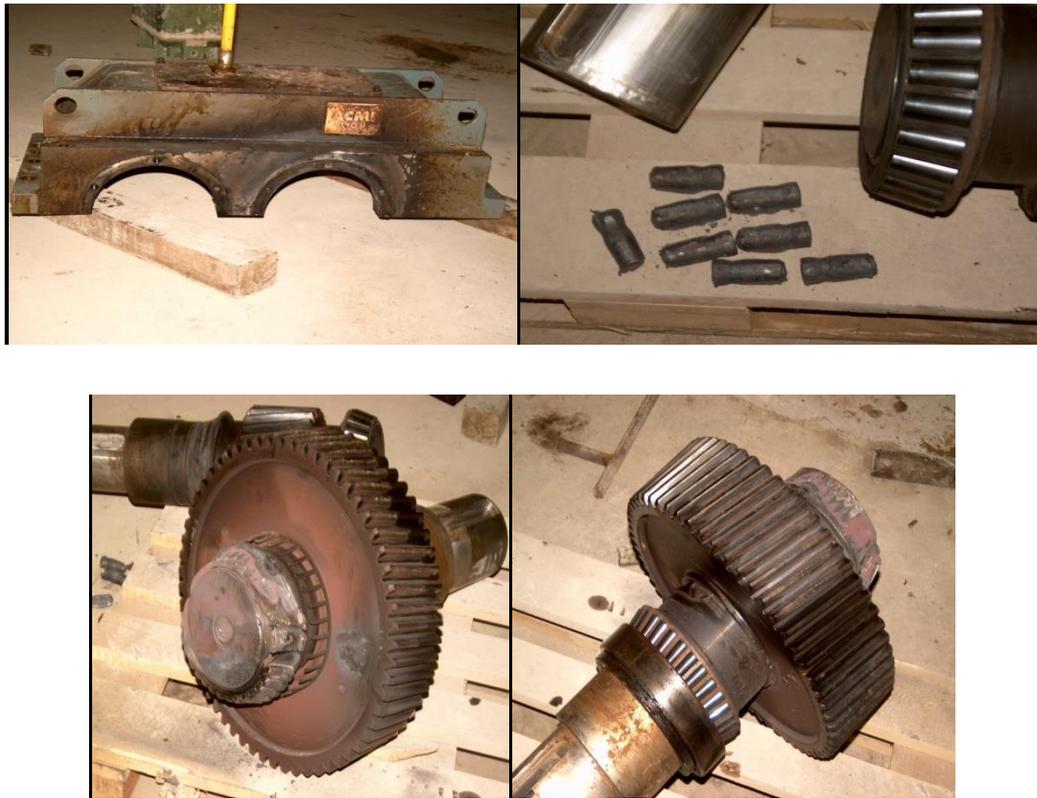
- Collecte des informations techniques sur l'équipement
- Calcul de la cinématique
- Choix des paramètres
- Configuration des points de mesure.
- Collecte des mesures
- Analyse et interprétation des données

#### **4.3 . Méthode de détection des défauts des réducteurs (palier, roulement, dent)**

Parmi les différents phénomènes physiques utilisés pour mettre en évidence des défauts de fonctionnement ou de dégradation d'une machine tournante et donnant une meilleure mesure de son état, est la vibration. Les vibrations fournissent des paramètres fondamentaux permettant la détection précoce des causes de défaillance et ainsi définir l'organe défectueux sans démontage de la machine. Par conséquent, la correction éventuelle et la programmation des opérations de maintenance seront limitées aux seuls maillons et organes défaillants. Toutes les machines vibrent et au fur et à mesure que l'état de la machine se détériore (balourd, usure de roulements, usure d'engrenages, défaut d'alignement, défaut de graissage, desserrage, jeu, fissures, etc.), la signature vibratoire change. (**Chaib, 2009**)

Avant d'entamer l'analyse vibratoire que nous avons réalisé en 2012/2013 ,nous donnons un aperçu sur les événements qui ont eu lieu durant les années 2006 et 2007 à compter de l'incident qui a eu lieu en date du 13/07/2006 qui se résume en l'obturation du tube d'entrée d'huile du réducteur ACMI BCSEA qui a provoqué la brulure totale des roulements et des pignons, la dégradation du socle en béton (pattes de fixation), et la casse de l'arbre (figures 62et 63).

Le réducteur ACMI BCSEA a été installé à la place du réducteur TACKOLADE qui présentait une fuite permanente d'huile et un excès de température.



**Figure 62 : Photos après l'incident du réducteur**



**Figure 63 : Photo casse arbre du réducteur TACKOLADE**

L'objectif de l'étude réalisée en cette période était de montrer les effets et les résultats de l'analyse vibratoire après chaque événement et dans des situations et conditions de fonctionnements différentes depuis l'incident cité précédemment.

Ils ont déterminé les changements dans le comportement vibratoire de la ligne de commande du ventilateur après chaque intervention, tout en identifiant les causes probables des détériorations, ainsi que l'évaluation du degré de sévérité vibratoire et des détériorations en suivant l'état vibratoire de l'équipement.

### 4.3.1 .Comportement vibratoire après l'incident

Après le remplacement du réducteur TACKE OLALDE par le réducteur ACMI BCSEA, deux mesures vibratoires ont été effectuées et ont fait ressortir les résultats suivants :

**Tableau 5 : Mesures vibratoires sur le moteur**

|               | Mesure du 31/07/06 |      |      | Mesure du 31/07/06 |     |     |
|---------------|--------------------|------|------|--------------------|-----|-----|
|               | 2AX                | 2RH  | 2RV  | 2AX                | 2RH | 2RV |
| Palier        |                    |      |      |                    |     |     |
| NG Vit (mm/s) | 0,4                | 0,71 | 0,5  | 0,7                | 0,4 | 0,4 |
| NG Accel (g)  | 1,09               | 1,13 | 0,85 | 0,87               | 2,8 | 1,8 |
| DEF           | 3,3                | 2,9  | 2,7  | 3,5                | 2,6 | 2,8 |

**Constat :** - Le comportement vibratoire global est acceptable ;

- Balourd moteur d'amplitude acceptable ;
- Lignage correct entre le moteur et le réducteur ;
- Facteur défaut roulement acceptable.

Après la réparation du béton et le remplacement du réducteur, on a constaté un changement dans le comportement vibratoire du réducteur qui se traduit par une nette évolution des niveaux globaux et des amplitudes de la fréquence d'engrènement et ses harmoniques.

### 4.3.2. Première Analyse

- ✓ **Analyse en niveau global :** Les niveaux vibratoires globaux relevés en accélération sur réducteur sont élevés surtout à l'entrée 3RH et 3RV, la Température relevée sur cet élément est très élevée (72.62 °C), ce qui s'explique par la mauvaise performance du circuit de refroidissement.

**Tableau : 6 Niveaux vibratoires relevés en accélération**

|                              | Mesure du 02/10/2006 |      |      | Mesure du 05/11/2006 |      |      |
|------------------------------|----------------------|------|------|----------------------|------|------|
|                              | 3AX                  | 3RH  | 3RV  | 3AX                  | 3RH  | 3RV  |
| <b>palier</b>                |                      |      |      |                      |      |      |
| <b>NGAccélération [G]</b>    | 4,07                 | 7,4  | 7,7  | 5,1                  | 6,5  | 8,3  |
| <b>NG Vitesse [mms]</b>      | 6,5                  | 5,7  | 6,7  | 8,8                  | 5,7  | 7,3  |
| <b>DEF</b>                   | 6,5                  | 6,4  | 6,6  | 8,1                  | 7,9  | 10,5 |
| <b>Fréquence engrenement</b> | 0,32                 | 0,32 | 0,57 | 0,6                  | 0,54 | 0,49 |
| <b>2° Harmonique</b>         | 0,69                 | 0,76 | 1,75 | 2,8                  | 0,29 | 1,22 |
| <b>3° Harmonique</b>         | 0,67                 | 3,97 | 4,5  | 1,8                  | 2,02 | 4,46 |

#### 4.3.2.1. Deuxième Analyse :

- ✓ **Analyse de l'amplitude de la fréquence d'engrènement et ses harmoniques :** Cette analyse a fait ressortir le constat suivant : Les amplitudes de la **2<sup>ème</sup>** et **3<sup>ème</sup>** **harmonique** de la fréquence d'engrènement restent prépondérantes (**1.22 g** et **4.46 g**) par rapport à celle de la fréquence d'engrènement **0.49 g** ce qui met en évidence le mauvais engrènement du couple pignon – roue dentée, et donc un mauvais engagement et désengagement de la denture.

Depuis les problèmes ne s'arrêtaient pas d'apparaître sur ce réducteur, telle que la déformation de l'arbre porte pignon mis en évidence par la troisième analyse spectrale (analyse des bandes latérales).

#### 4.4. Application à l'Etude du Ventilateur RS107

Suite à un bruit constaté et signalé par les ouvriers travaillant sur la chaîne de production du ciment, un système de surveillance a été adopté par le service de maintenance. Les points de mesure ont été configurés avec une attention particulière. Comme le fonctionnement de la machine est lié à chaque instant à son endommagement, un intérêt tout particulier est porté aux paliers, car ces derniers constituent le chemin de passage privilégié pour les vibrations. Nous avons configuré huit points de mesures pour évaluer le comportement des équipements.

**4.4.1 Matériel et méthodes :** Le matériel d'analyse vibratoire utilisé dans le cadre de ce diagnostic est constitué principalement de :

- **Un collecteur analyseur :** Portable appelé « movilog2 » (figure 67) qui présente une synthèse très avancée des recherches, notamment en informatique et en électronique de pointe.

Ce type de matériel a une grande performance grâce à sa liaison à un ordinateur équipé d'un logiciel appelé « Diva » spécialement conçu pour une gestion informatisée basée sur le traitement des signaux émis par les différents types des vibrations engendrées par les différents organes d'une entité. Très utilisé pour la maintenance conditionnelle des équipements, en particulier les machines tournantes. On les installe sur les machines pour nous assurer une surveillance permanente en comparant l'intensité vibratoire de la machine, mesurée à des seuils indépendants pré-réglés.

#### - Accéléromètre ASH 201

Ce sont des capteurs utilisés pour assurer Les relevés vibratoires des différents points de mesure.

- **Logiciel d'analyse vibratoire DIVA** comme nous l'avons déjà signalé précédemment, ce logiciel est conçu spécialement pour la maintenance conditionnelle et prédictive, pour le traitement des signaux émis par les différents types de vibrations (figure 64).

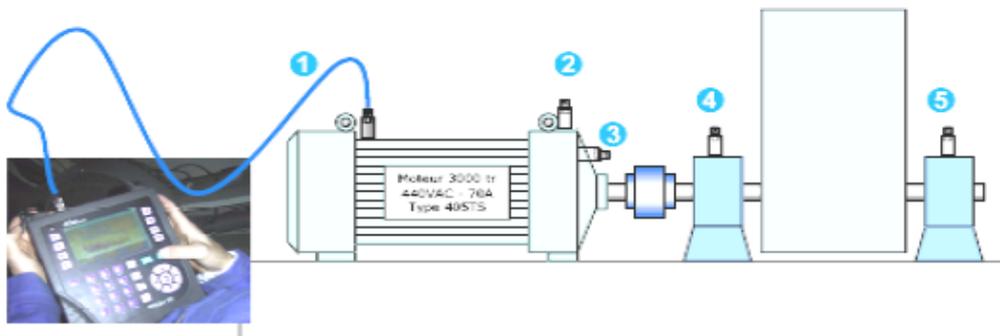


Figure 64 : Surveillance continue (Belhour, 2008)

Le ventilateur comprend essentiellement :

- Un moteur d'entraînement Siemens Espagne
- Un accouplement flexible.
- Un réducteur de marque ACMI
- Une turbine à aubes montées sur un arbre avec 2 paliers SKF, munis de roulements à rouleaux coniques.

