

05 ماي 2025

المسيلة في:

رقم: 109 / ق هك / 2025

شهادة إدارية

بخصوص مطبوعة الدروس الخاصة بالأستاذ

دفداف المبروك

بناءً على محضر اللجنة العلمية لقسم الهندسة الكهربائية تحت رقم: 41 / ق.هك/ 2025 المنعقد بتاريخ 17 فيفري 2025 والمتضمن تعيين الخبراء: الأستاذ غماري زين أستاذ بجامعة المسيلة، الأستاذ شريف بلال جمال الدين أستاذ محاضر - أ بجامعة المسيلة، والأستاذ عبدو عبد الحق أستاذ محاضر - أ بجامعة باتنة 02 وذلك لتقييم مطبوعة الدروس الخاصة بالأستاذ دفداف المبروك أستاذ محاضر-- أ بقسم الهندسة الكهربائية لجامعة المسيلة تحت عنوان:

" Diagnostic et Surveillance"

وبعد إطلاع رئيس اللجنة العلمية على التقارير الواردة والتي كانت كلها ايجابية، وعليه فإن اللجنة لا ترى مانعا أن تتخذه سندا في تدريس طلبة السنة الأولى ماستر إلكتروميكانيك، شعبة الإلكتروميكانيك، ميدان علوم وتكنولوجيا وأن تعتمد في أي تقييم للمسار العلمي للأستاذ المعني.

رئيس اللجنة العلمية

بوقرة عبد الرحمن
رئيس اللجنة العلمية
قسم الهندسة الكهربائية
كلية التكنولوجيا

Diagnostic et Surveillance

[Support de cours]

Destiné aux étudiants, 1^{ère} Année Master Electromécanique



Réalisé par : Dr. Mabrouk DEFDAF

*(Maitre de Conférences Classe A, Département de
Génie-Électrique, Université de M'sila).*

2024-2025

Table de matières

Chapitre 1. Analyse des modes de défaillances

Analyse fonctionnelle; Analyse qualitative; Analyse quantitative.

Chapitre 2. Techniques de surveillances

Systématique; Conditionnelle; Prévisionnelle; Surveillance par les vibrations.

Chapitre 3. Surveillance de l'état de fonctionnement d'une machine

Reconnaissances des pannes; Etablissement des alarmes; Surveillances des défauts de machines (roulements, paliers, poulies, engrenages,...).

Partie 2. Diagnostique

Chapitre 1. Généralités

Identification de la défaillance; Constatation de la défaillance.

Chapitre 2. Outils d'analyse du système

Analyse fonctionnelle de type SADT et FAST (schémas blocs, chaîne fonctionnelle, équations logiques, chronogramme).

Chapitre 3. Démarche globale de localisation d'une défaillance

Phases de l'identification de la chaîne défaillante; Identification de l'élément défaillant; Questionnaire autodiagnostic.

Chapitre N°01: Analyse des Modes de Défaillances

I.1 Introduction

L'analyse des défaillances peut s'effectuer :

- Soit de manière fonctionnelle " Démarche qui consiste à recenser, caractériser, ordonner, hiérarchiser et valoriser les fonctions".
- Soit de manière quantitative puis qualitative en exploitant l'historique de l'équipement et les données qualitatives du diagnostic et de l'expertise des défaillances
- Soit de manière prévisionnelle en phase de conception ou a posteriori, après retour d'expérience.

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

L'exploitation de l'historique va permettre d'effectuer ce choix. Or, certains diront qu'ils n'ont pas le temps d'exploiter l'historique des machines, qu'ils ont autres choses à faire (du correctif certainement !..). Le refus d'exploiter les historiques montre une totale méconnaissance des méthodes de gestion de la maintenance, et donc une totale désorganisation du service Maintenance. Il est clair que le choix des types de défaillance est important : une défaillance intrinsèque (propre au matériel) n'a rien à voir avec une défaillance extrinsèque (liée à l'environnement), et en tout état de cause, ne peut s'analyser de la même manière, même si on apporte par la suite un correctif.

I.2 Analyse fonctionnelle (AF)

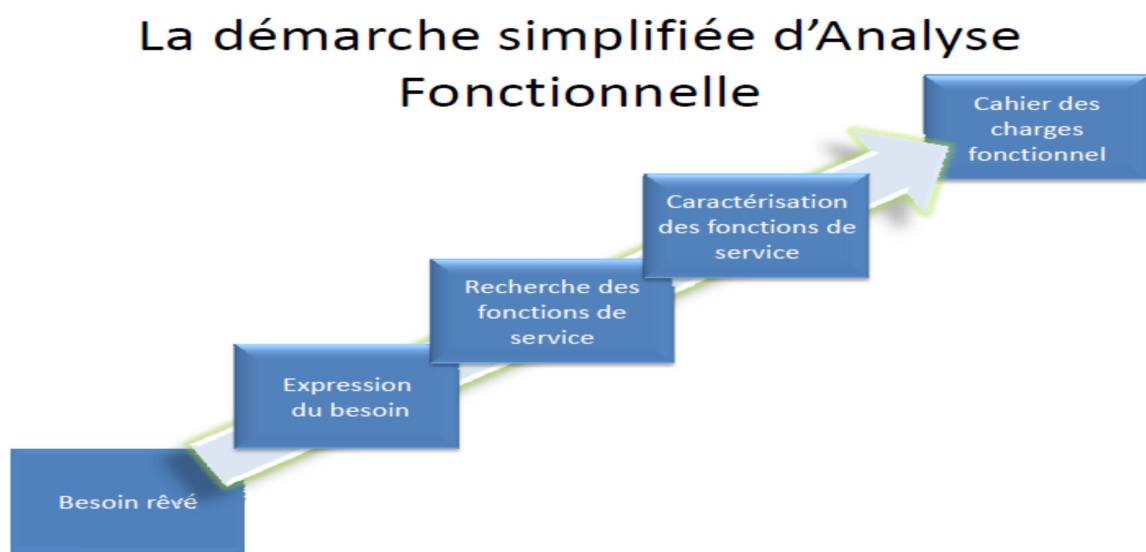


Figure .I.1 - Démarche simplifiée d'analyse fonctionnelle.

A- PRESENTATION :

Les premières méthodes assimilables à de l'AF ont été mises en pratique aux Etats Unis peu après la Seconde Guerre mondiale, en 1947 (chez *General Electric*).

A qui s'adresse l'A.F. ?

L'AF s'adresse aux concepteurs de *produits*.

Le mot **produit** peut ici prendre des sens très divers. Il peut s'agir d'un objet matériel ou immatériel (produit industriel, objet technique, programme informatique, service à la personne, services financiers...).

Quel est le but de l'A.F. ?

- Le but de l'AF est d'optimiser la conception ou la reconception de produits en s'appuyant sur les **fonctions** que doit réaliser le produit.

Une fois les fonctions du produit identifiées et caractérisées, l'équipe de conception peut mesurer son état d'avancement et de réussite par rapport à des critères objectifs.

Quand utiliser l'AF ?

L'AF n'a de sens que si elle est menée **au début** d'un projet.

Pourquoi utiliser l'AF ?

L'AF permet d'éviter certains pièges classiques de la conception (aveuglement, manque d'objectivité, mauvaise gestion des priorités). Dans les faits, les premières étapes de l'AF sont générales et **concernent tous les acteurs** d'un même projet. C'est seulement dans un deuxième temps que l'AF devient technique, et oriente les concepteurs vers des solutions techniques.

L'AF rend ainsi possible un dialogue entre tous les intervenants d'un projet (quels que soient leurs domaines de compétence). C'est un gage d'objectivité et de créativité dans la conduite du projet.

B- DEFINITION :

D'après la norme AFNOR NF X 50 -151, l'analyse fonctionnelle est une démarche qui consiste à rechercher, ordonner, caractériser les fonctions selon des critères d'appréciation, des niveaux et de flexibilité, hiérarchiser et/ou valoriser les fonctions en attribuant un poids en valeur relative ou absolue.

A partir de l'analyse fonctionnelle, on pourra mener deux études d'aspects différents:

- Aspect économique ou (externe) : l'analyse de la valeur ;
- Aspect technique ou (interne) : l'AMDEC ;

Analyse Fonctionnelle

but - objectifs

milieu environnant

Cahier Des Charges Fonctionnel (cdcf)

réponse technique au cdcf

Analyse de la valeur

qualité économique du produit

chiffrage des fonctions

rendement de conception

solution optimisée en coût

AMDEC

fiabilité du produit

qualité technique

mode de défaillance

causes - effets - criticité

solution fiabilisée

Synthèse solution fiable et optimisée

Figure .I.2 - Aspects d'analyse fonctionnelle.

B-1- l'analyse de la valeur : (Aspect économique ou analyse externe)

A pour objectif, à partir de l'expression d'un besoin, de déterminer les solutions susceptibles de répondre à ce besoin et de parvenir à la meilleure optimisation technico-économique du couple besoin solution

B-2- l'AMDEC : (Aspect technique ou analyse interne)

Pour analyser les défaillances d'un système il est nécessaire de bien identifier à quoi doit servir ce système ; c'est-à-dire de bien identifier toutes les fonctions que ce système doit remplir durant sa durée de fonctionnement.

L'AMDEC sera développée dans le prochain chapitre (chapitre 2).

C- METHODOLOGIE :

L'analyse fonctionnelle s'effectue en quatre étapes :

- Recenser les fonctions ;
- Ordonner les fonctions ;
- Caractériser et quantifier les fonctions ;
- Hiérarchiser les fonctions ;

C-1- Recenser les fonctions :

La recherche des fonctions s'effectue en étudiant les relations du système avec son environnement. Chaque fonction devra être exprimée en termes de finalité et être formulée par un verbe à l'infinitif suivi d'un ou plusieurs compléments.

- Définition de la fonction :

La définition d'une fonction est donnée par la norme AFNOR X51-151 : « action d'un produit au de l'un de ces constituants exprimée exclusivement en terme de finalité ».

- Différents types de fonctions :

En distingue deux catégories de fonctions :

- Fonctions de service ;
- Fonctions techniques ;

Fonctions de service (FS) :

« La fonction de service est l'**Action** du produit avec son **milieu extérieur**, qui contribue à la satisfaction du besoin (identifié et caractérisé lors de l'A.B.) »

Il existe deux types de fonction de service :

- Fonctions principales ;
- Fonctions contraintes ;

➤ Fonctions principales (FP) :

« La **FP** est une Fonction de service qui met en relation deux élément du milieu extérieur (ou plus), via le produit »

Les fonctions principales traduisent obligatoirement des actions réalisées par le produit, donc il s'agit d'une fonction attendue d'un produit pour répondre à un besoin d'un utilisateur donné.

➤ Fonctions contraintes (FC) :

« La **FC** est une Fonction de service qui met en relation le produit avec un seul élément du milieux extérieur. »

Une **contrainte** est une limitation de la liberté du concepteur (règlement, normes et impératifs d'interface matérielle ou immatérielle) lorsqu'elle exprime le fait que, dans une phase d'utilisation, le produit ne doit pas affecter un élément du milieu extérieur ou être affecter par lui.

Fonctions techniques (FT) :

« Une **Fonction Technique** est une fonction contribuant à réaliser une fonction de service par un moyen technique. »

C'est la fonction qui facilite, améliore ou complète le service rendu. Ce type de fonction ne résulte pas de la demande explicite de client, et n'est pas non plus une contrainte. Il s'agit de proposer au client des améliorations pour son produit.

Objectif de l'analyse fonctionnelle interne : « choisir les solutions techniques »

L'Analyse Fonctionnelle interne permet de s'intéresser aux constituants du système appelés « **solutions techniques** » et de prévoir leurs degrés de performance dans la réalisation des fonctions de service et donc dans la satisfaction du besoin.

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

- le **diagramme F.A.S.T.** (Function Analysis System Technic),
- le **diagramme S.A.D.T.** (Structured Analysis and Design Technic).

I.3 Analyse quantitative des défaillances :

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

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

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

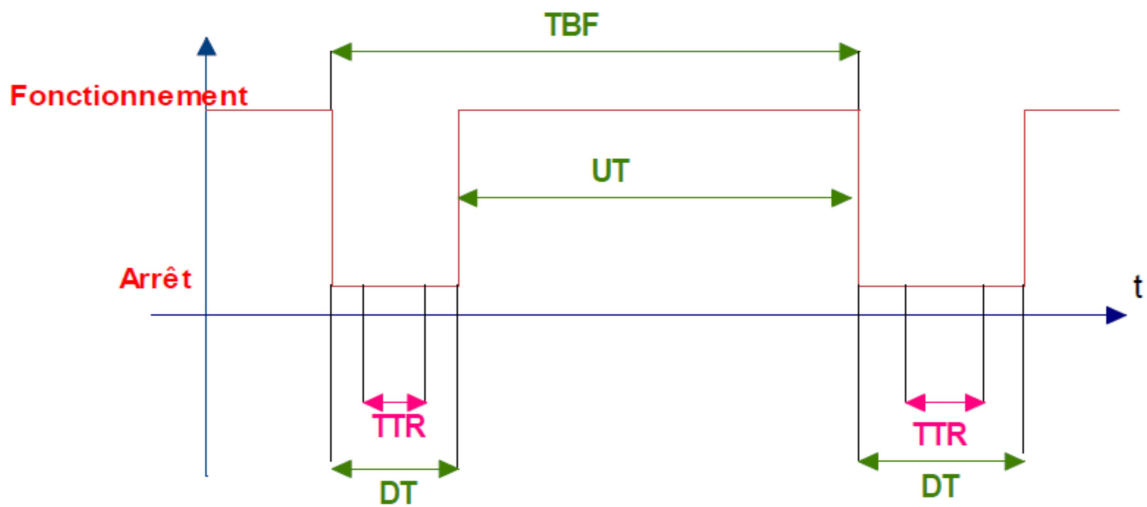


Figure I.3 Analyse des temps

1.3-1/ Méthode ABC (Diagramme Pareto) :

Parmi la multitude de préoccupations qui se posent à un responsable maintenance, il lui faut décider quelles défaillances doivent être étudiées et/ou améliorées en premier. Pour cela, il faut déceler celles qui sont les plus importantes et dont la résolution ou l'amélioration serait le plus rentable, en particulier en terme de coûts d'indisponibilité. La difficulté réside dans le fait que ce qui « est important » et que ce qu'il « l'est moins » ne se distinguent pas toujours de façon claire.

La méthode ABC apporte une réponse. Elle permet l'investigation qui met en évidence les éléments les plus importants d'un problème afin de faciliter les choix et les priorités.

On classe les événements (pannes par exemple) par ordre décroissant de coûts (temps d'arrêts, coût financier, nombre, etc..), chaque événement se rapportant à une entité. On établit ensuite un graphique faisant correspondre les pourcentages de coûts cumulés aux pourcentages de types de pannes ou de défaillances cumulés. Sur le schéma figure I.4, on observe trois zones.

1. Zone A : 20% des pannes occasionnent 80% des coûts ;
2. Zone B : les 30% de pannes supplémentaires ne coûtent que 15% supplémentaires ;
3. Zone C : les 50% de pannes restantes ne concernent que 5% du coût global.

Conclusion : il est évident que la préparation des travaux de maintenance doit porter sur les pannes de la zone A.

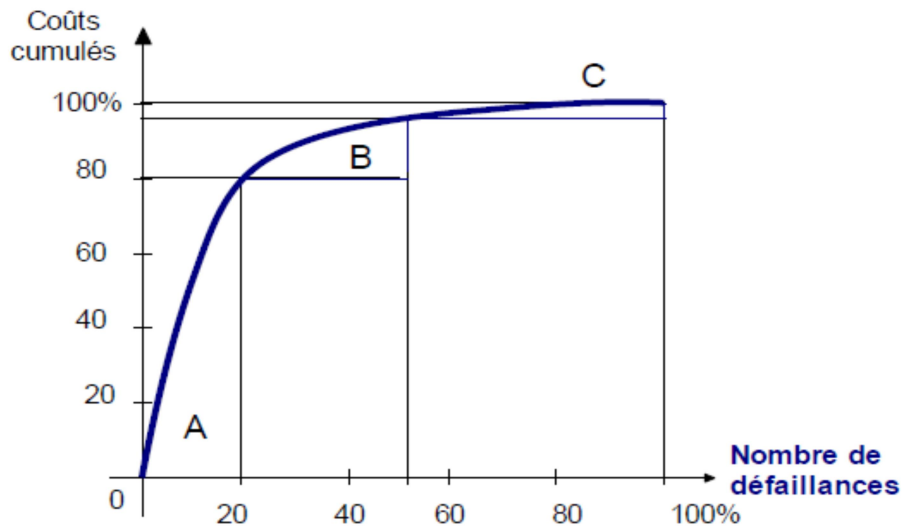


Figure I.4 Diagramme de Pareto ou courbe ABC

En maintenance cette méthode est très utile pour déterminer les urgences ou les tâches les plus rentables, par exemple :

- S'attacher particulièrement à la préparation des interventions sur les défaillances les plus fréquentes et/ou les plus coûteuses (documentation, gammes opératoires, contrats, ordonnancement, etc..),
- Rechercher les causes et les améliorations possibles pour ces mêmes défaillances,
- Organiser un magasin en fonction des fréquences de sortie des pièces (nombre de pièces et emplacement),
- Décider de la politique de maintenance à appliquer sur certains équipements en fonction des heures et des coûts de maintenance.

Attention toutefois : cette méthode ne résout pas les problèmes, mais elle attire l'attention du technicien sur les groupes d'éléments à étudier en priorité.

1.3.2 Diagrammes de Pareto en N , Nt et \bar{t} :

Le service maintenance peut exploiter cette méthode en allant beaucoup plus loin :

- On dresse un tableau regroupant les sous-ensembles, le nombre de défaillances N , les temps d'arrêt par sous-ensemble Nt et la moyenne des temps d'arrêt \bar{t} ;
- On élabore les diagrammes en bâtons N , Nt et \bar{t} ; ils permettront de déterminer la priorité de prise en charge des sous-ensembles par le service maintenance,
- Le graphe en N oriente vers l'amélioration de la fiabilité ;
- Le graphe en Nt est un indicateur de disponibilité, car Nt estime la perte de disponibilité de chaque sous-ensemble ;
- Le graphe en \bar{t} oriente vers la maintenabilité, c'est à dire l'amélioration de l'aptitude à la maintenance.

Application :

Une machine comporte 10 sous-ensembles dont on a relevé l'historique des pannes. L'entreprise, qui utilise cette machine, désire augmenter sa productivité en diminuant les pannes sérieuses. Pour cela elle demande au service de maintenance de définir des priorités sur les améliorations à apporter à cette machine. L'historique de la machine fournit le tableau suivant.

Sous-ensembles	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Nombre d'heures d'arrêt	26,5	11	1	57	56,5	1	17	1,5	9,5	1
Nombre de pannes	4	15	4	4	3	8	12	2	3	2

Tableau 1: Historique d'une machine (Application).

Solution :

A-Diagramme ABC :

Du tableau précédent, on tire le tableau des coûts et des pannes cumulées.

Sous-ensembles	Classement en coût (en h)	Cumul des coûts (en h)	% des coûts cumulés	Nombre de pannes	Cumul des pannes	% des pannes cumulées
D	57	57	31,3	4	4	7
E	56,5	113,5	62,4	3	7	12,3
A	26,5	140	76,9	4	11	19,3
G	17	157	87,2	12	23	40,3
B	11	168	92,3	15	38	66,7
I	9,5	177,5	97,5	3	41	71,9
H	1,5	179	98,3	2	43	75,4
C	1	180	98,9	4	47	82,4
F	1	181	99,4	8	55	96,5
J	1	182	100	2	57	100

Tableau 2: Tableau des coûts et des pannes cumulées (Application).

A partir du tableau ci-dessus, on construit le diagramme de Pareto (figure I.5). Les cases grises nous donnent les limites des zones A, B et C. Il est donc évident qu'une amélioration de la fiabilité sur les sous-ensembles D, E et A peut procurer jusqu'à 76,9% de gain sur les pannes.

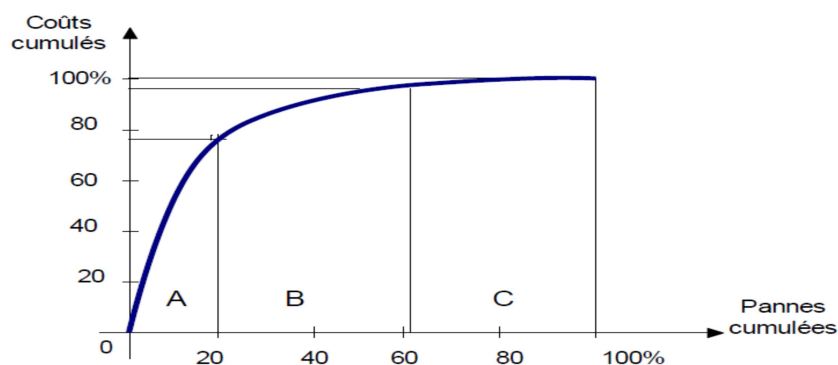


Figure I.5 Courbe ABC (Application).

B – Diagrammes en N, Nt et \bar{t}

Sous-ensembles	N	Nt	\bar{t}
A	4	26,5	6,625
B	15	11	0,73
C	4	1	0,25
D	4	57	14,25
E	3	56,5	21,83
F	8	1	0,125
G	12	17	1,42
H	2	1,5	0,75
I	3	9,5	3,17
J	2	1	0,5

Tableau 3: Tableau en N, Nt et \bar{t}

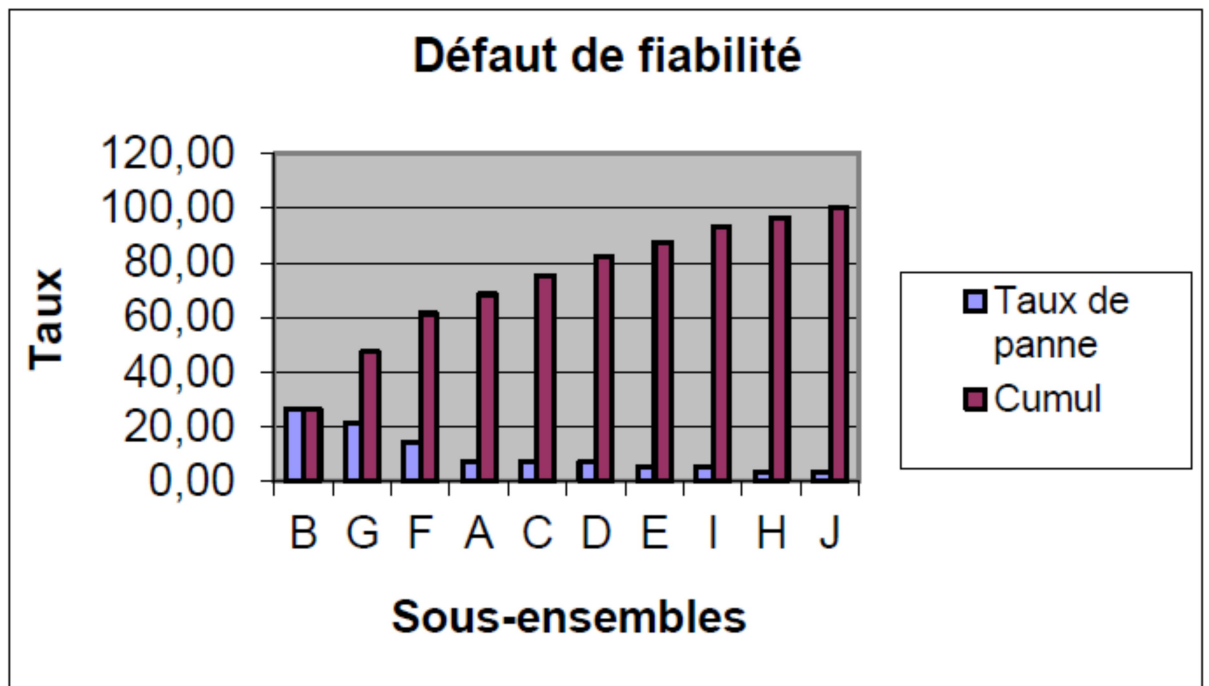


Figure I.6 Mise en évidence des éléments les moins fiables (Application).

Le graphe en N (figure I.6) oriente vers l'amélioration de la fiabilité : ici on constate que les sous-ensembles B et G sont ceux sur lesquels il faudra agir prioritairement.

Différentes actions sont envisageables : modifications techniques (qualité des composants), consignes de conduite, surveillance accrue (maintenance de ronde), actions préventives systématiques dans un premier temps, conditionnelle ensuite.

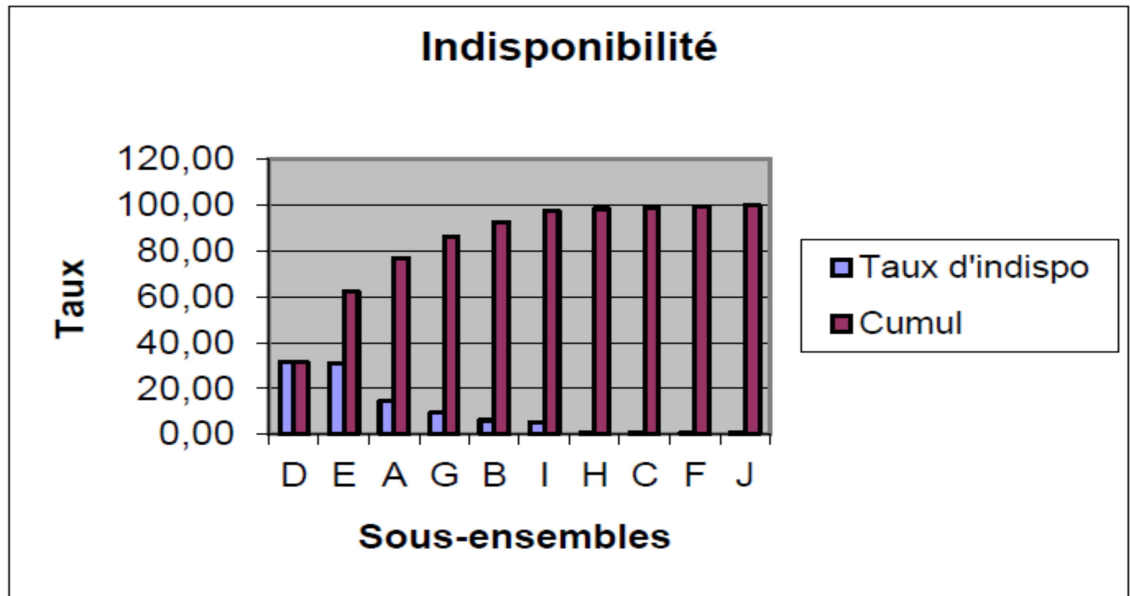


Figure I.7 Mise en évidence des éléments les moins disponibles (Application).

Le graphe en Nt (figure I.7) est un indicateur de disponibilité, car Nt estime la perte de disponibilité de chaque sous-ensemble. Il permet donc de sélectionner l'ordre de prise en charge des types de défaillance en fonction de leur criticité (ici les sous-ensembles D et E).

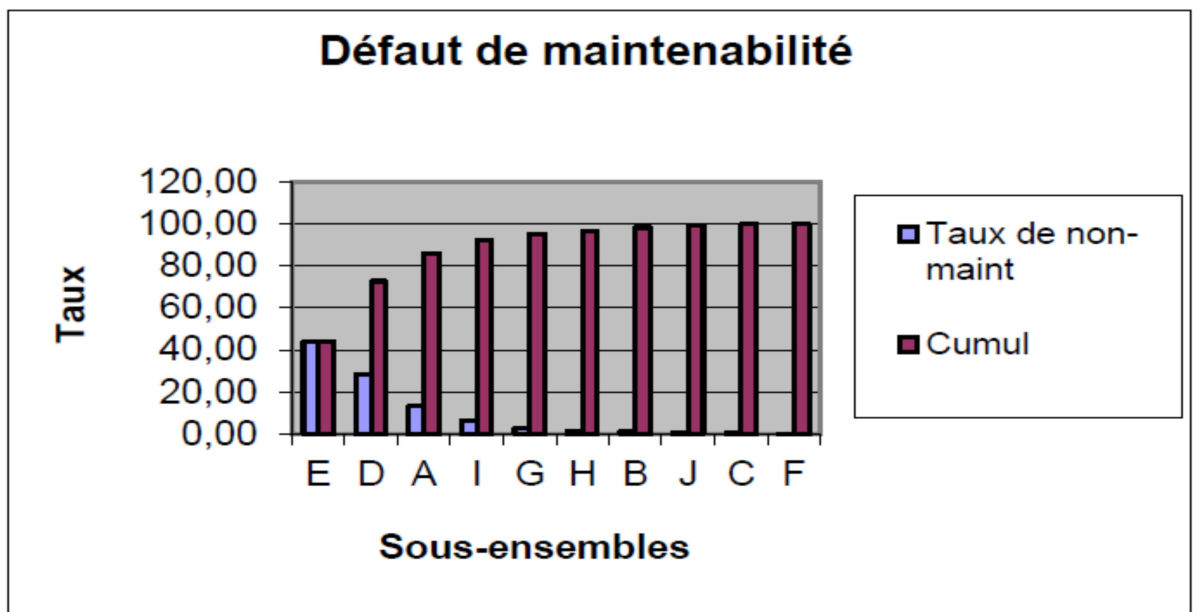


Figure I.8 Mise en évidence des éléments les moins maintenables (Application).