Les caractéristiques techniques principales sont reprises sur les fiches techniques du fond documentaire de l'entreprise (Cimenterie d'Elmalabiod). Notons que les données techniques principales, sont nécessaires pour la classification de l'équipement, et la détermination des seuils d'alarme, pour l'établissement de la signature vibratoire du ventilateur.

Après une ronde de visite, nous avons constaté que le problème réside dans les paliers du réducteur du ventilateur cru de la chaîne de production du ciment de la cimenterie d'Elmalabiod de Tébessa. Par manque de compétence et de matériel de surveillance, le service maintenance en collaboration avec une société de maintenance spécialisée ont jugé utile l'adoption de la surveillance de l'équipement.

**4.4.2. Configuration des points de mesure :** Une attention particulière doit être portée sur le choix des points de mesure. En effet, on cherche à évaluer un comportement interne à la machine. De ce fait, le capteur devra être le plus sensible et en relation directe avec 'l'intérieur' afin de récupérer le maximum d'informations. Or, les points de mesures idéaux sont situés au plus près des organes à surveiller. C'est pourquoi un intérêt tout particulier est porté aux paliers, car, ils constituent le chemin de passage privilégié pour les vibrations (**Digitip, 2003**). Ils représentent en effet, un point clé, car ils sont le seul lien matériel permettant la transmission des vibrations, images des efforts dynamiques, de la machine tournante.

La complexité de constitution de certaines machines et l'accessibilité de certains endroits rendent difficiles, des fois mêmes impossibles les prises de mesures précises des pièces à surveiller. Pour éviter ces contraintes et pour mieux cerner le problème constaté et identifier l'organe défectueux du réducteur, voire l'action de maintenance appropriée, en plus des paliers, d'autres points ont été sélectionnés à des endroits susceptibles de donner le maximum d'information sur le comportement vibratoire du réducteur. Au total, nous avons configuré huit points de mesure pour évaluer le comportement du réducteur, (figure 65).

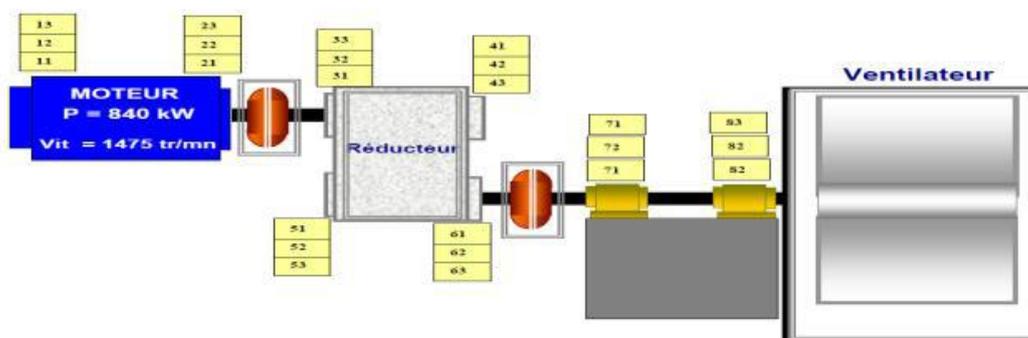


Figure 65 : Schéma synoptique du ventilateur R1S07

### 4.4.3. Discussion des résultats

#### 4.4.3.1. Points de mesure sur moteur

Suite aux mesures relevées sur le moteur en utilisant l'analyse en niveau global, on constate que les niveaux globaux relevés en accélération, en vitesse ainsi que le facteur défaut de roulement sont acceptables (figure 66)

En conclusion le comportement vibratoire global du moteur est stable à un seuil acceptable, cependant nous passons à l'analyse spectrale, (figure 67), pour avoir plus d'information sur l'état de santé du moteur et déterminer la source de bruit.

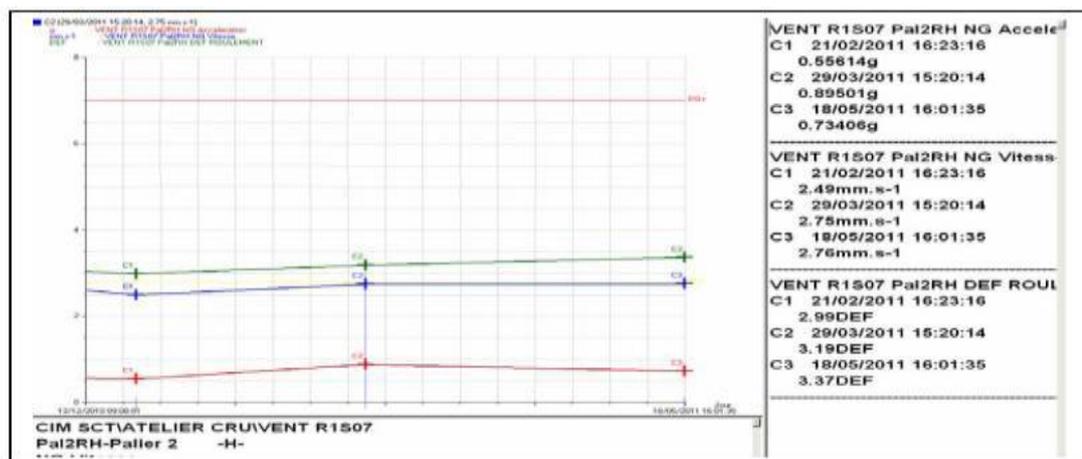


Figure 66 : Courbe de tendance du NG accélération, vitesse et DEF moteur.

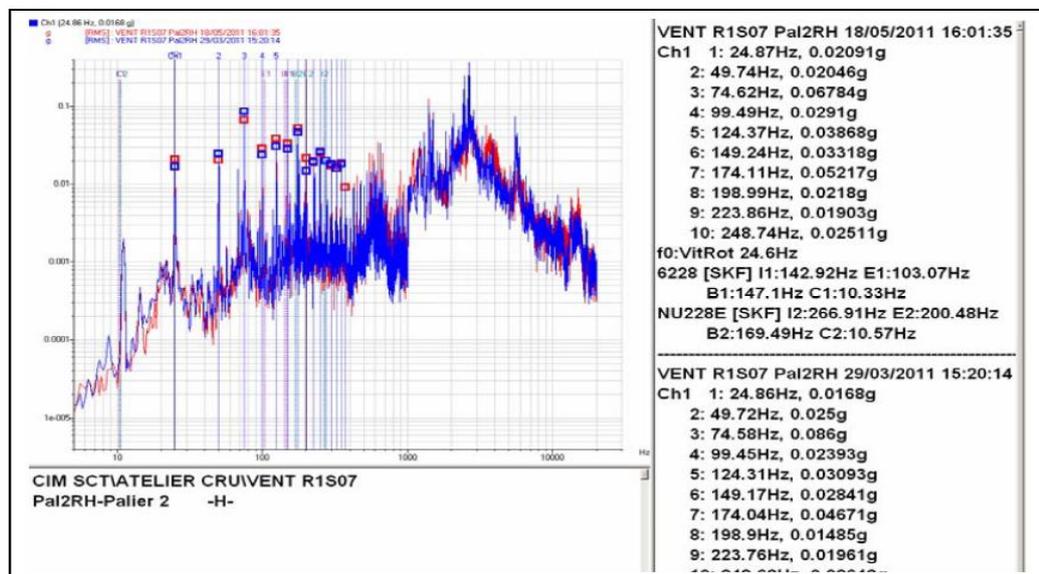


Figure 67 : Analyse spectrale du moteur

L'analyse spectrale nous a permis de constater que les amplitudes sont stables à la fréquence de rotation du moteur 0.02g à 24.87Hz. Cette méthode donne la possibilité d'identifier le défaut, qui s'explique par la Prépondérance de la 3<sup>ème</sup> harmonique de la fréquence de rotation

du moteur dont le seuil reste tolérable .Cette dernière a permis aussi de détecter un Choc à la fréquence de rotation du moteur.

Nous passons à l'analyse du deuxième composant du système de commande, qui est le réducteur ou nous avons configuré quatre points de mesures. Les mesures relevées à l'entrée et à la sortie du réducteur en analyse globale sont respectivement représentées dans les figures 68et 69.

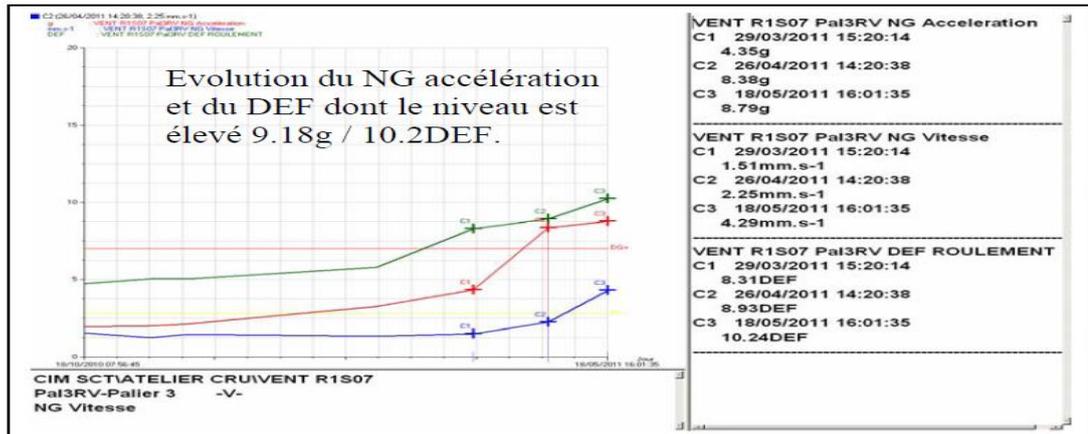


Figure 68: Courbe de tendance du NG accélération, vitesse et DEF réducteur

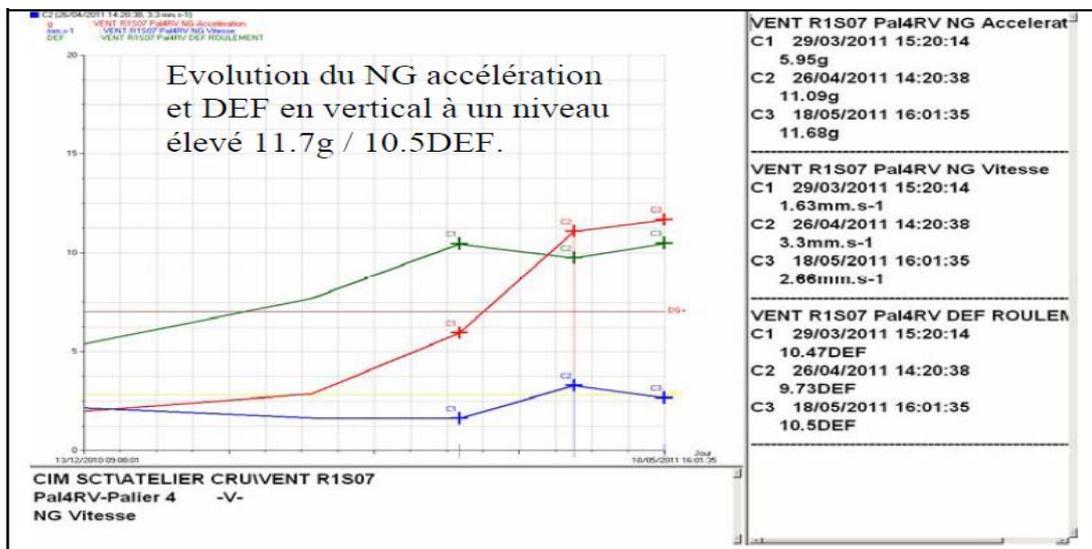


Figure 69 : Courbe de tendance du NG accélération, vitesse et DEF réducteur.

Dans ces points de mesure, Le suivi dans le temps de l'évolution du niveau vibratoire nous donne des informations significatives. On constate l'évolution de la vitesse et de l'accélération de l'arbre NG. Cette analyse relève aussi une augmentation facteur du défaut de roulement. le niveau global NG en accélération et du DEF atteint la valeur 9,18g /10 DEF.et une

évolution du NG accélération et DEF en vertical à un niveau élevé 11.7g / 10.5DEF ce qui donne une idée sur le changement de fonctionnement de l'équipement. Donc une dégradation de l'équipement est inévitable. Le seuil est dépassé ce qui signifie qu'une détérioration s'est produite.

Pour avoir plus de précision sur ce comportement nous passons à l'analyse spectrale, figures 70 et 71.

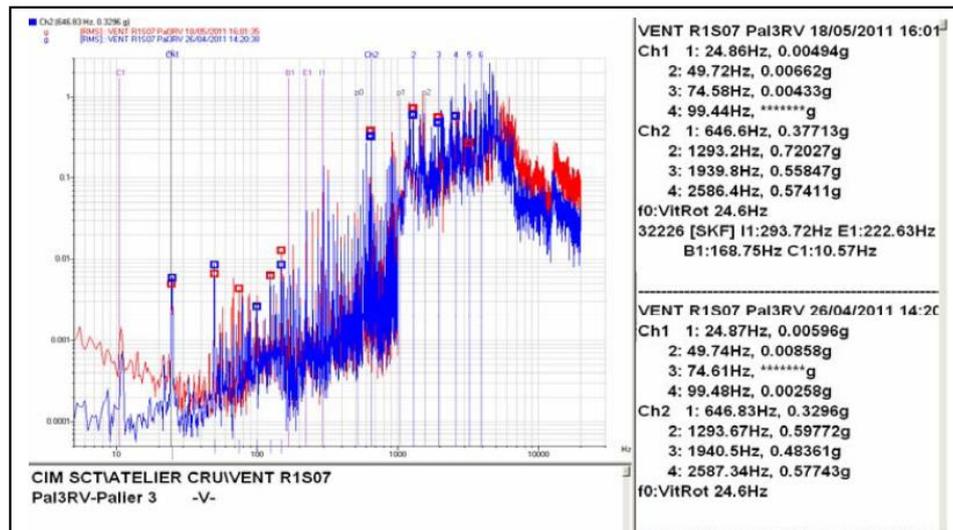


Figure 70: Analyse spectrale (Représentation des harmoniques) sur réducteur

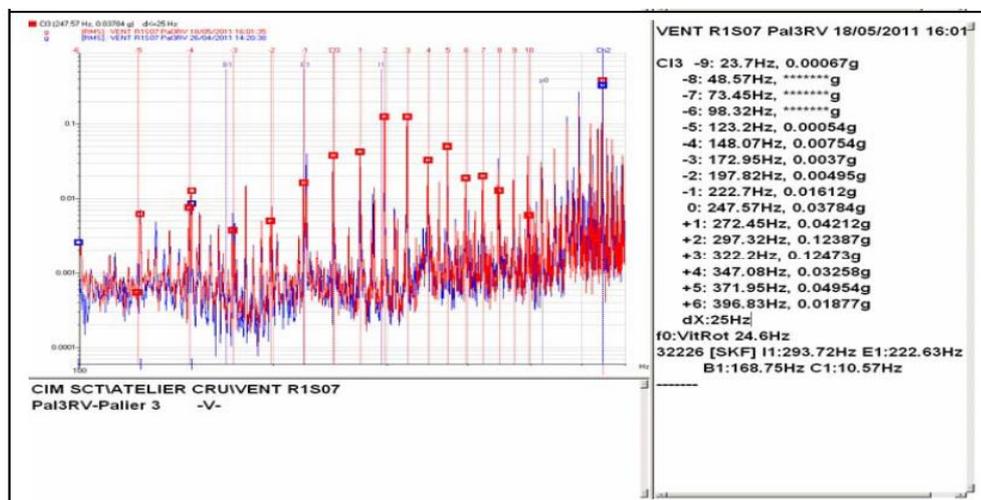


Figure 71: Spectre zoom.

L'analyse spectrale met en évidence une évolution de l'amplitude de la deuxième harmonique de la fréquence d'engrènement à l'entrée du réducteur de 0.57g à 0.63g.

les bandes latérales montrent une modulation autour de la fréquence d'engrènement espacées par la fréquence de rotation de l'arbre de sortie PV 10.93Hz. Avec l'apparition d'un Peigne de raie à la fréquence 296.88Hz qui correspond à la fréquence de défaut bague interne du roulement palier 4 de l'arbre.

Pour avoir plus de précision sur l'état de santé du roulement, nous faisons recours à l'analyse d'enveloppe (Détection de défaut de roulement), figure 72

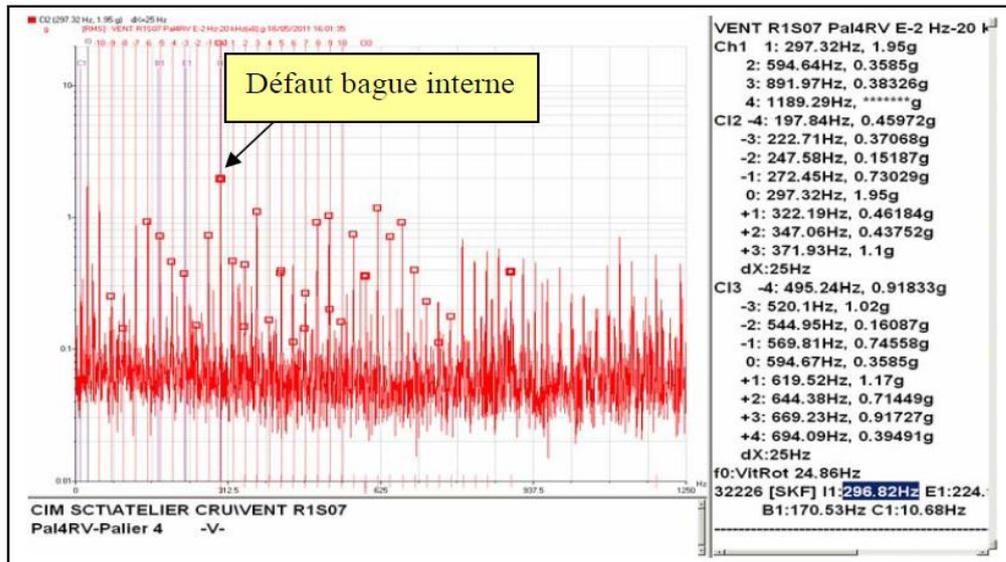


Figure 72: Analyse d'enveloppe

Le spectre d'enveloppe fait apparaître défaut de bague interne de 1.95g (seuil danger) avec présence de bandes latérales à la fréquence de rotation de l'arbre GV qui nécessite un changement de roulement dans les meilleurs délais.

les bandes latérales montrent une modulation autour de la fréquence d'engrènement espacées par la fréquence de rotation de l'arbre de sortie 10.93Hz.

Avec l'apparition d'un Peigne de raie à la fréquence 296.88Hz qui correspond à la fréquence de défaut bague interne du roulement palier 4 de l'arbre.

Pour bien identifier la nature précise du défaut détecté, de sa gravité, nous passons à l'analyse en niveau global des paliers ou le problème paraît plus intéressant et nécessite un intérêt minutieux. Les paliers représentent en effet, un point clé, car ils permettant la transmission des vibrations, images des efforts dynamiques, de la machine tournante comme nous l'avons signalé précédemment.

#### 4.4.3.2. Les paliers du ventilateur

Les mesures effectuées en 2012 sur ces éléments sont représentées sur les figures 73 et 74

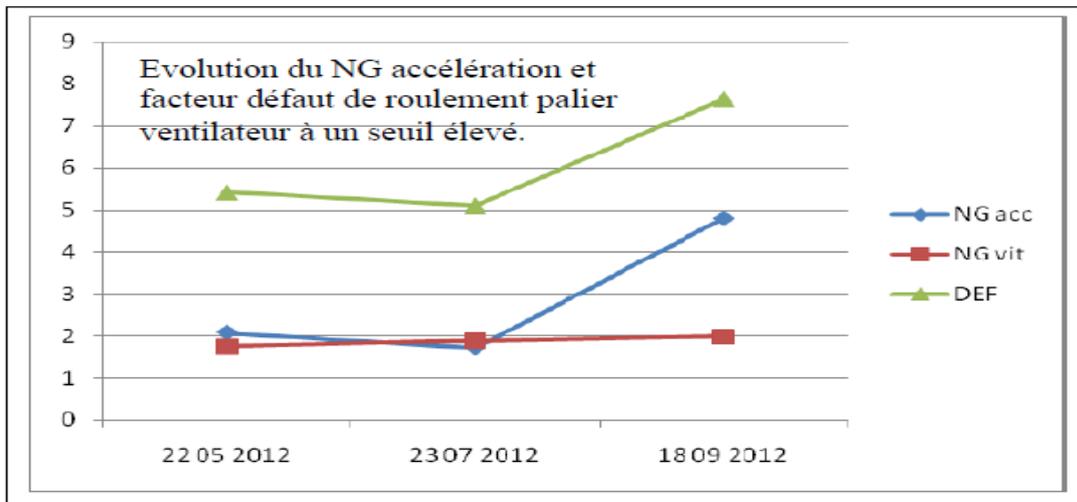


Figure 73. Courbe de tendance des niveaux globaux au point 8RH (1ère mesure)

La première mesure a fait apparaître une élévation des niveaux globaux relevés en accélération sur les paliers. Cependant, les niveaux vibratoires globaux relevés en vitesse sont acceptables, et le facteur défaut de roulement tolérable.