Le graphe en t^- (figure I.8) oriente vers la maintenabilité, c'est à dire l'amélioration de l'aptitude à la maintenance. Ici, les sous-ensembles E et D présentent quasiment 80% des difficultés de réparation.

Après analyse de t^- (attente maintenance, déplacements, temps de diagnostic, attente de pièce, etc.), il sera possible d'agir sur :

- La logistique (moyens de dépannage, de manutention, etc.),
- L'organisation de la maintenance (gammes d'intervention, formation du personnel, échanges standard, etc.),
- L'amélioration de la maintenabilité (accessibilité, conception modulaire, etc.).

1-4/ Abaque de Noiret :

L'abaque de Noiret est un outil de calcul scientifique qui permet d'orienter le choix de la politique de maintenance en fonction:

- des caractéristiques de l'équipement
- de son utilisation

Le résultat en est une recommandation offrant trois options possibles :

- préventif recommandé
- préventif possible
- préventif non nécessaire

Cependant, ce résultat doit être complété par une analyse économique portant sur le coût des différentes maintenances et sur le retour sur investissement estimé que peut apporter une maintenance préventive.

Il ne s'agit que d'un outil d'aide à la décision et non pas d'un outil de décision.

Principe

L'abaque de Noiret est basé sur les critères suivants :

- a) l'âge de l'équipement
- b) son interdépendance : dans quelle mesure est-il vital pour la production
- c) son coût
- d) sa complexité et son accessibilité
- e) sa robustesse et sa précision
- f) son origine : Locale ou Etranger
- g) son utilisation dans le temps
- h) les conséquences de ses défaillances sur les produits

i) les délais de production qui lui sont liés

Chaque critère se décline en plusieurs options qui chacune correspond à un certain nombre de points. Les points ainsi obtenus sont additionnés.

Remarque : un seul choix n'est possible par critère ; il faut donc prendre celui qui est le plus représentatif de l'équipement.

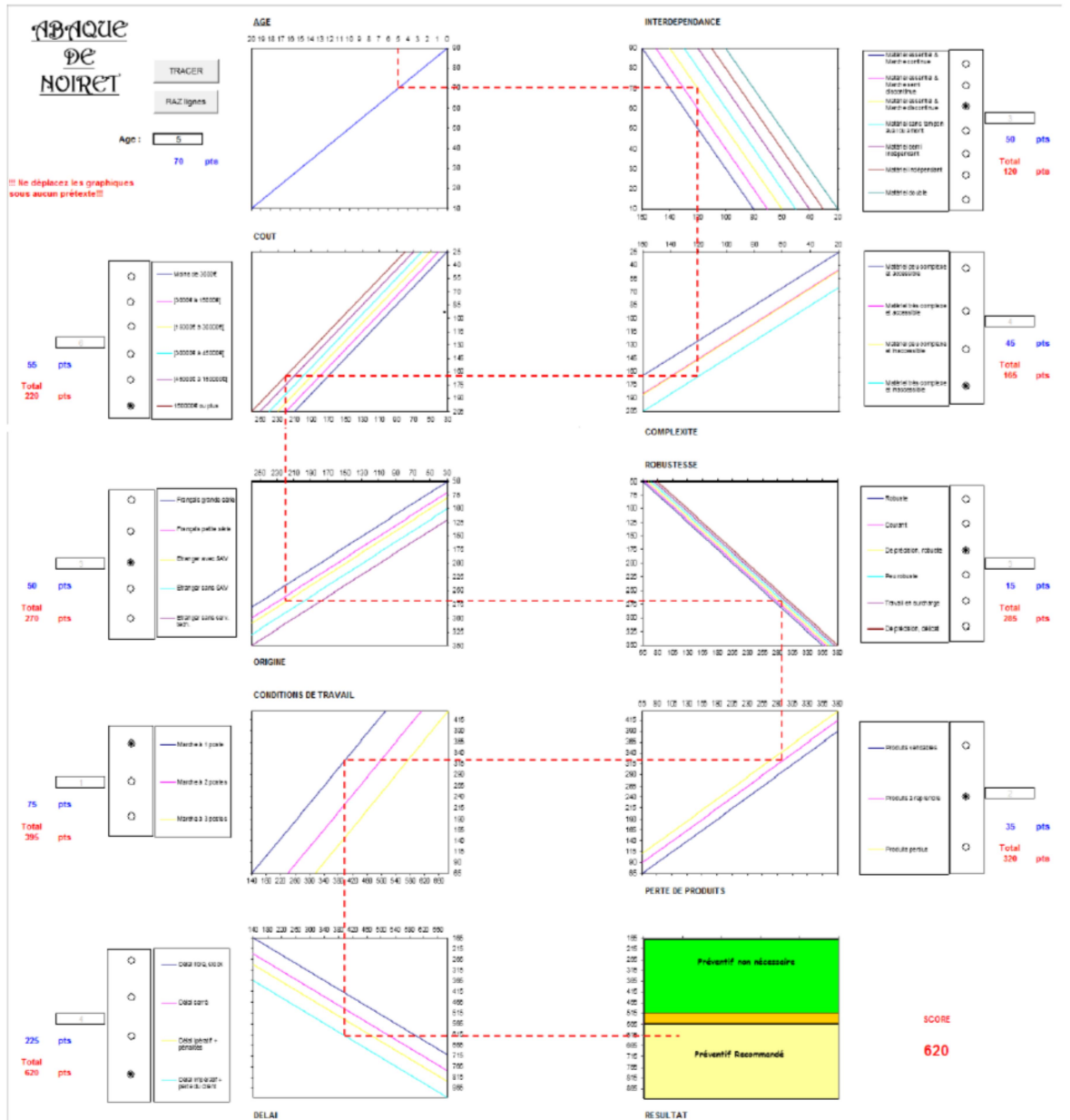


Figure I.9 abaque de Noiret

Désignation critères	NB PTS	COEF	Désignation critères	NB PTS	COEF
LES CONDITIONS DE TRAVAIL			COÛT DU MATERIEL		
- Production continue 3*8	50	5	- Matériel à 1 seule unité ou très spéciale 300000 F	55	1
- Production de jour 2*8	35	5	- Matériel coûteux compris entre 100000 et 300000 F	25	1
- Production en 1 poste 1*8	15	5	- Matériel peu coûteux compris entre 20 000 et 100000 F	15	1
DELAIS D'EXECUTION			- Matériel pas coûteux : à 20000 F	5	1
- Délais impératif avec perte de clients	45	5	ORIGINE DU MATERIEL		
- Délai impératif avec paiement d'indemnité	30	5	- Matériel étranger sans ST	45	2
- Délais serrés	20	5	- Matériel étranger avec ST	25	2
- Délais inexistant livraison sur stock	5	5	- Matériel local petite diffusion	20	2
L'AGE DU MATERIEL			- Matériel local grande diffusion	10	2
- Matériel neuf (-1 an)	45	2	ROBUSTESSE DU MATERIEL		
- Matériel jeune (1à 5 ans)	30	2	- Matériel de grande précision et de maniement délicat	30	1
- Matériel âgé (5à 10 ans)	20	2	- Matériel travaillant en surcharge	30	1
- Matériel démodé (10 ans)	5	2	- Matériel peu robuste	25	1
INTERDEPENDANCE DU MATERIEL			- Matériel de précision robuste	10	1
- Matériel d'infrastructure à marche continue	35	2	- Matériel robuste	5	1
- Matériel d'infrastructure à marche discontinue	25	2	PERTE DE PRODUIT		
- Matériel sans tampon amont ou aval	25	2	- Produits perdus non commercialisables (ferrailles)	55	1
- Matériel indépendant	10	2	- Pièces à reprendre	35	1
- Matériel double	5	2	- Pièces commercialisables sans reprises	10	1
COMPLEXITE DU MATERIEL					
- Très complexe et inaccessible	45	1			
- Peu complexe et inaccessible	25	1			
- Très complexe et accessible	25	1			
- Peu complexe et accessible	5	1			

Tableau 3: Tableau a coefficient

A) l'âge de l'équipement

Age (ans)	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Points	10	14	18	22	26	30	34	38	42	46	50	54	58	62	66	70	74	78	82	86	90

Tableau 4 : nombre de points correspondant à l'âge de l'équipement

Formule de calcul : Points = 90 – âge*4

0 ans = moins d'un an.

B) Interdépendance

Critère	Points
Matériel essentiel et marche continue	70
Matériel essentiel et marche semi discontinue	60
Matériel essentiel et marche discontinue	50
Matériel sans tampon aval ou amont	40
Matériel semi indépendant	30
Matériel indépendant	20
Matériel double (ou plus)	10

Tableau 5 Nombre de point correspondant à l'importance de l'équipement.

C) Coût

Critère en € Points	Critère en € Points
Moins de 3000	5
[3000 à 15000[15
[15000 à 30000[25
[30000 à 45000[35
[45000 à 150000[45
150000 ou plus	55

Tableau 6 : Nombre de points correspondant au cout de l'équipement.

D) Complexité et accessibilité

Critère Points	Critère Points
Matériel peu complexe et accessible	5
Matériel très complexe et accessible	25
Matériel peu complexe et inaccessible	25
Matériel très complexe et inaccessible	45

Tableau 7: Nombre de points correspondant à la complexité et l'accessibilité de l'équipement.

E) Robustesse et sa précision

Critère Points	Critère Points
Robuste	5
Courant	10
Robuste et de précision	15
Peu robuste (délicat)	20
Travail en surcharge	25
Délicat et de précision	30

Tableau 8 : Nombre de points correspondant à la robustesse et la précision de l'équipement.

F) Origine

Critère points	Points
Algérienne de grande série	20
Algérienne de petite série	40
Etrangère avec service après vente en Alegria	50
Etrangère sans service après vente en Alegria	70
Etrangère sans service technique	90

Tableau 9: Nombre de points correspondant à l'origine de l'équipement.

G) Utilisation

Critère Points	Critère Points
Marche à 1 poste de travail	75
Marche à 2 postes de travail	175
Marche à 3 postes de travail	250

Tableau 10: Nombre de points correspondant à l'utilisation de l'équipement dans le temps.

H) Perte de produits

Critère Points	Critère Points
Produits vendables	10
Produits à reprendre	35
Produits perdus	55

Tableau 11: Nombre de points correspondant aux conséquences des défaillances sur la machine.

I) Délais

Critère Points	Critère Points
Délai libre (constitution de stock)	25
Délai serré	100
Délai impératif (risque de pénalités de retard)	150
Délai impératif (risque de pénalités de perte client)	225

Tableau 12 : Nombre de points correspondant aux délais de production qui lui sont liés.

I.4 .Analyse qualitative des défaillances :

I.4.1.Diagnostic et expertise

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

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

I.4.2. Conduite d'un diagnostic

Elle nécessite un grand nombre d'informations recueillies :

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

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

a- Manifestation de la défaillance :

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

b- Les symptômes :

Les symptômes peuvent être observés in situ, sans démontage, par les utilisateurs de l'équipement ou par le maintenancier : VTOAG, mesures, défauts de qualité. Le VTOAG est l'utilisation naturelle des cinq sens de l'individu. Il ne faut jamais les négliger, car ils sont capables de contribuer à l'établissement d'un diagnostic.

*** La vue (V) :**

- Détection de fissures, fuites, déconnexions,
- Détection de dégradations mécaniques.

*** Le toucher (T) :**

- Sensation de chaleur, de vibration,
- Estimation d'un état de surface.

*** L'odorat (O) :**

- Détection de la présence de produits particuliers,
- «Odeur de brûlé», embrayage chaud,...

*** L'auditif (A) :**

- Détection de bruits caractéristiques (frottements, sifflements).

*** Le goût (G) :**

- Identification d'un produit (fuite).

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

c- Expérience :

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

sur un matériel. Par exemple, sur un SAP (Système Automatisé de Production), on sait que c'est la partie opérative qui occasionnera le plus de pannes (figure I.4). Il est donc inutile de commencer son investigation par l'API !

d- Savoir-faire :

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

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

I.4.3. Diagramme Cause-Effets

Cet outil a été créé par Ishikawa, professeur à l'Université de la TOKYO dans les années 60 et concepteur d'une méthode de management de la qualité totale. Le diagramme causes-effet est une représentation graphique du classement par familles de toutes les causes possibles pouvant influencer un processus. Ces familles de causes au nombre de 5 engendrent la non qualité dans un processus de fabrication. Leur nom commence par la lettre M d'où l'appellation 5M. Ishikawa a proposé une représentation graphique en « arête de poisson » (figure I.10).