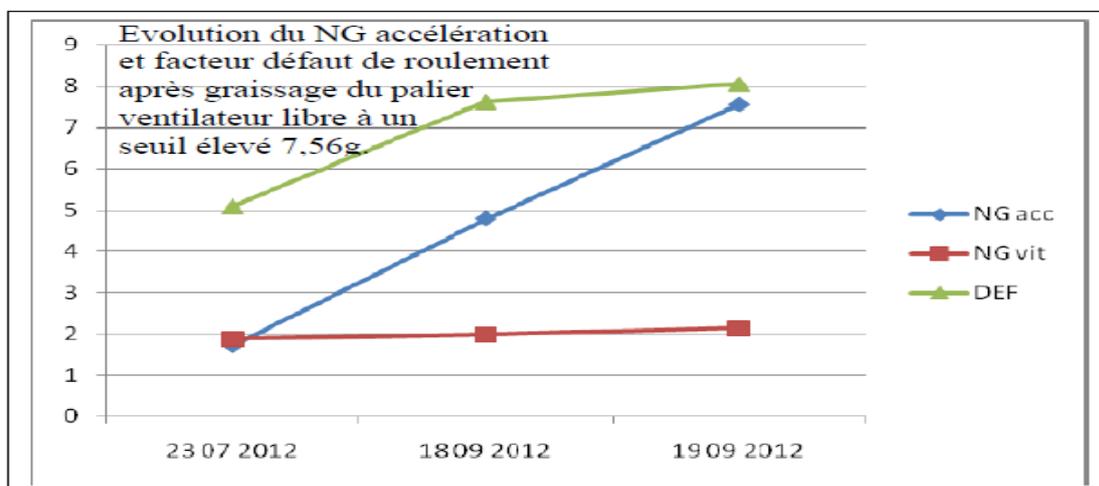


Figure74 : Courbe de tendance des niveaux globaux au point 8RH(2ème mesure)

Une deuxième mesure a mis en évidence l'évolution du niveau global en accélération et du facteur défaut roulement à un seuil élevé 7.56g - 8.05def. Pour mieux comprendre le phénomène et avoir plus d'information sur le dysfonctionnement, on est passé à l'analyse spectrale figure 75.

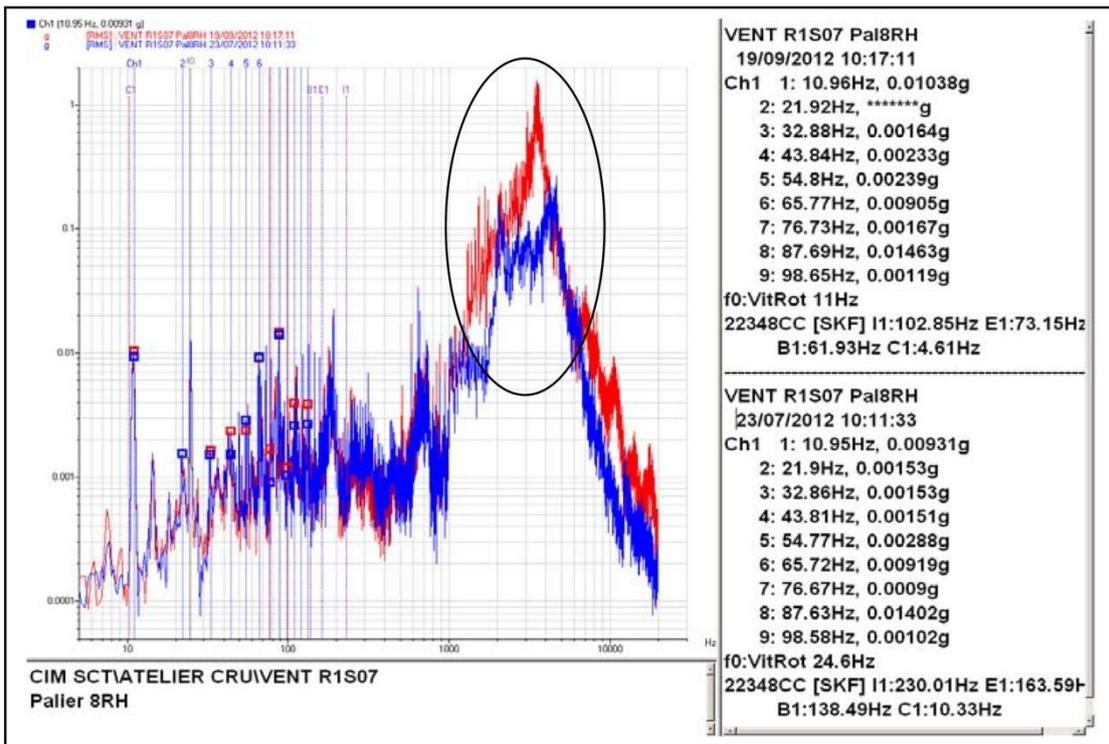


Figure 75. : Analyse spectrale septembre 2012

L'analyse spectrale a montré l'existence d'un balourd ventilateur de l'ordre de 0,01g à 10.96 Hz. Ce dernier est stable et acceptable avec une évolution de l'énergie en hautes fréquences (défaut de roulement). Ensuite pour plus de précision sur le comportement de ces éléments, nous avons fait appel à l'analyse d'enveloppe, figure 76.

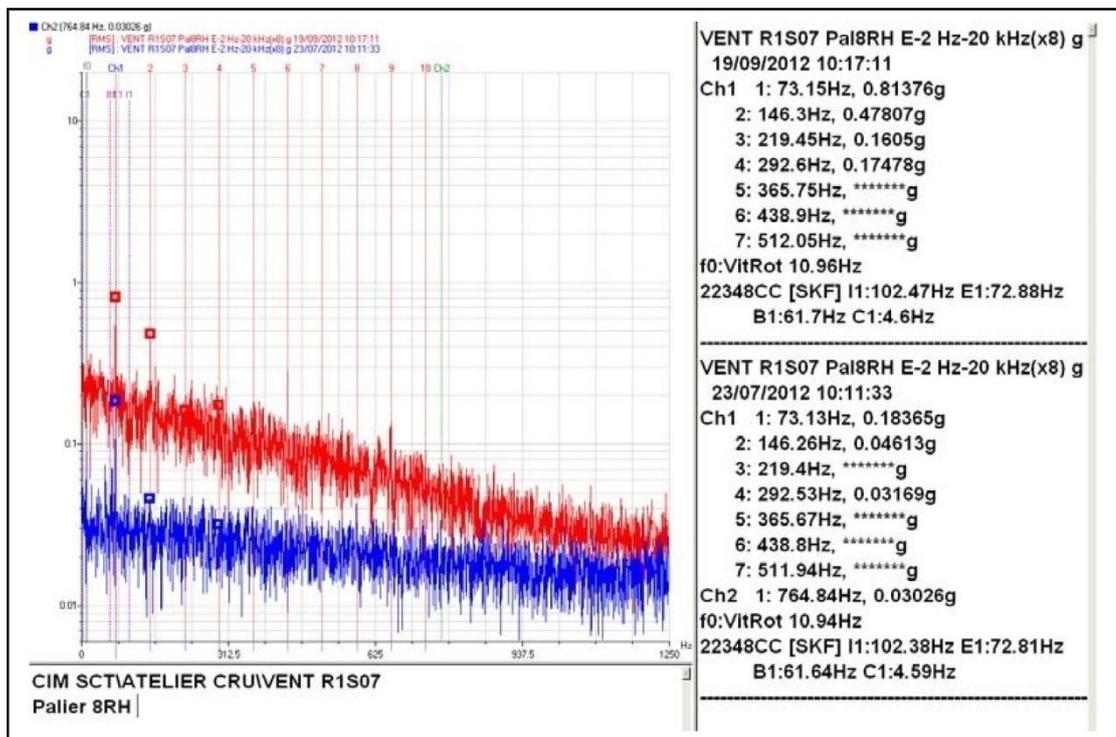


Figure 76 : Analyse d'enveloppe septembre 2012

En 2013 d'autres mesures ont été effectuées sur les mêmes équipements de commande du ventilateur précisément les paliers ou on a révélé les résultats représentés sur les figures (77, 78, 79 et 80).

- ✓ **Analyse globale :** l'analyse globale a montré une évolution des niveaux vibratoires globaux relevés en accélération en axial à un seuil tolérable. Par contre les niveaux vibratoires globaux relevés en vitesse et le facteur défaut de roulement restent stables à un seuil admissible, figure 77.

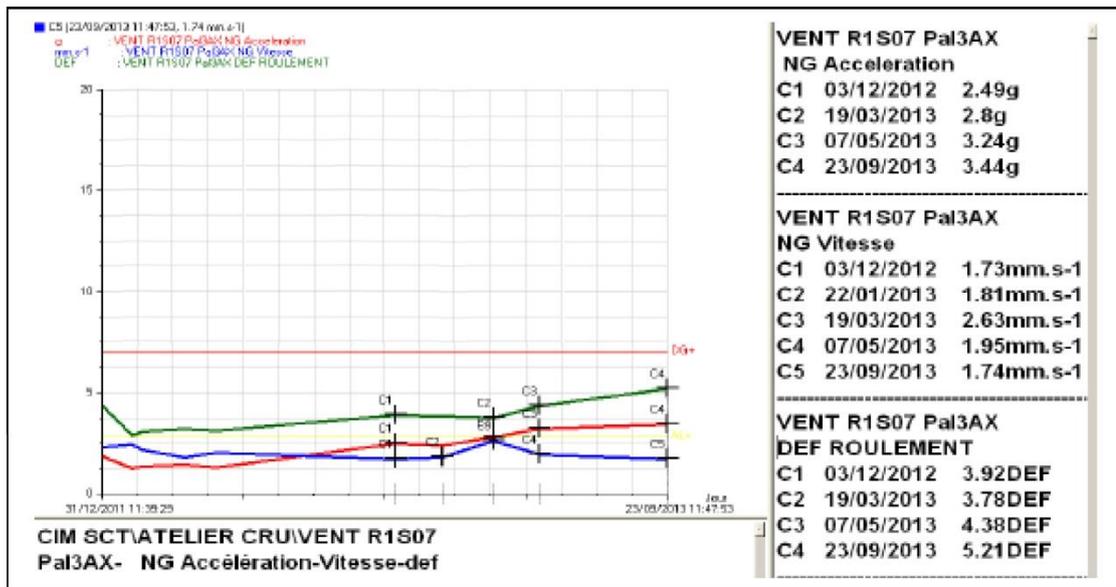


Figure 77 : Courbe de tendance du niveau global accélération, vitesse et facteur défaut roulement à l'entrée

- ✓ **Analyse spectrale :** Cette analyse a fait ressortir une amplitude élevée à la 3<sup>ème</sup> harmonique de la fréquence d'engrènement 2,43 g à 3x 64,6 HZ, des bandes latérales (modulation) autour de la fréquence d'engrènement espacées par la fréquence de rotation de l'arbre de sortie PV 10.93Hz et entrée GV 24,99Hz, et une évolution des amplitudes des premières harmoniques de la fréquence de rotation GV figure 78.

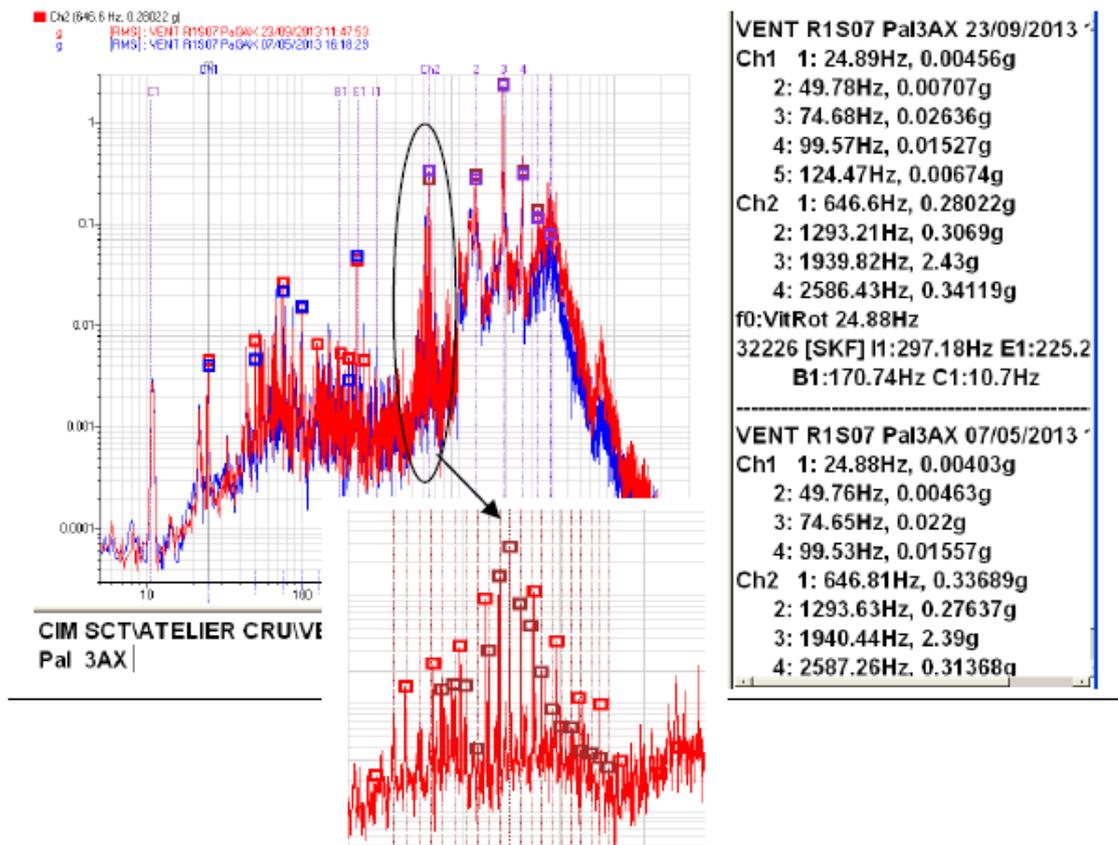


Figure 78: Analyse spectrale septembre 2013

### Paliers ventilateur

L'analyse globale sur ces éléments a montré la stabilité des niveaux vibratoires globaux relevés en accélération et en vitesse avec un facteur défaut roulement tolérable, figure 79

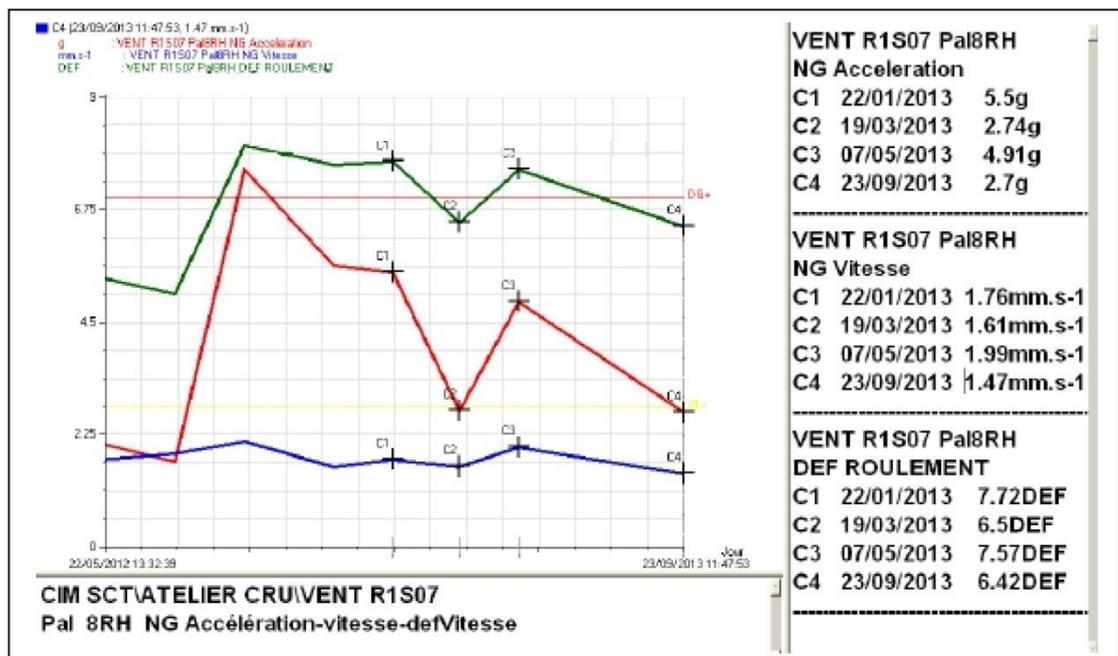
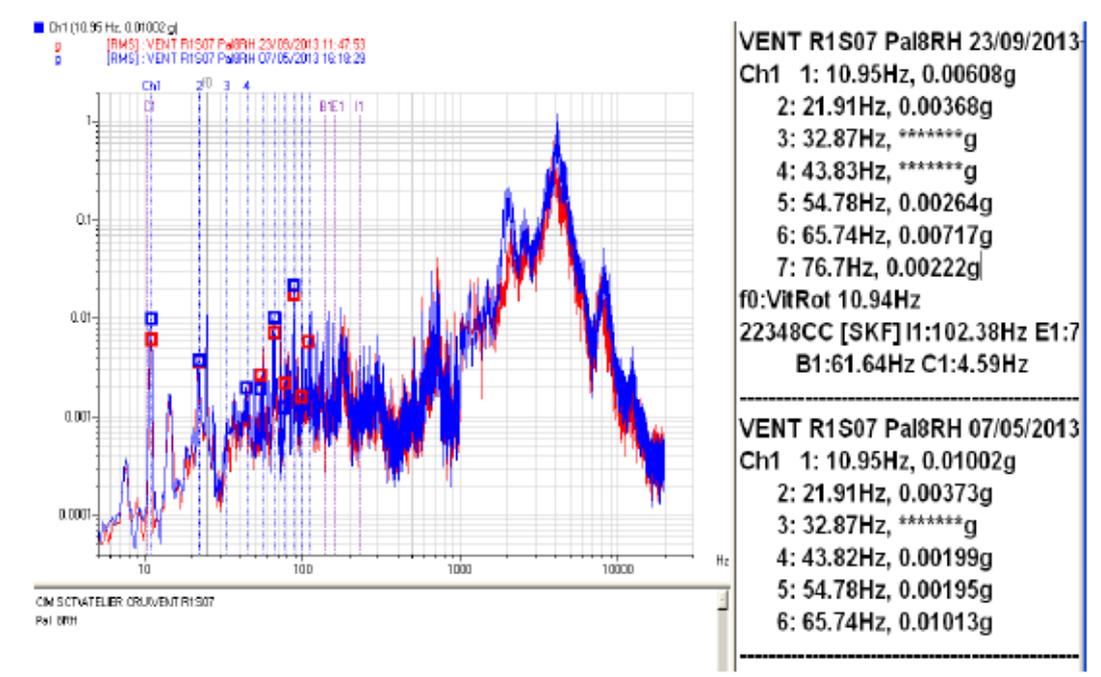


Figure 79 : Courbe de tendance des NG accélération palier libre

- ✓ **Analyse spectrale** : Cette analyse a montré un balourd ventilateur acceptable 0,007 g à 11 HZ figure 80



**Figure 80 : Analyse spectrale du palier libre**

L'intervention presque à temps a permis d'éviter la détérioration du réducteur suite aux défaillances des paliers de roulement, ce qui aurait entraîné l'arrêt du ventilateur de la zone cru, avec de graves conséquences économiques liées à : l'arrêt de la production, estimée à 1200 t/jrs (1 milliard de centime prés).

#### 4.5. Conclusion

L'objectif de cette étude était de donner des informations sur la tendance des phénomènes et de l'apparition du défaut, voire même l'identification de la provenance du défaut.

Le succès d'un service de maintenance est de déterminer, entre autres, par sa capacité de proposer la bonne action au bon moment et au bon endroit. Une maintenance appropriée contribue de manière décisive à cet objectif stratégique. Ainsi arriver, en utilisant l'analyse vibratoire des machines, arriver à diagnostiquer le système de maintenance existant, tout en déterminant d'une manière claire et précise les priorités d'actions à entreprendre afin d'éviter de troubler la production. Dès lors, l'exploitation de cet outil en maintenance constitue un support

robuste de la fonction méthode, cerveau d'un service de maintenance. Parmi ces actions, on peut citer :

- L'enrichissement et l'affinage des informations justes et pertinents nécessaires pour la maîtrise des paramètres de fonctionnement;
- La maîtrise des coûts grâce à un suivi précis des équipements de production;
- L'amélioration de la disponibilité des équipements et de la sécurité;
- La maîtrise de la gestion des pièces de rechange;
- Contribuer à assurer la production prévue,
- Contribuer à maintenir le niveau de qualité du produit fabriqué,  
Contribuer au respect des délais,
- Respecter les objectifs humains : conditions de travail et de sécurité,
- Préserver l'environnement.

De ce fait, le service de maintenance approche à connaître l'état de santé de ses machines, à diriger la procédure d'exploitation vers les maillons les plus pénalisant dans l'entreprise, à améliorer la résolution des problèmes courants, à définir les recommandations nécessaires et à dresser les plans de maintenance appropriés et ainsi s'engager dans un processus d'amélioration continue.

#### **4.6. Recommandations**

Ce type de maintenance devra s'étendre à la plupart des entreprises de production et d'exploitation. Les exemples de succès sont nombreux et l'intérêt de pouvoir détecter rapidement les anomalies, sans même devoir ausculter l'équipement. Ainsi, que de pouvoir prévenir la panne et en prévoir la réparation en temps opportun, tout en tenant compte des impératifs de production, de la pièce de rechange et de l'équipage d'intervention.