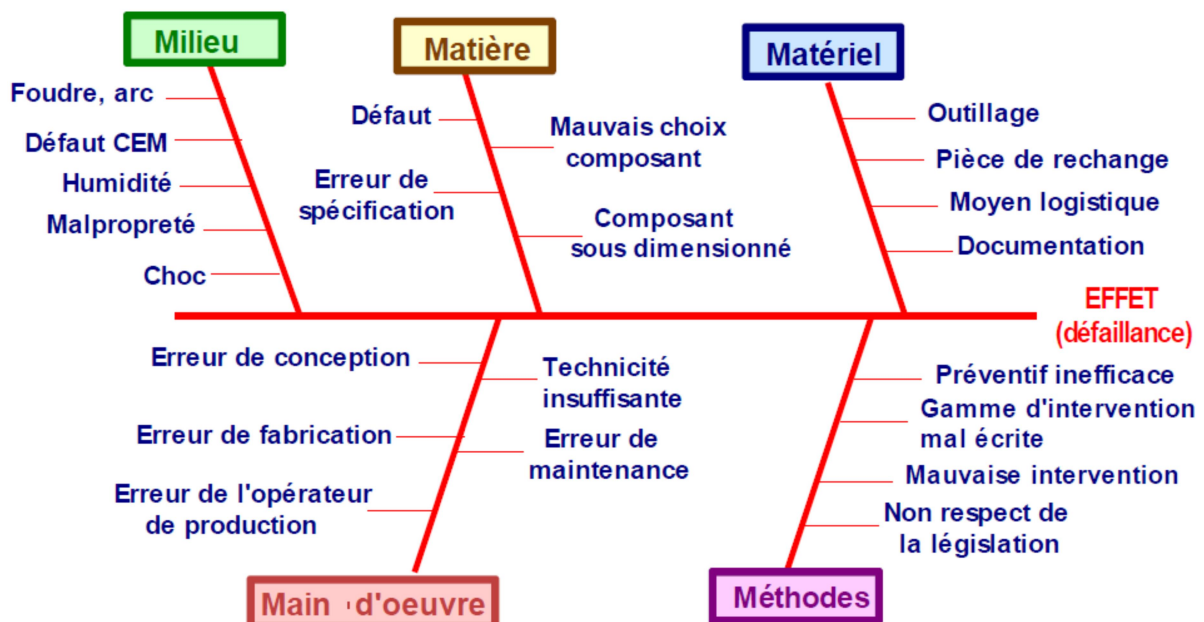


Figure I.10. Diagramme d'Ishikawa

Le diagramme Causes-Effet est donc l'image des causes identifiées d'un dysfonctionnement potentiel pouvant survenir sur un système. Il se veut le plus exhaustif possible en représentant

toutes les causes qui peuvent avoir une influence sur la sûreté de fonctionnement. Les 5 grandes familles ou 5 facteurs primaires sont renseignés par des facteurs secondaires et parfois tertiaires; Les différents facteurs doivent être hiérarchisés.

L'intérêt de ce diagramme est son caractère exhaustif. Il peut aussi bien s'appliquer à des systèmes existants (évaluation) qu'à des systèmes en cours d'élaboration (validation). On pourra adjoindre au diagramme précédent des facteurs secondaires et tertiaires qui compléteront les facteurs primaires :

On peut adapter cet outil à l'aide au diagnostic de la manière suivante :

- Définition de l'effet étudié en regroupant le maximum de données.
- Recensement de toutes les causes possibles ; le brainstorming¹ est un outil efficace pour cette phase de recherche.
- Classement typologique des causes.
- Hiérarchisation des causes dans chaque famille par ordre d'importance.

I.4.3. Arbre de défaillances

C'est un diagramme déductif qui va de l'effet vers la cause et qui a pour objet de rechercher toutes les combinaisons de défaillances élémentaires (primaires) pouvant déboucher vers une panne.

a- Symbolisme :

Cet outil utilise un symbolisme qu'on utilise également sur les circuits logiques. On parle aussi de logigramme de dépannage. Ce symbolisme est donné à la figure I.11.

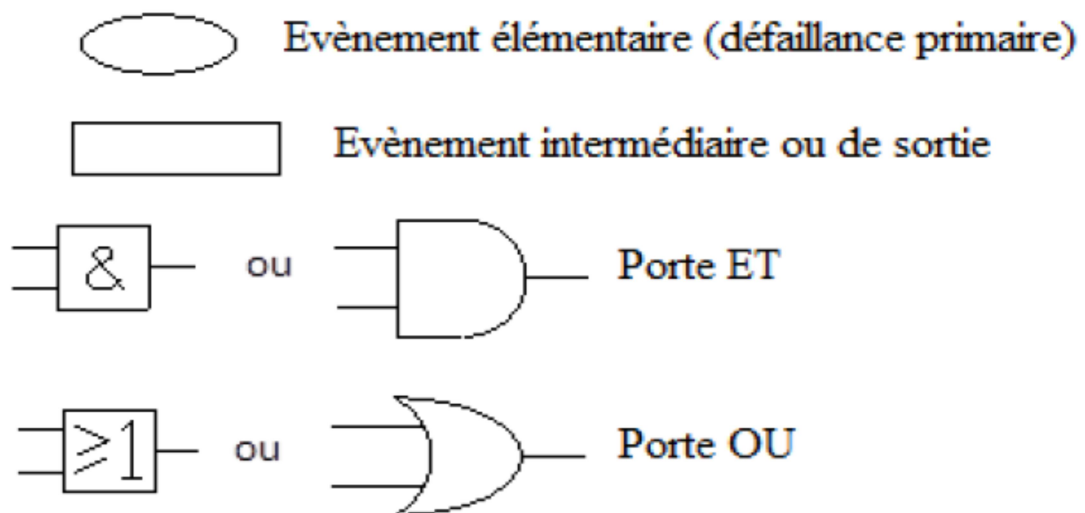


Figure I.11. Symbolisme des arbres de défaillances

b- Construction de l'arbre de défaillances :

Pour construire un arbre de défaillance, on peut utiliser l'organigramme de la figure I.12. Notons que cette construction est tout à fait qualitative.

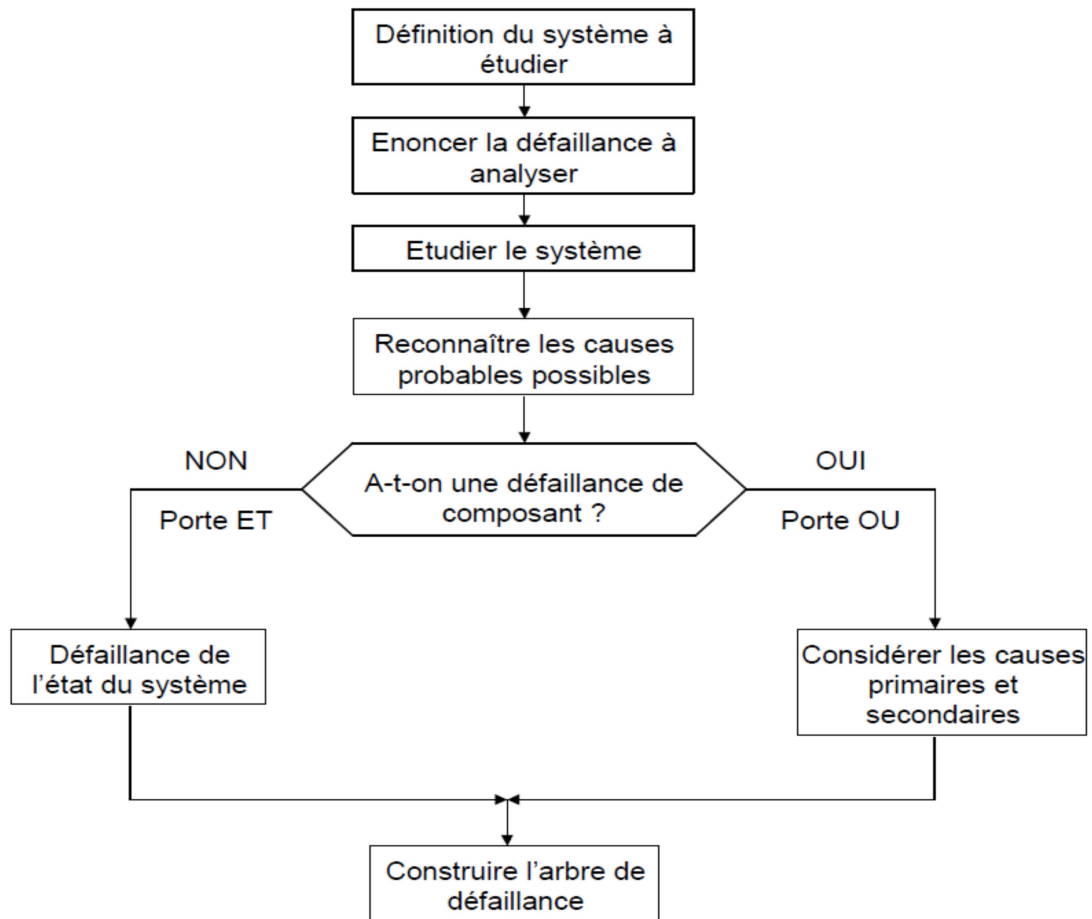
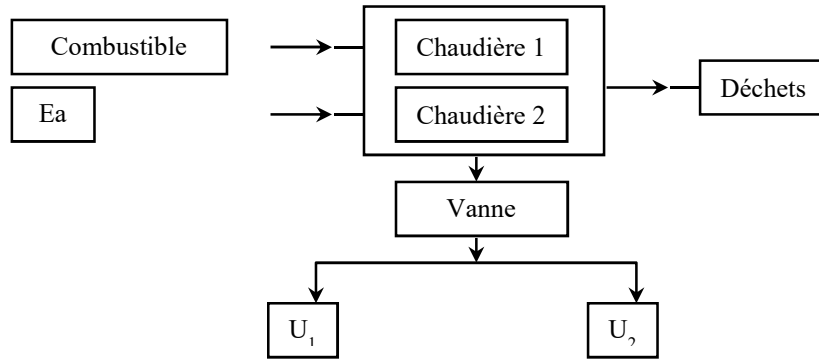


Figure I.12. Construction de l'arbre de défaillance.

Exemple:

- ❑ Le schéma de principe d'une unité de production de vapeur (UPV) est donné figure suivante.
- ❑ L'UPV comporte deux chaudières alimentées en combustible et en eau. Elle possède également un système de rejet des produits de combustion permettant de respecter l'environnement. La vapeur produite par les deux chaudières alimente deux utilisateurs, U1 et U2.
- ❑ On définit deux niveaux de performance :
 - Niveau de performance 1 : avec deux chaudières en fonctionnement nominal, les deux utilisateurs U1 et U2 sont alimentés.
 - Niveau de performance 2 : si une seule des deux chaudières fonctionne, seul l'utilisateur U1 est alimenté. En effet, cet utilisateur est considéré prioritaire, et en cas de défaillance d'une chaudière, l'utilisateur U2 est délesté (déconnecté du réseau de distribution) en faveur de l'utilisateur U1.



L'évènement redouté: " Non alimentation utilisateur U1".

Chapitre N°02: Techniques de Surveillances

I. Surveillance des équipements

La surveillance des matériels permet de diminuer le niveau de maintenance systématique sans prendre de risque supplémentaire car on continue à s'assurer que le matériel ne présente pas d'anomalie. On peut donc diminuer les coûts, si toutefois le coût du matériel de surveillance reste limité.

Elle s'intègre dans la politique de maintenance prédictive et doit assurer :

- **la prévention** des risques majeurs (arrêt des machines) lorsque les conditions de sécurité (pour l'homme ou pour la machine) ne sont pas satisfaites ;
- **la détection** précoce des anomalies, pour éviter au maximum les avaries en remplaçant les composants défectueux si possible avant incident et au meilleur moment ;
- **l'analyse après incident**, pour remédier aux défauts constatés, et éviter de les retrouver à l'avenir, ou définir les modifications nécessaires. Le niveau de performance initial, quel que soit le paramètre surveillé, s'appelle aussi « **signature** » de l'équipement : c'est la référence de bon fonctionnement de celui-ci pour le point sensible surveillé. Les mesures peuvent être :
 - visuelles (examen de l'usure par la mesure d'une cote, observation d'un jeu mécanique, d'une courroie détendue, etc..),
 - réalisées à partir d'appareils de mesures (voltmètre, oscilloscope, analyseur de spectre, radiographie, comptage de particules, etc..),
 - visualisables grâce à des capteurs pré-réglés (témoin de plaquette de frein sur une voiture, témoin de température, etc..).

I.1. Méthodes de surveillance

I.1.1 La surveillance périodique (Systématique)

Le suivi périodique (offline) de l'évolution des paramètres, (vibration, analyse de lubrifiant, etc.), permet de détecter l'apparition de défauts à évolutions lente.

La périodicité des prélèvements des indicateurs est variable, elle varie entre deux semaines et six mois suivant la vitalité et le coût des machines en cause. La fréquence peut être accélérée si les symptômes précoces le justifient.

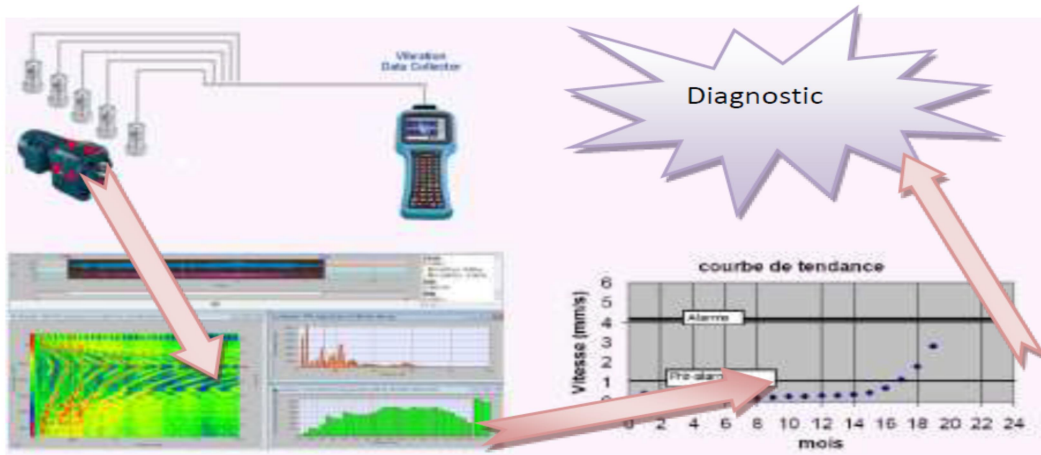


Figure II.1 : Surveillance offline

I.1.1 La surveillance continue

Le suivi continu (on-line), comme le précédent, permet de suivre l'évolution de l'ensemble des paramètres; il présente, en plus, l'avantage de détecter des défauts à évolution rapide et d'assurer la sécurité des installations par déclenchement de la machine à l'approche d'un seuil réputé dangereux.

Les capteurs délivrent de manière continue une information, donc dans ce cas l'intervalle de temps d'acquisition tend vers zéro. A la limite, on est capable de suivre sur écran ou sur traceur la loi de dégradation du matériel.