Il faut faire appel à l'utilisation des outils modernes pour la gestion du service de maintenance dans nos entreprises, en particulier les outils de la maintenance conditionnelle pour détecter les différentes anomalies survenues dans l'entité (pannes, accidents, incidents, actions menées, etc.). Ces informations nous permettent d'avoir un diagnostic précis et une maintenance ciblée, voire arrivée à une maintenance adéquate répondant aux impératifs imposés par les cimenteries. Ainsi orienter les actions prioritaires à mener dans l'entreprise aux besoins de la production en temps réel;

# Conclusion générale

---

La maîtrise technique et industrielle de l'outil de production repose notamment sur la maintenance courante des matériels et des systèmes, et leur maintenance exceptionnelle qui est en relation avec leur fin de vie technique. Dans son sens le plus général, la maintenance ne se limite pas aux actions correctives menées sur les équipements, comme la réparation ou le remplacement mais elle vise à s'assurer que les machines sont en permanence aptes à remplir la fonction qu'on attend d'elles, dans de bonnes conditions de sécurité et de rentabilité. Parmi ces actions, on peut citer les contrôles des équipements, fondamentaux pour porter un diagnostic sur l'état de ces derniers. Ainsi, il faut que les industrielles veillent à ce que les exploitants d'installations et machines stratégiques (économiquement et sécuritaire ment) mettent en œuvre des politiques de maintenance adaptées aux enjeux de sûreté et de sécurité, dans le souci de la qualité et de la compétitivité. Désormais, dans la pratique, les installations vieillissent et sur le marché la compétitivité devient une préoccupation importante des industriels. De ce fait, il est indispensable que la maintenance reste adaptée au rôle important qu'elle doit jouer dans la prévention des incidents et des arrêts imprévus: détecter et corriger les défauts avant qu'ils ne compromettent la santé des équipements, voire la production et la sécurité dans l'entreprise.

L'analyse vibratoire permet d'établir des fichiers permettant de connaître l'évolution passée de l'état de la machine et prévoir les dates d'intervention sûre, intervenir juste avant que la panne ne survienne et effectuer le remplacement à bon escient. Ce qui permet d'améliorer le fonctionnement des machines et les amener à un niveau dépassant souvent les spécifications d'origines de l'équipement. Ainsi, la phase de maintenance doit idéalement être réduite aux opérations consistant à remplacer, sans tâtonnement, les équipements réellement en panne et faire de la maintenance sélective : « *Le signal vibratoire est l'identité de la machine* ». Désormais, le service de maintenance approche à connaître l'état de santé de ses machines, à diriger la procédure d'exploitation vers les maillons les plus pénalisant dans l'entreprise, à améliorer la résolution des problèmes courants, à définir les recommandations nécessaires et à dresser les plans de maintenance appropriés et ainsi s'engager dans un processus d'amélioration continue.

Les recherches menées se sont articulées autour de plusieurs axes principaux : la sécurité, la sûreté de fonctionnement, l'analyse vibratoire et le diagnostic. Pour notre part, l'objectif

principal était la mise en œuvre du suivi par analyse vibratoire d'une machine de production qui est le ventilateur de tirage R1S07 de la cimenterie d'Elmalabiod.

Les résultats trouvés ont fait ressortir des conclusions plus générales concernant le suivi du comportement pertinent des machines tournantes, en particulier les paliers, les roulements et les réducteurs.

Suite aux mesures relevées sur le moteur en utilisant l'analyse en niveau global, il a été constaté que les niveaux globaux relevés en accélération, en vitesse ainsi que le facteur défaut de roulement sont acceptables.

En conclusion le comportement vibratoire global du moteur est stable à un seuil acceptable, cependant l'analyse spectrale, a permis de donner plus d'information sur l'état de santé du moteur et la détermination de la source de bruit.

Les amplitudes sont stables à la fréquence de rotation du moteur 0.02g à 24.87Hz. Cette méthode donne la possibilité d'identifier le défaut, qui s'explique par la Prépondérance de la 3<sup>ème</sup> harmonique de la fréquence de rotation du moteur dont le seuil reste tolérable. Cette dernière a permis aussi de détecter un Choc à la fréquence de rotation du moteur.

Par contre l'application de cette méthode sur le deuxième composant en relevant des mesures à l'entrée et à la sortie du réducteur a permis d'avoir des informations significatives. On a constaté l'évolution de la vitesse et de l'accélération de l'arbre. Cette méthode a relevé aussi une augmentation du facteur défaut de roulement. Le niveau global NG en accélération et du DEF a atteint la valeur 9,18g /10 DEF. Ainsi qu'une évolution du NG accélération et DEF en vertical à un niveau élevé 11.7g / 10.5DEF ce qui a donné une idée sur le changement de fonctionnement de l'équipement. Donc une dégradation de l'équipement est inévitable. Le seuil était dépassé signe de détérioration.

Afin d'avoir plus de précision sur le comportement constaté l'application de l'analyse d'enveloppe sur le roulement a mis en évidence une évolution de l'amplitude de la deuxième harmonique de la fréquence d'engrènement à l'entrée du réducteur de 0.57g à 0.63g.

Des bandes latérales ont montré une modulation autour de la fréquence d'engrènement espacées par la fréquence de rotation de l'arbre de sortie PV 10.93Hz. Avec l'apparition d'un Peigne de raie à la fréquence 296.88Hz qui correspond à la fréquence de défaut bague interne du roulement palier 4 de l'arbre.

Pour bien identifier la nature précise du défaut détecté, de sa gravité, l'application de l'analyse en niveau global des paliers était obligatoire et nous a permis de constater la faible évolution du NG vitesse de 1.8 à 2.14mm/s dont le seuil reste acceptable. Ainsi que les niveaux

vibratoires globaux relevés en accélération et en vitesse sur les paliers du ventilateur qui sont acceptables.

La même constatation est faite pour le Facteur défaut de roulement qui est tolérable. Cette analyse montre que le Balourd ventilateur est acceptable variant de 0.01g à 10.95 Hz. Par contre le spectre d'enveloppe a fait apparaître un défaut de la bague interne de 1.95g (seuil danger) avec présence de bandes latérales à la fréquence de rotation de l'arbre GV ce qui nécessite un changement de roulement dans les meilleurs délais.

Pour les paliers une première mesure nous a permis de constater une élévation des niveaux globaux relevés en accélération. Par contre ceux relevés en vitesse sont acceptables. La deuxième mesure a mis en évidence l'évolution du niveau global en accélération et du facteur défaut roulement à un seuil élevé 7.56g - 8.05def.

Les mesures effectuées en 2013 ont révélé à travers l'analyse spectrale une élévation de l'amplitude à la 3<sup>ème</sup> harmonique de la fréquence d'engrènement 2,43 g à 3x 64,6 HZ, des bandes latérales (modulation) autour de la fréquence d'engrènement espacées par la fréquence de rotation de l'arbre de sortie PV 10.93Hz et entrée GV 24,99Hz.

La détérioration du réducteur suite aux défaillances des paliers de roulement aurait entraîné l'arrêt du ventilateur de la zone cru, avec de graves conséquences économiques reliées à : l'arrêt de la production, estimée à 1200 t/jrs (1 milliard de centime prés).

Il faut remarquer aussi que le volet diagnostic de la panne est aussi à exploiter : La technologie de groupe permet de réduire le temps d'analyse de panne en essayant de chercher des similitudes avec des cas déjà rencontrés. Cette pratique diminuera le temps de diagnostic et le risque d'erreur.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABORD E, BACHELARD O et CARPENTIER S** 2012, Risques psychosociaux, santé et sécurité au travail : une perspective managériale, Vuibert, p 368.
- AFIM**, 2007, Guide national de la maintenance, AFIM, Paris.
- AFNOR**, 1986, Norme X60-510 Technique d'analyse des systemes –Procedues d'analyse des modes de défaillance (MADE) , AFNOR, Paris
- AFNOR, 2002a**, Norme FD X 60-000 Maintenance industrielle, Fonction maintenance, AFNOR, Paris.
- AMDEC**, 2004, Analyse des modes de défaillances de leurs effets et de leur criticité
- ANONYME** 2011, acte industrie, La maintenance basée sur la fiabilité.  
approach in tooldiag 93. International conference on Fault Diagnosis
- AUGEIX D**, 2002 , Analyse vibratoire des machines tournantes, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique, BM 5- 145, pp. 1-22.
- AYAD, M**, 2015, Recherche de signatures robustes des défauts dans une machine tournante à travers l'analyse de signaux vibratoires, thèse de doctorat en sciences Electromécanique, Université Farhat Abbes Sétif.  
based trend classification for fault diagnosis of chemical processes, Computers and Chemical Engineering, 27, pp.347-362.
- BAUDY J, BOIDIN A et BRENIER G** 1994 Vibrations Equilibrage sur site, Applications à la maintenance conditionnelle.
- BELHOMME A** ,2011 Cours Stratégie de maintenance les défaillances-les causes bts maintenance industrielle.
- BELHOUR S.**, 2008. Contribution to optimizing predictive maintenance By using the software OM-NITREND (on line system) Case: Cement Hamma bouziane. doctoral thesis in mechanical sciences, University of Constantine, Algeria, 90.
- BELLUT S**, 2011 Règles qualitatives générales en sûreté de fonctionnement des systèmes MAR-III-10-73
- BERTRAND R**, 2000 Détection et localisation de défaillances sur un entrainement électrique thèse de doctorat en énergie électrique. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG.
- BISSOL S** 2005. Indexation symbolique d'images : une approche basée sur l'apprentissage non supervisé de régularités. PhD thesis, Université Joseph Fourier - Grenoble 1.

**Blog de la société clearsy.** Présentation de la sûreté de fonctionnement et ses enjeux.

**BOUANAKA ,ML** ,2009, Contribution à l'amélioration des performances opérationnelles des machines industrielles, thèse de doctorat en génie mécanique, Université Mentouri Constantine

**BOUCLY F**, 1990 : Le management de la maintenance assistée par ordinateur (MMAO).AFNOR.

**BOUDAUD N**, 1997, Conception d'un système de diagnostic adaptatif en ligne pour la surveillance des systèmes évolutifs. PhD thesis, Université de Technologie de Compiègne,

**BOULENGER A, PACHAUD C**,1998 , Surveillance des machines par analyse des vibrations, du dépistage au diagnostic , AFNOR 2<sup>ème</sup> tirage, Paris .

**BOULENGER A, PACHAUD C**, 1998, Diagnostic vibratoire en maintenance préventive ,Dunod , Paris.

**BOULENGER A, PACHAUD C** ,2003 Analyse vibratoire en maintenance: surveillance et diagnostic des machines série gestion industrielle, Dunod, Paris

**BRENEUR C**,2002, Éléments de maintenance préventive de machines tournantes dans le cas de défauts combinés d'engrenages et de roulements, thèse de doctorat, école doctorale des sciences pour l'ingénieur de lyon..

**BRIHAC J F**, 2006, Exemple d'arbre de défaillance, approches théoriques des risques Université de Haute Alsace.

**BUFFERNE J**, 2006, Le guide de la TPM : Total Productive Maintenance, Editions organisation, Paris.

**CHAEHOI A** , 2005 « Conception et modélisation de MEMS monolithiques CMOS en technologie FSBM : application aux accéléromètres » Thèse de doctorat, Université Montpellier II, 12, France.

**CHAÏB R, BELLAOUAR A, BENIDIR M , VERZEA I**; For a better control of the availability of the industrial equipments, Recent revue, Vol. 11 (2010), No. 1 (28), March 2010, Pp.7-10 ; Brasov-Romania, ISSN 1582-0246.

**CHAIB R, . BENRETEM A, TEYAR S AND VERZEA I**, 2007, Management of maintenance by vibratory analysis case: a planetary reducer, World Journal of Engineering. Vol.4, N°.1, Pp 22-27. Sun Light Publishing, Canada.ISSN: 1708-5284.

**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

**CHATAIN J-N**, 1993, Diagnostic par système expert. Traité des nouvelles technologies. Série Diagnostic et maintenance.

**CHEVALIER R.**, 2001 «Etat de l'art de la surveillance et du diagnostic des machines tournantes à EDF», RFM.

- CHIKH N**, 2005, Analyse spectrale des vibration Application à la maintenance des équipements mécanique, mémoire de magister, Université M'hamed Bougara Boumardes .
- COCQUEMPOT V, IZADI-ZAMANABADI R, STAROSWIECKI M**,1998. Residual generation for the ship benchmark using structural approach. International Conference on control, Swansea (UK), pages pp. 1480 – 1485.
- COX S.J et CHEYNE A.J.T.**, 1999, Assessing Safety Culture in offshore Environments. HSE Offshore Research Report, Loughborough University, UK.
- DASH S, RENGASWAMY R, VENKATASUBRAMANIAN V**, 2003. Fuzzylogic
- DAUPHINE A**, 2001, Risques et catastrophes, Armand Colin, Paris
- DE ALMEIDA, R.G.T., DA SILVA VICENTE, S.A. et PAVODESE, L.R.**,2002 New technique for evaluation of global vibration levels in rolling bearings. Shock and Vibration., 9, pp. 225-234.
- DE GROOTE M.P**, 1993, Maintenance : au coeur de l'activité industrielle. Dossier maintenance. Industrial systems..
- DEBIOLLES A** , 2007 Diagnostic de systèmes complexes à base de modèle interne, reconnaissance de formes et fusion d'informations. Application au diagnostic des circuits de voie ferroviaires. PhD thesis, Université de Technologie de Compiègne
- DENOEUX .T** , 2001. Diagnostic, intelligence artificielle et reconnaissance des formes. Systèmes Automatisés (IC2), Editions Hermes, Chapitre 3: Diagnostic par reconnaissance de formes Approches non probabilistes, pp.215-244.
- DHILLON B.S**, 1989, Life Cycle Costing: Techniques, Models, and Applications, Gordon & Breach Science pub, Amsterdam.
- DIGITIP**, 2003, Technologie et sécurité industrielle : éléments de prospective, groupe CM international, INERIS, article.
- DJEBILI O**, 2013 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, Université de Reims Champagne- Ardenne.
- DUBUISSON B** 1993, Operator monitoring process based on a fuzzy
- DUBUISSON. B** , 2001. Diagnostic, intelligence artificielle et reconnaissance des formes. Productique (IC2) Editions Hermes, Lavoisier, Paris.
- DUMAS J ,BENNEVAULT B** ,2001 LA MESURE VIBRATOIRE, Groupe MVI technologies.
- DUMAS J, BENNEVAULT B**,2001 Débuter la mesure vibratoire ,db-Stell.
- ESSEHMOUDI A, El HAMMOUMI M.** 2015, La contribution de la culture de sécurité à l'amélioration de sécurité des operateurs de la maintenance (Cas d'une entreprise papetière). X<sup>ème</sup> Conférence Internationale : Conception et Production Intégrées, Tanger, Maroc.

- EUGENE DESIRE EFAGA**, 2004, Analyse des données du retour d'expérience pour l'organisation de la maintenance des équipements de production des PME/PMI dans le cadre de la MBF (maintenance basée sur la fiabilité), thèse de doctorat, ULP-UY I N° : LEPSI-EA3118..
- FADDEN MC , SMITH J.D** 1985, Model for the vibration produced by multiple point defects in a rolling element bearing, Journal of Sound and Vibration, 98 (2), pp 263-273.
- FAKHFAKH, T, CHAARI, AND HADDAR M** , 2005, Numerical and experimental analysis of a gear system with teeth defects, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 25 (5), pp. 542-550.
- FAURE L**, 1993, Aspect des dentures d'engrenage après fonctionnement, Senlis (Oise), CETIM, 128 p.
- FEKI N**, 2012, Modélisation électromécanique de transmissions par engrenages - Applications à la détection et au suivi des avaries. Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, (Cité pages 9, 26 et 27.).
- FLIN R, BURNS C, MEARNS K, Yule S**, Robertson E.M, 2006 Measuring safety climate in health care, Quality and safety in health care, 15, 109-115.
- FRANCASTEL J.C**, 2005, Externalisation de la maintenance stratégique – méthodes – contrats, 2ème édition, Dunod, Paris.
- GAYON, A.** 2001. Importance de la sécurité. Dans les entreprises. In Techniques de l'ingénieur. AG 4 600.
- GILLES D**, 2006, Maintenance des machines et des moteurs, technique de l'ingénieur (BM 4 188)
- GRUSENMEYER C**, 2005a, Les accidents du travail liés à la maintenance, importance et caractérisation, Cahiers de notes documentaires, 4ème trim 2005, INRS, Paris.
- Guy Marie Rakoto Razatindrazato**, 2010, Méthodes numériques pour la caractérisation vibratoire de structures complexes. Autre. Université Paris – Est,. Français. NNT : 2010PEST1086 i
- HALE A.R, SWUSTE P**, 1998, Safety rules: procedural freedom or action constraint, Safety science vol 29, issue 3, 163-177.
- HENG J**, 2003: Pratique de la maintenance préventive, Mécanique, Pneumatique, Hydraulique, Electrique, Froid, l'usine nouvelle, série gestion industrielle, Dunod, Paris 2002 .
- HORE P et ALL**, 2007. Goldgof. Single Pass Fuzzy C - Means. *FUZZ-IEEE*
- HUBEIRFAIGNER**, Analyse vibratoire des machines tournantes, stratégie de maintenance, Bts, maintenance industrielle consulté le 11 /10/2017).  
[www.silanus.fr/sin/formationSTI2D/ET22A-B/ET22A/Ressources/hubertfaigner.pdf](http://www.silanus.fr/sin/formationSTI2D/ET22A-B/ET22A/Ressources/hubertfaigner.pdf)
- ISO 12100**, 2010, Safety of machinery ,General principles for design — Risk assessment and risk reduction
- ISO, 2002, ISO/IEC Guide 73, Management du risque, vocabulaire, principes directeurs pour l'utilisation dans les normes, organisation internationale de normalisation.
- IUNG B, E. LEVRAT, E. THOMAS**, Odds Algorithm'-based Opportunistic Maintenance Task Execution for Preserving Product Conditions, Annals of the CIRP Vol. 56/1/2007.

- JOURNE B**, 2001, La prise de décision dans les organisations à haute fiabilité : entre risque d'accident et risque ureaucratique, cahiers de l'Artémis, Organisation et stratégies industrielles, n°3, 2001, p101-126.
- KWON K, SEKWANG P**, 1998, A bulk-micromachined three-axis accelerometer using silicon direct bonding technology and polysilicon layer” ; Sensors and Actuators A: Physical Volume: 66, Issue: 1-3, April 1, pp. 250-255
- KHELF I**, 2014, Diagnostic des machines tournantes par les techniques de l'intelligence artificielle, thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba.
- LALANNE, C**, 1999 Vibrations et chocs mécaniques, tome 4: dommage par fatigue. Hermès Sciences Publications,
- LANDOLSI F**, partie I, surveillance des machines par analyse vibratoire cours de techniques de surveillance.
- LAURENT A**, 2003, Sécurité des procédés chimiques, Editions Tec & Doc, Lavoisier, Paris.
- LANDOLSI F**, 2010 cours de Techniques de surveillance , ressources pédagogiques pour l'enseignement technologiques .
- LURETTE C**, 2003. Développement d'une technique neuronale Auto-Adaptative pour la classification dynamique de données évolutives. Application à la supervision d'une presse hydraulique. PhD thesis, Université des Sciences et Technologies de Lille.
- MACGREGOR J. F., KOURTI T.**1995, “Statistical process control & multivariate processes.” Control Engineering Practice, Vol. 3,N°3, pp. 403-414.
- MAGNE L, VASSEUR D**, 2006, Risques industriels complexité, incertitude et décision : une approche interdisciplinaire, éditions tec et doc, Lavoisier, Paris
- MARIE-LINE ZANI**, 2003, les roulements, des composants à surveiller de près, mesure 754
- MAX J, DIOT M, BIGRET R**, 1986 , Les analyseurs de spectre à FFT\*et les analyseurs de spectre à corrélation, Traitement du Signal, volume 3 - n° 4-5 -
- MELÉNDEZ, J** 2001, Episodes representation for supervision. Application to diagnosis of a level control system, Workshop on Principles of Diagnosis (*DX'01*), Sansicario, Italia..
- MENYE JB**, 2009, validation de la maintenabilité et de la disponibilité en conception d'un système multi-composants , thèse (PH D ) canada et France .
- MIL HDBK- 470 A**, 1997, Designing and developing maintainable products and systems ,volume1.AMSC N /A.
- MOKHTARI A**, 2007 .Diagnostic des systèmes hybrides : développement d'une méthode associant la détection par classification et la simulation dynamique, PhD thesis, Université de Toulouse, 2007.
- MONCHY F**, 2000, Maintenance Méthodes et organisations, série gestion industrielle, Dunod, Paris.

- MONCHY F**, 2003, Maintenance Méthodes et organisations, série gestion industrielle, Dunod, Paris .
- MOUSS N, MOUSS H, SMADI H**, 2003, Maintenance et production : une approche d'intégration, Phoebus 26. 3<sup>ème</sup> trimestre, 2003, p164-167.
- MOUSSA E**, 2010, Supervision adaptative et pronostic de défaillance pour la maintenance prévisionnelle de systèmes évolutifs complexes, PhD thesis, Université Lille 1.
- NABTI, MT**, 2011, Etude de l'évolution des indicateurs spectraux et cepstraux dans la détection des défauts mécaniques, thèse de Magister université Farhat Abbas, Sétif
- NF EN 13306** Juin 2001 Terminologie de la maintenance. Norme européenne Éditée et diffusée par l'Association Française de Normalisation (AFNOR)
- NOMIKOS P., MACGREGOR J.**, "MoniiDring batch processes using multiway principal component analysis." American Institute of Chemical Engineers Journal, Vol. 40, N° 8, pp.1361-1375.
- ONDEL O**, 2006 . Diagnostic par Reconnaissance de Formes : Application à un ensemble convertisseur-machine asynchrone. PhD thesis, Ecole Centrale de Lyon .
- ORJUELA R, MARX., RAGOT J, AND MAQUIN D**, 2009, Une approche multimodèle pour le diagnostic des systèmes non linéaires. 3SGS, Nancy, France.
- PELLEGRIN C**, 1997, Fondements de la décision de maintenance, Economica, Paris.
- PEYSSON F**, diagnostic des systèmes, C94, aide au diagnostic, d'après le support de cours de Hassan Noura ; Polytech Marseille.
- PLANTE L** , 2007, Faites de la santé et de la sécurité un pacte rentable, [www.actionsst.com](http://www.actionsst.com)
- RAKOTO RAZANDRAZATO GM** ,2010 Méthodes numériques pour la caractérisation vibratoire de structures complexes, Autres Université Paris-Est. Français NNT 2010PEST1086 .
- ROYLANCE L M. ET ANGELL JA** , 1979 A batch-fabricated silicon accelerometer" ; IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-26, pp. 1911–1917.
- RAZAFINDRAZATO, G.M.R**, 2010, Méthodes numériques pour la caractérisation vibratoire de structures complexes, Thèse de doctorat en Sciences de l'Ingénieur, Université Paris Est Créteil.
- RECHT J. L** 1966, Failure Mode and Efect. National SafetyCouncil.
- RIBOT P**, 2009 .Vers l'intégration diagnostic/pronostic pour la maintenance des systèmes complexes, Doctorant de l'université de Toulouse .
- SADETTIN O, NIZAMI A , VELI C** , Vibration Monitoring for Defect Diagnosis of Rolling element bearings as a predictive maintenance tool: Comprehensive case studies, NDT&E International 39 (2006) 293–298..
- SCTRICK L**, 2004, La prévention des risques professionnels.
- SOURIS JP**, 1993, La maintenance source de profit, Editions d'organisation, Paris.
- TALEB M, CHAIB R ET CHETOUANI Y** 2012, Pour promouvoir une culture de santé et de sécurité au travail dans les cimenteries, Congrès International en Génie Industriel et Management

des Systèmes CIGIMS 2012 Faculté des Sciences et Techniques de Fès, Fès 18 – 19 Avril Maroc. .