La surveillance continue permet donc de suivre des défauts à évolution rapide. L'intervention préventive est alors signalée par une alarme. Cette alarme peut interrompre l'équipement si nécessaire (pour cause de sécurité par exemple). C'est certainement la forme la plus moderne de la maintenance. On y retrouve bien sûr, l'aspect maintenance conditionnelle et aussi la notion de surveillance auxquels on va associer le pouvoir de décision et d'ordonnancement.

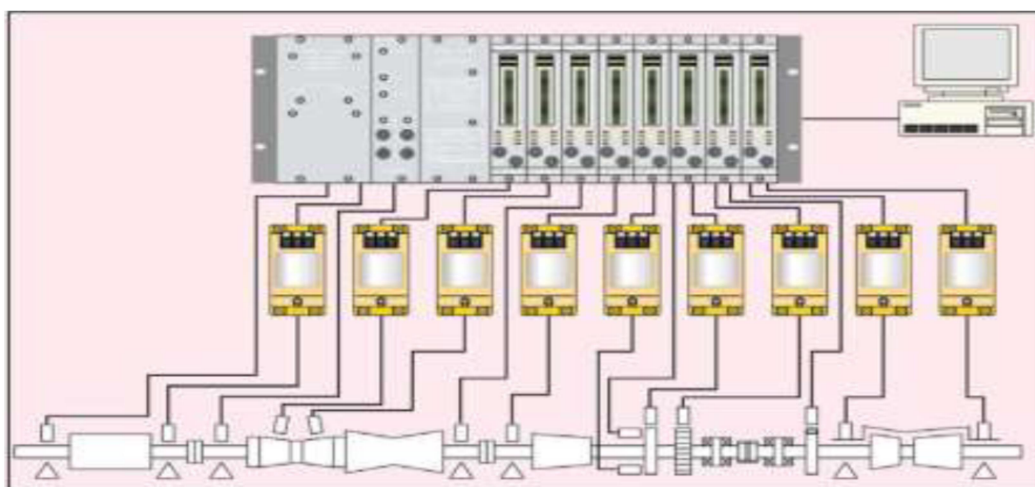


Figure II.2 : Surveillance on-line

Les défaillances de type explosif qui se manifeste soudain (perte brutale d'aubages de turbine, éclatement d'un flexible) ne sont pas détectables de manière précoce.

I.2. Indicateurs de surveillance

Les indicateurs de surveillance sont des quantificateurs plus ou moins élaborés, issus d'une grandeur physique. Leurs acquisitions sont souvent possibles en fonctionnement. Ils doivent caractériser un ou plusieurs aspects de l'état de l'équipement ou de sa performance. Leurs évolutions ou transformations dans le temps doivent être significatives de l'apparition ou de l'aggravation d'une dégradation ou d'un dysfonctionnement tel que :

- La température d'un palier.
- Le taux de concentration dans le lubrifiant de particules métalliques.
- Le bruit et les vibrations générées par son fonctionnement.
- Le rendement mécanique ou thermodynamique d'une machine.
- L'amplitude de variation de vitesse de rotation instantanée.
- Le taux de rebuts de fabrication...

I.3. Notion de seuils

A chaque indicateur est associé un seuil dont la valeur dépend :

- De la nature des défauts associés
- Du type de la machine surveillée
- Des conditions de fonctionnement

Tant que la valeur d'un indicateur n'excède pas une valeur prédéfinie ou un seuil, l'installation est considérée en bon état. Aucune investigation complémentaire, arrêt pour inspection ou intervention corrective n'est à envisager. Le choix de la valeur du seuil est donc un acte fondamental:

- Une valeur trop basse entraîne des alarmes non justifiées ; Surveillance et Maintenance prédictive
- Une valeur trop élevée rend la détection précoce d'un défaut impossible et une panne peut se produire sans la moindre alarme préalable.

Les systèmes de surveillance offrent souvent au moins deux seuils :

- Le seuil d'alarme dont le dépassement doit déclencher une procédure de diagnostic afin de localiser, voire déterminer l'origine exacte de l'anomalie.
- Le seuil de danger dont le dépassement nécessite un diagnostic immédiat et souvent l'arrêt immédiat de l'installation, il s'agit alors d'une action de mise en sécurité de l'installation.

II. Techniques de surveillance

II.1. Analyse vibratoire

L'analyse vibratoire permettra de mettre en évidence un grand nombre de problèmes entraînant une diminution de la durée de vie des éléments de la machine. Les défauts détectés par analyse vibratoire sont :

- ❖ résonance de structure,
- ❖ jeu de palier,
- ❖ balourd ou déséquilibre de masse,
- ❖ mauvaise fixation,
- ❖ défauts de roulements,
- ❖ distorsion ou tension trop élevée des courroies,
- ❖ mauvais alignement d'une ligne d'arbre,
- ❖ défauts d'engrenage....

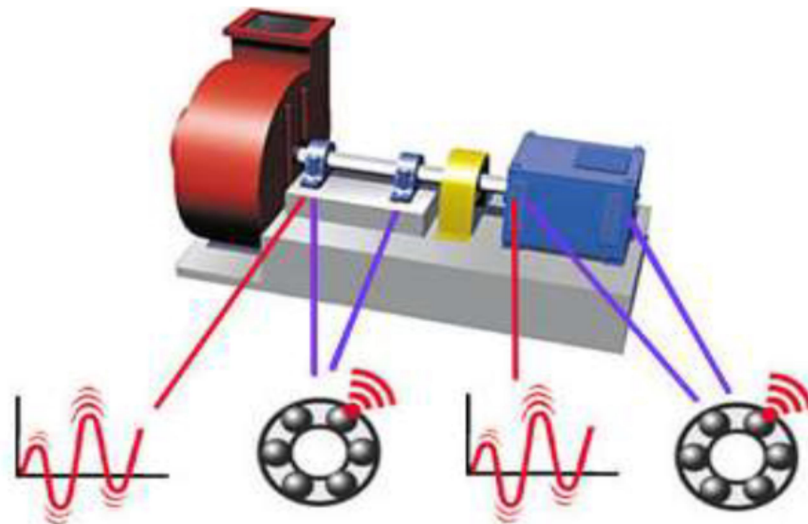


Figure II.3 : Sources de vibration

II.2 Thermographie infrarouge

On peut procéder à la mesure de la température grâce aux techniques de thermographie infrarouge. Ces techniques permettent de mesurer les luminances, d'établir une cartographie (zones isothermes) et de suivre son évolution dans le temps. En maintenance, il ne s'agit pas de connaître avec la plus grande précision la température absolue d'un point, mais plutôt d'identifier les zones thermiques anormales et de quantifier l'urgence d'intervention.

Exemples d'utilisation :

- ❑ détection des points chauds dans les équipements électriques (conducteurs sous-dimensionnés, cosses mal vissées, etc..) ou mécaniques (dégradation d'un palier),
- ❑ détection des ponts thermiques et donc d'absence d'isolation thermique pouvant être néfaste au composants électroniques sensibles voisin,
- ❑ détection des fuites thermiques dans les fours, canalisations, etc...

La thermographie infrarouge est coûteuse, mais c'est un outil très polyvalent.

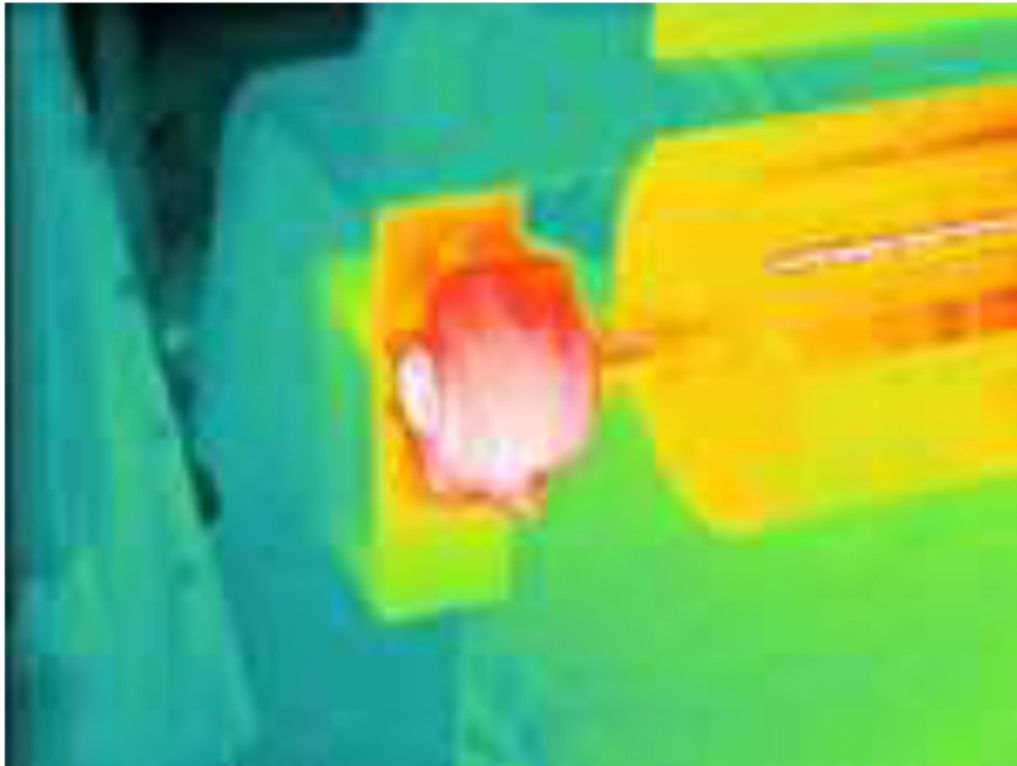


Figure II.4 : Défaut sur un palier

II.3 Mesure ultrasonore

Certains instruments ultrasonores sont sensibles à la détection d'émissions sonores de très hautes fréquences comprises entre 20 kHz et 100 kHz. Cette large bande de détection accroît la pertinence du diagnostic.

Les signaux sont alors transformés par hétérodynage en fréquences audibles.

La technique consiste à émettre une onde ultrasonore et à mesurer le temps de réception des échos de l'onde à l'aide d'un capteur piézoélectrique.

Les Ultrasons dit "classiques" permettant de déceler des indications au cœur de la matière en utilisant des traducteurs de type Ondes longitudinales ou à Ondes transversales.

Les mesures d'épaisseurs permettent de vérifier l'usure et l'épaisseur restante d'un matériel. (en établissant si besoin, une cartographie des zones examinées et d'étudier son évolution dans le temps).

II.4 Analyse des huiles

La surveillance des lubrifiants industriels consiste à mesurer l'état de dégradation et de contamination des lubrifiants pour connaître leur capacité à assurer correctement leur fonction. La mesure de la teneur en résidus des huiles et lubrifiants est utilisée comme un bon indicateur des défauts d'usure dans les systèmes mécaniques. Les facteurs responsables de dégradation d'un lubrifiant sont :

- la pollution par des liquides (eau, solvants),
- la pollution par des particules (poussières, matériaux plastiques, fibres, etc..) causée par le processus lui-même et son environnement,
- les particules métalliques dues à l'usure ou la corrosion provenant des composants parcourus par le lubrifiant,
- l'oxydation, en présence d'air ou d'atmosphère corrosive, surtout lorsque les variations de température sont importantes.

La quantité de particules est un indicateur précieux de l'état de dégradation d'une machine.

Le type de particules indique en effet la provenance de l'usure, donc la pièce défaillante. Ces analyses peuvent être réalisées en laboratoire grâce à des kits spécifiques d'analyse : centrifugation, gravimétrie, filtration, etc. Ce type d'analyse est parfaitement adapté au contrôle des circuits hydrauliques (presses, robots, etc..) et toutes les machines utilisant l'huile comme lubrifiant (groupe électrogène, compresseur d'air, etc..).

II.5. Analyse du bruit

Le changement de bruit est souvent un phénomène créé par une défaillance et la mesure du bruit des machines par mesure des vibrations [ISO 7849 (1987)] peut être un indice de défektivité. Le stéthoscope, qui comprend un casque et une sonde, est un instrument qui permet par contact de détecter les composants défectueux par l'écoute des bruits de la machine, pour des fréquences variant entre 30 et 15 000 Hz.

La technique consiste à comparer subjectivement les bruits avec des bruits de référence déjà préenregistrés.

III. Analyse prévisionnelle des défaillances : (AMDEC)

(Analyse des Modes de Défaillances de leur effet et de leur Criticité)

III-1 Définition :

L'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) est une méthode d'analyse préventive de la sûreté de fonctionnement des produits et des équipements. Ce principe de la prévention repose sur le recensement systématique et l'évaluation des risques potentiels d'erreurs susceptibles de se produire à toutes les phases de réalisation d'un produit. C'est une méthode précieuse qui permet à l'entreprise de valider, tout au long de la construction du produit, sa qualité et sa fiabilité :

- Elle identifie les modes de défaillance des composants, en évalue les effets sur l'ensemble des fonctions et en analyse les causes.
- Elle évalue l'impact, ou criticité, de ces modes de défaillances sur la sûreté de fonctionnement.
- En phase de conception, elle est associée à l'Analyse Fonctionnelle, pour la recherche des modes de défaillances spécifiques à chaque fonction ou contrainte des composants.
- Dans le cas d'analyse sur des procédures ou chaînes de fabrication, elle permet de localiser les opérations pouvant conduire à élaborer un produit ne respectant pas le cahier des charges, ce qui permettra par la suite de limiter les rebuts.
- Appliquée à un groupe de travail pluridisciplinaire, elle est recommandée pour la résolution de problèmes mineurs dont on veut identifier les causes et les effets ; elle contribue donc à la construction et à l'amélioration de la qualité.

Il existe plusieurs types d'AMDEC dont les deux suivantes :

- **AMDEC machine** (ou moyen de production) : on identifie les défaillances du moyen de production dont les effets agissent directement sur la productivité de l'entreprise. Il s'agit donc de l'analyse des pannes et de l'optimisation de la maintenance.
- **AMDEC procédé** : on identifie les défaillances du procédé de fabrication dont les effets agissent directement sur la qualité du produit fabriqué (les pannes ne sont pas prises en compte).

III.2 Historique :

Elle trouve son origine dans les années 1950, sous le nom de FMEA (Failures Modes and Effects Analysis). Utilisée exclusivement aux USA et au Japon pour améliorer la fiabilité des

produits de haute technicité (armement, avionique, spatial), elle fait son apparition en Europe en 1970 dans l'industrie nucléaire (du militaire vers le civil).

Le grand essor de l'AMDEC est dû à sa mise en œuvre généralisée dans l'industrie automobile (à partir de 1979 chez Ford et 1982 chez les constructeurs français) ; tous les sous traitants ont dû suivre. Conformément au QS 9000 (équivalent de l'ISO 9000 pour l'automobile), les fournisseurs automobiles devaient utiliser la planification qualité du procédé (APQP), incluant l'outil AMDEC et développant les plans de contrôle. Les industries électroniques, puis les industries mécaniques se sont inscrites ensuite dans cette démarche (apparition de la notion de sécurité des biens et des personnes).

III.3 Démarche de la méthode AMDEC :

L'AMDEC est une technique d'analyse exhaustive et rigoureuse de travail en groupe : chacun y met en commun son expérience et sa compétence. Mais, pour la réussir, il faut bien connaître le fonctionnement du système qui est analysé ou avoir les moyens de se procurer l'information auprès de ceux qui la détiennent. Elle comporte cinq étapes :

- Etape 1 : préparer l'étude.
- Etape 2 : réaliser l'analyse fonctionnelle.
- Etape 3 : réaliser l'analyse qualitative des défaillances.
- Etape 4 : évaluer la criticité.
- Etape 5 : définir et suivre un plan d'actions correctives et préventives.

a- Etape 1 : Préparation de l'étude

Lors de la première étape de préparation, il faudra d'abord valider l'objectif de l'étude : pourquoi effectue-t-on cette étude ? L'objectif va dépendre du contexte de l'étude :

- Amélioration de la fiabilité du produit,
- Amélioration de la disponibilité du moyen de production,
- Amélioration de la disponibilité du service.

On commence tout d'abord par constituer le groupe de travail. L'AMDEC fait appel à l'expérience, pour rassembler toutes les informations que détiennent les uns et les autres, mais aussi pour faire évoluer les conclusions que chacun en tire et éviter que tous restent sur leur a priori. Les méthodes de travail en groupe doivent être connues et pratiquées afin d'assurer une efficacité optimale en groupe. C'est un critère de réussite essentiel.

A – Les acteurs de la méthode

1. Le demandeur (ou pilote) : c'est la personne ou le service qui prend l'initiative de déclencher l'étude. Il est responsable de celle-ci jusqu'à son aboutissement. Il en définit le

sujet, les critères et les objectifs. Il ne doit pas être le concepteur pour garantir l'indépendance des jugements.

2. Le décideur : c'est la personne responsable dans l'entreprise du sujet étudié, et qui, en dernier recours et à défaut de consensus, exerce le choix définitif. Il est responsable et décideur des coûts, de la qualité et des délais.

3. L'animateur : c'est le garant de la méthode, l'organisateur de la vie du groupe. Il précise l'ordre du jour des réunions, conduit les réunions, assure le secrétariat, assure le suivi de l'étude. Très souvent, c'est un intervenant extérieur, ou du moins extérieur au service de façon à pouvoir jouer les candides.

4. Le groupe de travail : 2 à 5 personnes en général, responsables et compétentes, ayant la connaissance du système à étudier et pouvant apporter les informations nécessaires à l'analyse (on ne peut bien parler que de ce que l'on connaît bien).

Selon l'étude (produit, procédé ou moyen de production), ce seront des représentants du design, du marketing, du bureau d'études, du service qualité, du service achat, de la production, de la maintenance ou des experts du domaine étudié.

B - Planification des réunions

Comme il est difficile de réunir 5 à 8 personnes d'un certain niveau (elles sont souvent peu disponibles), on planifie les cinq phases, de la « préparation » jusqu'aux « actions menées » en respectant une fréquence d'une demi-journée tous les 15 jours en général.

C – Limitations de l'étude

Il est nécessaire de limiter le champ et la durée de l'étude. Un champ d'étude trop important conduira à un exercice harassant pour un résultat médiocre. Une durée d'étude de 2 à 3 mois est tout à fait raisonnable.

D – Constitution du dossier AMDEC

Dans cette phase, on effectue la collecte des données nécessaires à l'étude :

- Cahier des charges ou spécifications du produit,
- Plans, nomenclature, gammes de fabrication, spécifications,
- Calculs et leur vérification (chaîne de cotes),
- Contraintes de fabrication,
- Défaillances observées (retours clients, rebut de production),
- Essais de fiabilité, résultats de test,
- Relevés statistiques d'exploitation, historiques des pannes,
- Probabilités de défaillances liées à la technologie,

- Objectifs qualité.

E - Fin de l'étape 1 : fiche de synthèse

Cette fiche (Figure II.5) accompagne l'étude tout au long de sa durée. On y retrouve toute la phase d'initialisation ainsi que le suivi de l'étude. Elle est à remplir par l'animateur lors d'un entretien avec le demandeur et complétée avec le décideur. Son but est de formaliser sur un document les points clés de l'étude AMDEC.

Synthèse d'étude AMDEC				Date :		Nom :		
Raison sociale du client :						Pilote :		
Objectifs :						Décideur :		
Type de fabrication :								
Objectifs de l'étude :				Limites de l'étude				
Causes de l'étude :								
Planning	Prévisionnel						Participants : (nom + téléphone)	
	Semaines							
	Réalisé							
	Légende		Début : I		Réunion : R			Fin : F
		Suivi : S				Animateur :		
B I L A N	Initial		Evolution de la criticité			Observations :		
	Date :		C0	C1	C2			
	Nombre de causes	Total						
		Criticité >limite						
		%						

Figure II.5 : Fiche de synthèse AMDEC

b- Etape 2 : Analyse fonctionnelle

L'objectif final de l'étape 2 est la réalisation d'un dossier complet sur le système étudié. Ce dossier comprend :

- la feuille de synthèse de l'état actuel de l'étude AMDEC,
- ce que l'on connaît sur les fonctions à étudier,
- ce que l'on connaît sur l'environnement du système,
- les objectifs de qualité et de fiabilité (conception), le TRS (en production), etc..
- l'analyse fonctionnelle,
- les historiques (lien GMAO-AMDEC),
- le plan de maintenance préventive,
- le conditionnement du produit (marketing).

c- Etape 3 : Analyse qualitative des modes de défaillance

A partir de l'analyse fonctionnelle, la démarche consiste en :

- Une recherche des modes de défaillance (par exemple perte de fonction, dégradation d'une fonction, pas de fonction, fonction intempestive),

- Une recherche des causes (choix pouvant être guidé par la gravité des conséquences),
- Une étude des effets.

A – Recensement des modes de défaillance

Exemples : perte de fonction, dégradation d'une fonction, pas de fonction, fonction intempestive.

B – Recherche des causes de défaillances

Une cause est l'anomalie initiale pouvant entraîner le mode de défaillance. Dans cette phase, il faut chercher de manière exhaustive les causes pouvant déclencher l'apparition potentielle du mode de défaillance. Le diagramme d'Ishikawa est l'outil de recensement par excellence.

C – Etude des effets

Un effet est une conséquence défavorable que le client pourrait subir (mécontentement, défaut qualité, arrêt de production). Selon le type d'AMDEC réalisée, le client est l'utilisateur final ou toute opération postérieure à celle exécutée au moment de l'apparition de l'effet. Chaque mode de défaillance provoque un effet, c'est à dire qu'il y a une conséquence sur la fonction, le niveau supérieur, sur l'étape suivante ou sur le système environnant. En fait, il est souvent difficile de différencier mode, effet et cause de défaillance. Il vaut mieux raisonner par niveau d'analyse (figure II.6).

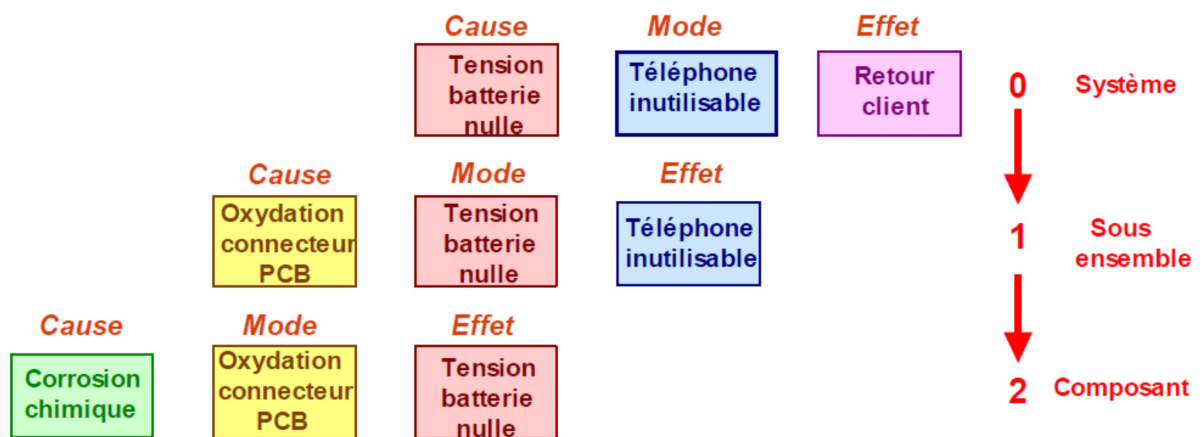


Figure II.6 : Niveaux d'analyse

D – Fin de l'étape 3 : la grille AMDEC

Un des moyens de rassembler les idées du groupe de travail est la grille AMDEC. Elle concrétise l'analyse sous la forme d'un tableau faisant apparaître, pour chaque élément traité, ses modes de défaillance, leurs causes, leurs effets et les moyens de les détecter.

La grille AMDEC typique (Figure II.7) comprend 7 colonnes : le nom de l'élément ou du composant, la fonction, le mode de défaillance, la cause de la défaillance, son effet, sa non-détection, la cotation de la criticité. Elle peut être complétée par une colonne indiquant les actions préventives pouvant être apportées.

On différencie souvent les modes, causes et effets par des couleurs afin de bien les mettre en évidence. L'ordre « mode, cause, effet » est volontaire. Les effets du mode ainsi que la non-détection seront ressentis directement par l'utilisateur. La cotation de la fréquence, de la gravité et de la non-détection va permettre une hiérarchisation des différentes défaillances.

Elément		Défaillances				Criticité				Décisions de maintenance
Désignation	Fonction	Mode de défaillance	Cause de la défaillance	Effet	Détection	F	G	N	I	

Figure II.7: Structure d'une grille AMDEC

d- Etape 4 : Evaluation de la criticité

A – Notion de criticité

La criticité permet de quantifier la notion de risque. Dans une étude AMDEC, elle est évaluée à partir de la fréquence de la défaillance, de sa gravité et de sa probabilité de non détection.

Elle détermine le choix des actions correctives et préventives à entreprendre et fixe la priorité entre ces actions. C'est un critère pour le suivi de la fiabilité prévisionnelle de l'équipement.

La cotation de la criticité permet une hiérarchisation des différentes défaillances et donc de planifier les recherches d'amélioration en commençant par celles qui ont la criticité la plus élevée. On prend alors les décisions qui s'imposent et on met en œuvre ces améliorations.

Un programme de suivi est ensuite nécessaire si l'on veut pouvoir évaluer l'efficacité des améliorations : nouvelle mesure de la criticité et comparaison avec la valeur antérieure.

B – Cotation de la criticité

La cotation s'effectue sur la base de trois critères : la fréquence F d'apparition de la cause de défaillance, la gravité G de ses effets et sa non-détection N.

- Fréquence F d'apparition de la cause de défaillance : La cause de défaillance peut apparaître

à l'utilisation, à la fabrication ou à la conception d'un produit. C'est la probabilité P pour que la cause se produise et qu'elle entraîne le mode de défaillance concerné. On écrit que $P = P1 \times P2$ avec P1 = probabilité que la cause de défaillance survienne et P2 = probabilité que la défaillance survienne lorsque la cause est présente.

- Gravité G des effets de la défaillance : La gravité est une évaluation de l'importance des effets de la défaillance potentielle sur le client. La cause n'a pas d'incidence sur la gravité de la défaillance.

- Non-détection N de la défaillance : Ce critère rend compte de la probabilité qu'a la défaillance de ne pas être détectée par l'utilisateur lors de contrôles (lors de la conception d'un produit, de sa fabrication ou de son exploitation) alors que la cause et le mode sont apparus.

*** Cotation des critères :**

Pour évaluer ces trois critères, on utilise des grilles de cotation qui peuvent être définies par l'entreprise ou alors reprises dans certains ouvrages spécialisés (Figure II.8).

*** Expression de la criticité**

On obtient la criticité C par la formule :

$$C = G \times F \times N$$

Fréquence d'apparition F

F	Défaillance	Probabilité
1	Probabilité très faible : Défaillance inexistante sur équipement analogue Capabilité CP > 1,67	$\frac{1}{20000} < P < \frac{1}{10000}$
2	Probabilité faible : Très peu de défaillances sur équipement analogue ou sous contrôle statistique - Capabilité 1,33 < CP < 1,67	$\frac{1}{2000} < P < \frac{1}{1000}$
3	Probabilité modérée : Défaillances apparues occasionnellement sur équipement analogue - Capabilité 1 < CP < 1,33	$\frac{1}{500} < P < \frac{1}{200}$
4	Probabilité élevée : Défaillances fréquentes sur équipement analogue Capabilité 0,83 < CP < 1	$\frac{1}{100} < P < \frac{1}{50}$
5	Probabilité très élevée : Il est certain que la défaillance se produira fréquemment.	$\frac{1}{20} < P < \frac{1}{10}$

Gravité des effets

G	Client final ou atelier aval
1	Défaillance minimale – Le client ne s'en aperçoit pas – Aucune influence sur les opérations suivantes
2	Défaillance mineure que le client peut déceler, ne provoquant qu'une gêne légère et aucune dégradation ou perturbation notable des performances du produit ou du système
3	Défaillance avec signe avant-coureur qui mécontente le client ou le met mal à l'aise – Légère perturbation des flux de production
4	Défaillance sans signe avant-coureur provoquant un grand mécontentement du client et/ou des frais de réparation élevés – Perturbation importante du flux de production – Rebuts ou retouches importantes
5	Défaillance sans signe avant-coureur impliquant des problèmes de sécurité – Arrêt du processus de fabrication

Non détection des défaillances

F	Risque de laisser passer une défaillance	Probabilité
1	Probabilité très faible de ne pas détecter la défaillance avant que le produit ne quitte l'opération concernée – Contrôle automatique des pièces à 100%	$\frac{1}{20000} < P < \frac{1}{10000}$
2	Probabilité faible de ne pas détecter la défaillance – La défaillance est évidente, quelques défaillances échapperont à la détection (contrôle unitaire)	$\frac{1}{2000} < P < \frac{1}{1000}$
3	Probabilité modérée – Contrôle manuel difficile	$\frac{1}{500} < P < \frac{1}{200}$
4	Probabilité élevée – Le contrôle est subjectif – Echantillonnage mal adapté	$\frac{1}{100} < P < \frac{1}{50}$
5	Probabilité très élevée – La défaillance n'est pas apparente – Pas de contrôle possible	$\frac{1}{20} < P < \frac{1}{10}$

Figure II.8: Grille de cotation

e- Etape 5 : Définir et suivre un plan d'action préventive

Dans ce plan d'action vont figurer les actions préventives à mener pour diminuer le coefficient de criticité. Une diminution de la criticité pourra être obtenue en jouant sur un (ou plusieurs) terme(s) du produit (F x G x N).