**TAZI D**, 2008. Externalisation de la maintenance et Ses impacts sur la sécurité Dans les industries de procédés thèse de doctorat l'université de Toulouse.

**VASELLINJ.L,COMBET.F**, 2015 Contribution of collecting raw time signals of vibration monitoring of a single production site,feedback,22 nd French congress of Mechanics.

**VENKATASUBRAMANIAN V., RENGASWAMY R., KAVURI**. 2003. A review of process fault detection and diagnosis Part II: Qualitative Models and Search Strategies, *Computers and ChemicalEngineering*, 27, pp. 313-326.

**VERRON S**,2007, Diagnostic et surveillance des processus complexes par réseaux bayésiens. PhD thesis, Université d'Angers

**VILLEMEUR A**, 1988, Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels, Eyrolles, Paris.

**WATEL P**, 2001, La société du risque, La découverte, collection repères, Paris

**WILDAVSKY A**, 1988, Searching for Safety, The social philosophy and policy center, Transaction books, New Brunswick..

**ZWINGELSTEIN**, 1996, La maintenance basée sur la fiabilité – guide pratique d'application de la RCM, Hermes,Paris .

## ANNEXE 1

### Questionnaire relatif aux causes des accidents de travail dans une entreprise

#### Cimenterie.....

NOM ET

PRENOM .....

SEXE : F  M

AGE .....ans

#### **A : Sécurité et conditions de travail**

- 1) Conditions de travail difficiles..... Oui  Non
- 2) Situation complexe sur le lieu de travail..... Oui  Non
- 2) Manque d'hygiène et d'organisation..... Oui  Non
- 3) Sécurité insuffisante de machine..... Oui  Non
- 4) Rythme de travail élevé..... Oui  Non
- 5) Changement souvent de poste de travail..... Oui  Non
- 6) Absence de stratégie de prévention sécuritaire..... Oui  Non
- 7) Manque de stratégie claire en matière de sécurité et  
santé de travail (SST)..... Oui  Non
- 8) Insuffisance en moyens et ressources pour utiliser efficacement  
les solutions en SST..... Oui  Non
- 9) Manque de ressources humaines et moyens financiers pour assurer  
une bonne gestion de la SST..... Oui  Non

## **B : Ambiance et attitude des employés au travail**

- 1) Manque d'expérience et de motivation..... Oui  Non
- 2) Manque de communication, d'information et de sensibilisation..... **Oui**  **Non**
- 3) Imprudence.....Oui  Non
- 4) Stress..... Oui  Non
- 5) Manque de conscience en responsabilité..... Oui  Non
- 6) Implication insuffisante des employés et de la direction..... Oui  Non
- 7) Négligence des conséquences d'une lésion professionnelle..... Oui  Non
- 8) Présence d'un Burn-in [\*], être présent de corps au travail, mais..... Oui  Non   
absent d'esprit.
- 9) Certaines personnes, s'obstiner à travailler même quand ça ne va pas,  
même quand un médecin recommande quelques jours de repos..... Oui  Non.
- 10) Remise en question des processus organisationnels existants..... Oui  Non

## ANNEXE 2

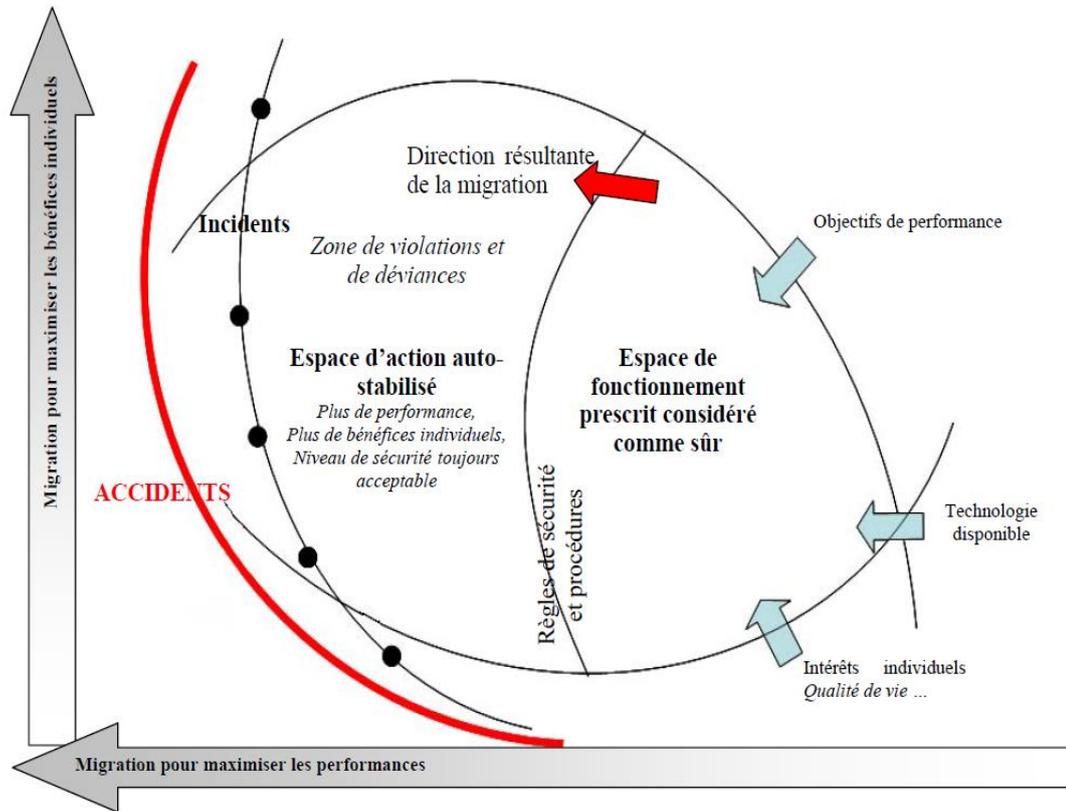


Figure 1 : Modèle de la double migration Amalberti 2001

### ANNEXE 3

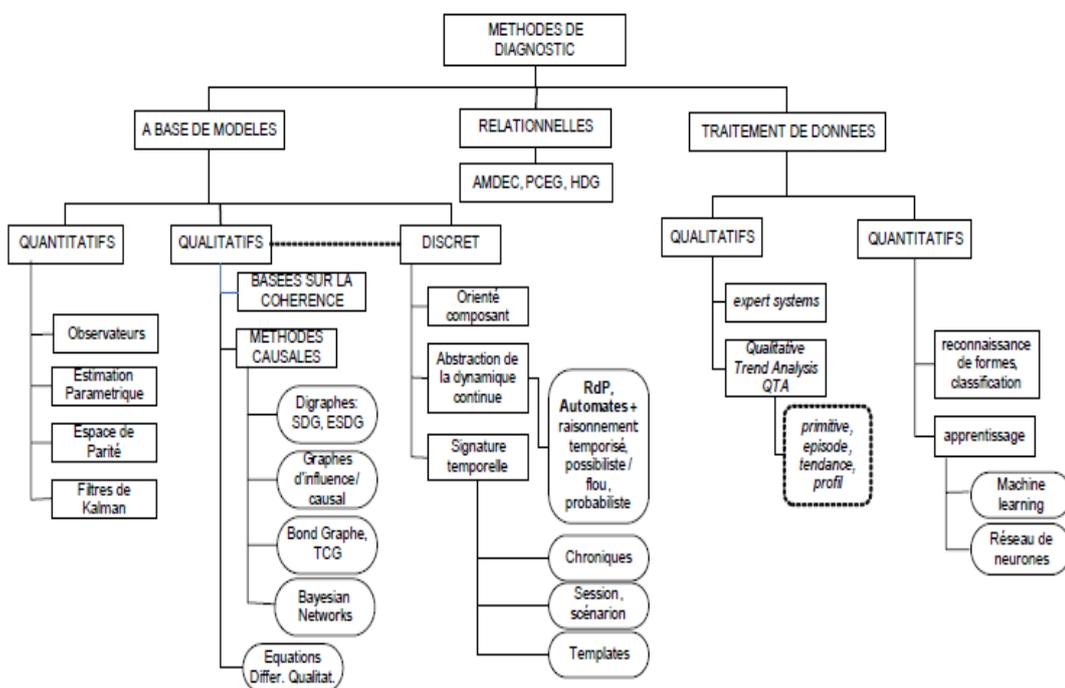


Figure 2 : Classification générale des approches de diagnostic

## ANNEXE 4

### Définitions :

| SOURCE  |  |
|---|--|
| (AQS-GT<br>OORS, Mars<br>1996)                                | Etat ou situation comportant une potentialité de dommages.   |
| (GT<br>Méthodologie,<br>2003)                                 | <p>La notion de danger définit une propriété intrinsèque à une substance (ex : butane, chlore), à un système technique (ex : mise sous pression d'un gaz), à une disposition (ex : élévation d'une charge), à un organisme (ex : microbes), etc., de nature à entraîner un dommage sur un « élément vulnérable ».</p> <p>Sont ainsi rattachées à la notion de « danger » les notions d'inflammabilité ou d'explosivité, de toxicité, de caractère infectieux etc., inhérentes à un produit et celle d'énergie disponible (pneumatique ou potentielle) qui caractérisent le danger.</p> |
| (BSI OHSAS<br>18001, 2005)                                    | <p>Situation, condition ou pratique qui comporte en elle-même un potentiel à causer des dommages aux personnes, aux biens ou à l'environnement.</p> <p>Une source ou une situation pouvant nuire à par blessure ou atteinte à la santé, dommage à la propriété et à l'environnement du lieu de travail ou une combinaison de ces éléments.</p>   |
| (CEI 300-3-9,<br>1995)  | Source potentielle de dommage.   |
| (NF EN 61508,<br>Décembre<br>1998)                            | Le danger désigne une nuisance potentielle pouvant porter atteinte aux biens (détérioration ou destruction), à l'environnement, ou aux personnes.  |
| (Directive<br>96/82/EC<br>(SEVESO II), 9<br>décembre<br>1996) | La propriété intrinsèque d'une substance dangereuse ou d'une situation physique de pouvoir provoquer des dommages pour la santé humaine et/ou l'environnement.   |

**Proposition :** Le danger se définit comme une propriété intrinsèque inhérente à un type d'entité ou un type d'événement qui a la potentialité de provoquer un dommage.