Les actions seront d'ordre préventif ou correctif selon le cas. Elles visent à supprimer les causes de défaillance. L'essentiel de l'action doit porter sur la prévention d'une part et la diminution de la fréquence d'autre part. Pour suivre la mise en place des actions, on utilise un tableau AMDEC appelé aussi fiche de synthèse de l'AMDEC (Figure II.5). Après la mise en place des actions, on évaluera la nouvelle criticité des défaillances. Si la criticité n'est toujours pas satisfaisante, on définira d'autres actions préventives.

3-4/ Apports et limites de l'AMDEC :

a- Apports :

A - Les apports indirects :

1. Augmentation du rendement.
2. Centralisation de la documentation technique.
3. Mise en place de fiches de suivi des visites de l'exploitant.

B - Impact sur la maintenance

1. Optimisation des couples Causes/Conséquences.
2. Amélioration de la surveillance et des tests.
3. Optimisation de la maintenance.

C - Impact sur la qualité

1. Meilleure adéquation matériel/fonctionnel.
2. Meilleure efficacité en développement/fabrication.
3. Meilleure efficacité en utilisation.

b- Quelques erreurs à éviter :

- Animateur du groupe de travail non compétent.
- Groupe de travail trop important.
- Se focaliser sur une défaillance externe à l'étude (sujet mal défini).
- Confondre AMDEC Moyen de production avec AMDEC Procédé.
- Oublier le client.

c- Les limites de la méthode AMDEC :

Bien que d'un usage généralisé, il serait inexact de prétendre que l'AMDEC est un outil universel. En fait l'AMDEC présente quelques limitations :

- Elle est tributaire d'une bonne analyse fonctionnelle ;
- Elle impose des travaux et une méthodologie demandant une préparation, une rigueur et parfois des moyens importants pour l'entreprise.
- Même si sa vocation est le traitement préventif des défaillances, elle doit s'appuyer sur un savoir-faire existant dans l'entreprise et à partir duquel le groupe de travail peut extrapoler ses recherches.

IV Surveillance par l'analyse vibratoire

IV.1. Principe

Cette méthode s'applique à tous les matériaux. Elle consiste à analyser en fonction du temps les oscillations mécaniques d'un système autour d'une position de référence au moyen d'un ou de plusieurs capteurs. Les oscillations ou vibrations mécaniques sont produites soit par le système en fonctionnement (un moteur par exemple) soit sont induites par des sollicitations externes (par impact ou en sollicitation forcée).

IV.2. Les vibrations

Le suivi des paramètres vibratoires est particulièrement bien adapté aux machines tournantes. L'analyse vibratoire fournit un nombre important de renseignements sur l'état de l'équipement.

Avantages de la méthode

- Détection de défauts à un stade précoce
- Possibilité de réaliser un diagnostic approfondi
- Autorise une surveillance continue
- Permet de surveiller l'équipement à distance

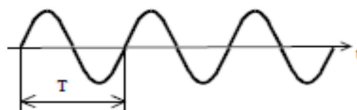
Inconvénients

- Spectres parfois difficiles à interpréter
- Dans le cas de surveillance continue, installations relativement coûteuses

Une vibration correspond à des variations périodiques d'un milieu matériel (gazeux, liquide ou solide) qui se transmettent de proche en proche. On parle souvent de son lorsque la vibration a lieu dans l'air alors que dans un milieu solide, on parle simplement de vibration.

Une onde sonore est caractérisée par une fréquence f (en Hz) et une période T (en s).

$$T = \frac{1}{f}$$



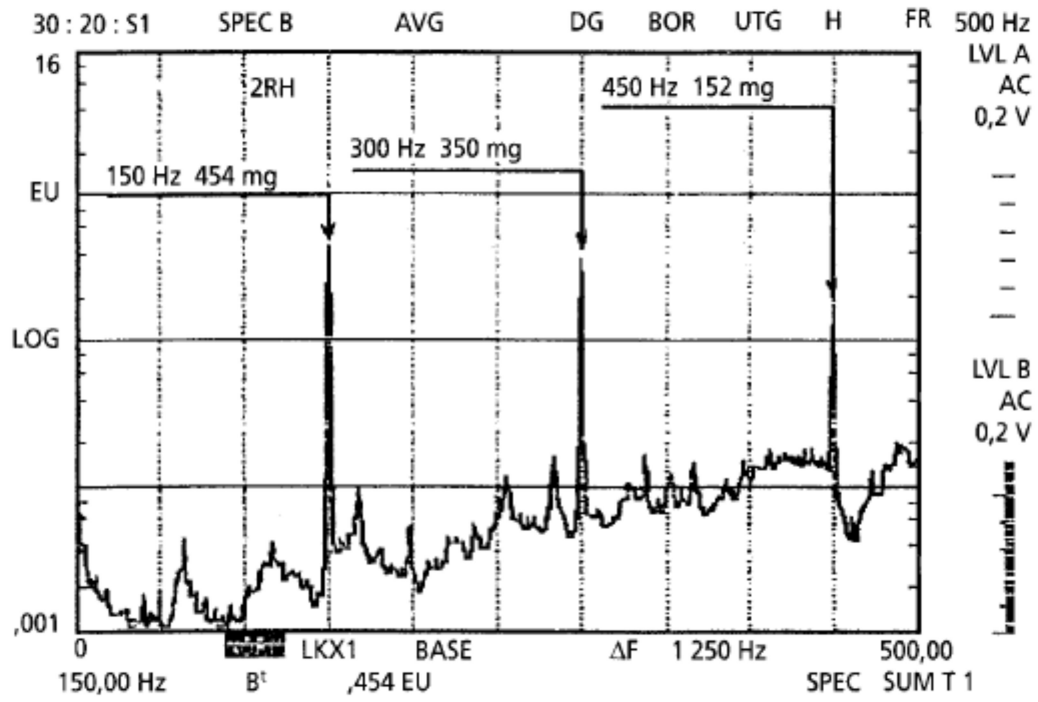


Figure II.9: Exemple de spectre obtenu par une mesure d'analyse vibratoire

IV.3.1 types de surveillances :

On distingue deux types de surveillance selon les collectes des données ou mesures :

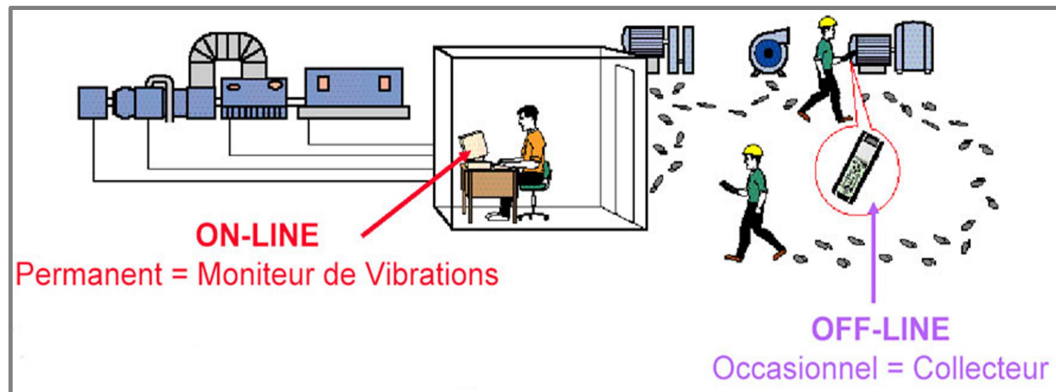


Figure II.10-a : les modes de Surveillance vibratoire

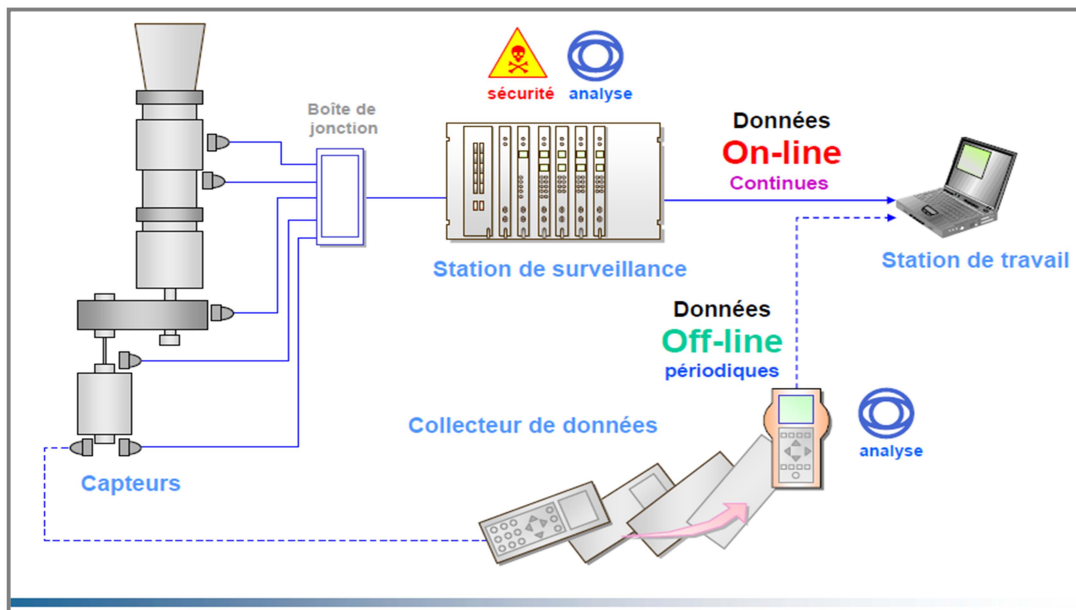


Figure II.10-b : les modes de Surveillance vibratoire

Surveillance ONLINE ou permanente :

Les machines sont surveillées d'une manière continue par un monitor de suivi ou une salle de control ou un tableau de télémaintenance, Les capteurs sont installés à demeure sur la machine. Initialement destinés à assurer la sécurité d'un équipement par son arrêt immédiat en cas de dépassement du seuil de danger par la valeur d'un indicateur, avec le progrès technologique l'utilisation des systèmes d'acquisition multivoies et la micro-informatique est plus souvent.

Surveillance OFFLINE ou périodique :

Les machines sont surveillées d'une manière périodique et en suivre l'évolution dans le temps a des intervalles réguliers à l'aide d'un appareil portable le plus souvent informatisé

appelé « collecteur de données », ce genre de surveillance est réservé pour les systèmes industrielle qui n'influe pas sur la sécurité des personnes ou l'environnement.

IV.3.2 Mise en place de la surveillance par analyse vibratoire

Il existe des techniques de surveillance fiables et économiquement intéressantes, pour mettre en place une stratégie de surveillance la mieux appropriée, fiable et faisable aussi avec des indicateurs prédéterminer adapter avec elle qui nous a permet de planifier les interventions, les travaux en phase opérationnel de la surveillance. La démarche d'implanté une stratégie de surveillance comporte deux parties :

- Mettre en place la stratégie
- Démarrer la surveillance

Premier Partie : Mettre en place la stratégie de surveillance

a- Sélection des machines sensibles :

Calcifications des machines par criticité en parc machine et ressortir les quelques machines, réellement « stratégiques » par l'analyse de méthode de :

- Diagramme de PARETO.
- Diagramme ABC.

b- Étude du contexte d'utilisation des machines à surveiller :

« **Surveiller = noter** » On ne peut surveiller que ce que l'on connaît bien, Alor pour chaque machine en doit noter :

- La cadence du travail du machine (volume horaire 24/24 ou 12/24 ou 16/24...).
- Ses particularités (l'état de marche).
- Les organes et les points les plus faible et leur mode défaillance (**AMDEC**).
- L'historique machine (détail des incidents ou des pannes).

c- Vérification de la faisabilité technique de la surveillance :

Bien aux machines sélectionnées et dans des conditions satisfaisantes Pour cela, on vérifie que peuvent être respectées les conditions suivantes :

- Vérifier L'aptitude d'accessibilité aux points de mesure.
- Vérifier la vitesse de rotation et de la charge durant la prise de la mesure.
- Choix de la durée de prise de mesure (selon fréquence de rotation et fréquence De manifestation des défauts).
- Établir une reproductibilité des conditions de mesure (définir plusieurs classes de fonctionnement avec des seuils d'alarme propres à chacune d'elles et d'archiver car les conditions de fonctionnement quasi-identiques.

- L'adéquation surveillance/chaîne de mesure (les fréquences auxquelles peuvent se manifester les défauts redoutés, se situent dans la bande passante de la chaîne de mesure (Du capteur à l'analyseur).

d- Évaluation du bousin avant du choix de la stratégie :

La surveillance d'une machine par suivi d'évolution d'indicateurs (surveillance par indicateurs scalaires énergétiques et dépassement de seuils, surveillance par dépassement de gabarits spectraux, surveillance par indicateurs typologiques) présentant un niveau de fiabilité et de précocité de détection mais aussi de difficulté de mise en œuvre très différents d'un mode à l'autre, pour l'apparition éventuelle d'un défaut insensible aux indicateurs définis.

Un autre mode de surveillance est envisageable, la surveillance par diagnostics périodiques beaucoup mieux adaptée à la détection exhaustive et précoce des défauts de toute nature.

La surveillance par suivi d'indicateurs et la surveillance par diagnostics périodiques sont deux stratégies très différentes, La première est bien adaptée au concept de la maintenance conditionnelle, la seconde à celui de son prolongement qu'est la maintenance prévisionnelle. Avant d'arrêter son choix sur L'une ou l'autre, il convient d'évaluer pour chaque équipement ce que peut apporter chacune de ces deux approches.

e- Critères de Choix des indicateurs pour la Surveillance par indicateurs

Pour les machines sous surveillance par suivi d'indicateurs le choix des indicateurs selon les critères suivants :

- Le type d'organes surveillés
- Le type de défauts redoutés
- Le niveau de fiabilité recherché
- La complexité cinématique de la machine
- Le coût du matériel de surveillance

f- Critères de Choix des indicateurs pour la Surveillance par diagnostics périodiques

L'étude approfondie de la cinématique de l'installation et l'établissement de sa fiche cinématique complète : cette étude permet de :

- **Connaître** les composantes cinématiques de base sur lesquelles de traitements spécifiques sera effectué.
- **Déterminer** les plages d'analyses et les résolutions nécessaires
- L'identification des anomalies

- La détermination des déphasages relatifs
- L'identification de l'origine cinématique des chocs et des phénomènes de modulation
- L'analyse de la sévérité des anomalies avec la démarche suivante :
 1. Suivre de collecte des données (mesures, spectres...).
 2. De localiser, voire d'identifier le défaut
 3. Estimer la gravité des défauts
 4. De prendre une décision

Elle est réalisée en fonction des niveaux vibratoires, l'évolution des mesures (l'image vibratoire) et les seuils préétablis pour le suivi des systèmes

g- Finalisation du choix de stratégie

Ce choix final dépendra :

- Les conductions général (sécurité des personnes et des biens,).
- Du rapport coût de la surveillance/coût réel de la panne redoutée.
- De la fiabilité recherchée.
- Établir le plan général de suivi et auscultation des systèmes.

h- La stratégie mixte

Suivant des bousions critique de certaines machines il est bien souvent pour les mêmes machines, on emploie une stratégie mixte de surveillance, c'est-à-dire qu'on emploie alternativement les deux stratégies de surveillance : la surveillance par indicateurs énergétiques simples et le diagnostic, selon l'un des deux modèles suivants :

Modèle 01 :

1. En premier lieu, on utilise un mode de surveillance par suivi d'indicateurs calculés dans des bandes fréquentielles plus ou moins étendues avec une périodicité donnée jusqu'à ce que les valeurs de ces indicateurs atteignent des seuils prédéfinis.
2. Puis, pour trouver l'origine et la gravité du défaut redouté un diagnostic est effectué et de nouveaux indicateurs sont éventuellement définis en fonction des anomalies identifiées afin de fiabiliser la surveillance jusqu'à ce qu'une action corrective soit décidée.

Modèle 02 :

1. Un diagnostic préalable de la machine avant sa mise sous surveillance est effectué si l'existence de défauts naissants est révélée, on définit des indicateurs de surveillance particuliers, sensibles aux manifestations dynamiques des défauts qui viennent d'être révélés

Deuxième partie : Démarrer la surveillance

a- Préparation et prise des mesures

- Préparation de plan de surveillance.
- Installation des données sur les caractéristiques de chaque machine.
- Installation des données caractéristiques des organes et éléments de chaque machine.
- Définir les Précautions à prendre lors de la prise des mesures.
- Installer tout le système en place (capteurs ; soft...).

b-Établissement de la signature initiale :

La première série de mesures effectuées sur la machine, Elle servira de référence pour les comparaisons ultérieures et, à ce titre, elle devra être la plus complète et la plus précise possible, Cette signature sera refaite dans des conditions opératoires identiques après chaque opération corrective.

c- Détermination des seuils d'intervention :

La détermination des seuils d'intervention est certainement l'une des opérations les plus délicates et les plus importantes puisque, tant que la valeur d'un (ou des) indicateur(s) choisis pour la surveillance n'excède pas une valeur prédéfinie, l'installation est considérée en bon état et aucune procédure d'investigation complémentaire ou d'intervention corrective n'est engagé, Il existe au moins deux seuils pour l'intervention :

- Les seuils d'alarme.
- Les seuils de danger ou de panne.

d- Traitement et analyse des rapport de mesure et historique des pannes

La réussite de la politique de surveillance est d'avoir continu toutes les opérations préliminaires telle l'inspection, control et études pour avoir le maximum de bénéfice de notre démarche de surveillance qui est représenté dans :

- Études et traitement de tout le document de surveillance (historique de pannes machine, fiche cinématique...etc.)
- Bien fit de routeur d'expériences pour les experts

L'analyse est effectuée selon des courbes d'évolution d'un indicateur, ce dernier permet de détecter de façon très visuelle l'apparition des défauts auxquels ils sont sensibles. L'évolution dans le temps d'un indicateur est souvent représentée par une courbe constituée d'une suite de points indiquant la valeur de l'indicateur à chaque date de mesure.

III.1 INTRODUCTION

La surveillance est le concept de base sur lequel reposent les deux formes de base des maintenances préventives que ce soit conditionnelle ou prévisionnelle surveiller les machines ne doit pas seulement remplir sa fonction initiale « de sécurité » mais aussi permettre la détection précoce des défauts et d'en suivre l'évolution dans le temps à partir des choix d'un ou plusieurs indicateurs pour assurer la détection au stade précoce des défauts [(A.boulenger, 2003)].

III.2 NOTIONS DE BASE ET THEORIE DE VIBRATION

III.2.1 QU'EST QU'UNE VIBRATION : Un système est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement dont chaque particule ou élément va-et-vient périodique autour d'une position moyenne appelée « position d'équilibre » figure21.

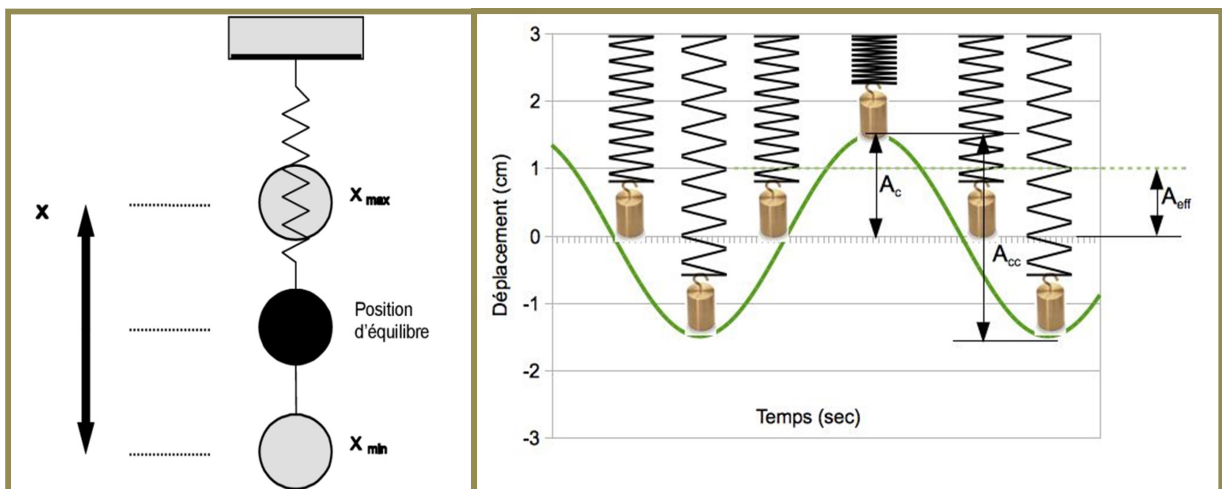


Figure N° 21 : naissance d'une vibration (SONATRACH FORM).

La transmission du mouvement vibratoire peut se faire soit au travers d'un gaz (généralement de l'air) ou d'un fluide (eau, huile...), soit au travers d'une matière solide comme la structure d'une machine, ses paliers, ses rotors ou encore la tuyauterie qui lui est associée... L'exemple le plus simple d'un système en vibration est sans doute donné par le mouvement d'une masselotte suspendue à un ressort et relâchée après Traction Cet exemple (figure 01) montre que si le mouvement est entretenu par une force d'excitation périodique.

III.2.2 CARACTÉRISATIONS D'UN VIBRATION

L'exemple (**figure 01**) montre que si le mouvement est entretenu par une force

D'excitation périodique :

- La masselotte oscille entre des limites supérieures et inférieures, et l'écart entre Chacune de ces limites et la position d'équilibre est appelé « **Amplitude** ».
- La masselotte oscille autour de sa position d'équilibre un certain nombre de fois par seconde ou par minute. Ce nombre de cycles répétés à l'identique pendant une unité de temps s'appelle la « **fréquence** ».
- La durée du cycle lorsque la masselotte oscille autour de sa position d'équilibre pour une seul fois s'appelle la « **période** ».

III.2.2.1 LA FRÉQUENCE : La fréquence représente la cadence de répétition d'un phénomène ou le nombre de fois qu'il se reproduit en un temps donné ; Lorsque l'unité de temps choisi est la seconde, la fréquence s'exprime en Hertz (Hz).

(Une vibration qui se produira 50 fois/seconde aura donc une fréquence de 50 Hz).

Les unités : L'unité normalisée (unité SI) de la fréquence est le Hertz (Hz),

1 hertz = 1 cycle par seconde

On rencontre parfois des valeurs exprimées en CPM (cycle par minute) ou RPM (rotation par minute).

$$1\text{Hz} = \frac{1\text{CPM}}{60} = \frac{1\text{RPM}}{60}$$

III.2.2.2. PÉRIODE : La période T d'un phénomène ou l'intervalle de temps parant deux passages successifs en même position et dans le même sens ; La période s'exprime en Secondes (s).

III.2.2.3 RELATION ENTRE FRÉQUENCE ET PÉRIODE

Le Hertz est la fréquence d'un phénomène dont la période est d'une seconde (Source : Norme française NF X 02-202).

Si la fréquence (f) d'un phénomène est de 50 Hertz, c'est-à-dire 50 cycles par Seconde, la durée d'un cycle (ou période T) est de 1/50e de seconde soit 20 ms.

Ainsi dans cet exemple :

F = 50 Hertz (50 Hz)

T = 1/50e de seconde

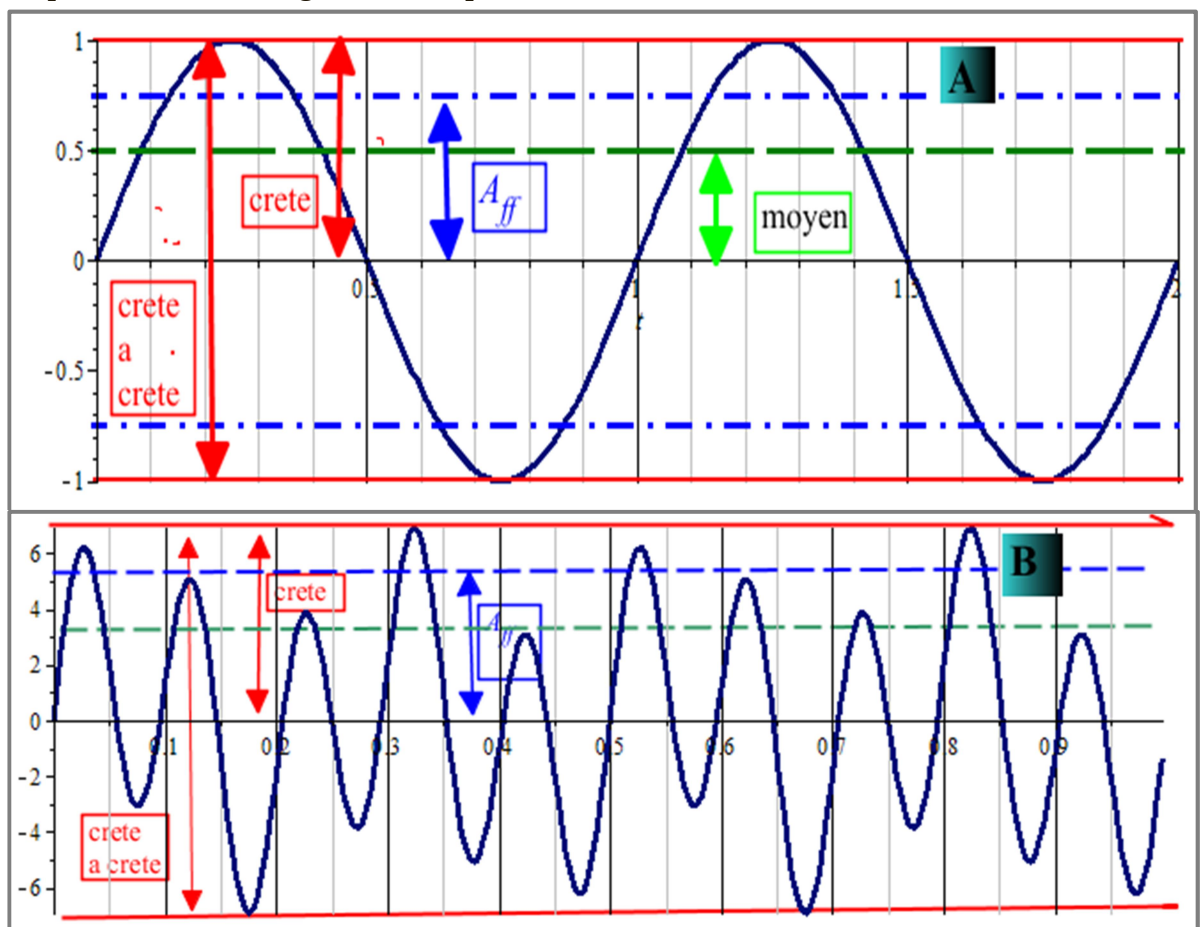
La fréquence f est donc l'inverse de la période

$$f = \frac{1}{T}$$

III.2.2.4 L'AMPLITUDE :

On appelle **amplitude** d'un mouvement vibratoire la valeur de ses écarts par Rapport À sa position d'équilibre.

- **L'amplitude « crête (Ac) »**. Elle représente l'amplitude maximale du signal Par rapport à sa valeur d'équilibre.
- **L'amplitude « crête à crête (Ac-c) »** appelée « peak to peak » (Ap-p) en anglais. Elle représente l'écart entre les amplitudes extrêmes du signal pour un temps d'observation donné. Dans le cas d'une vibration sinusoidale, elle est parfois appelée :« **Amplitude double** » ($Ac-c = 2Ac$).
- **L'amplitude « efficace (Aeff) » ou RMS** en anglais (Root Mean Square). Comme en électricité, elle représente l'amplitude corrigée « statique » du signal redressé, indiquant ainsi l'énergie donnée par le mouvement vibratoire.



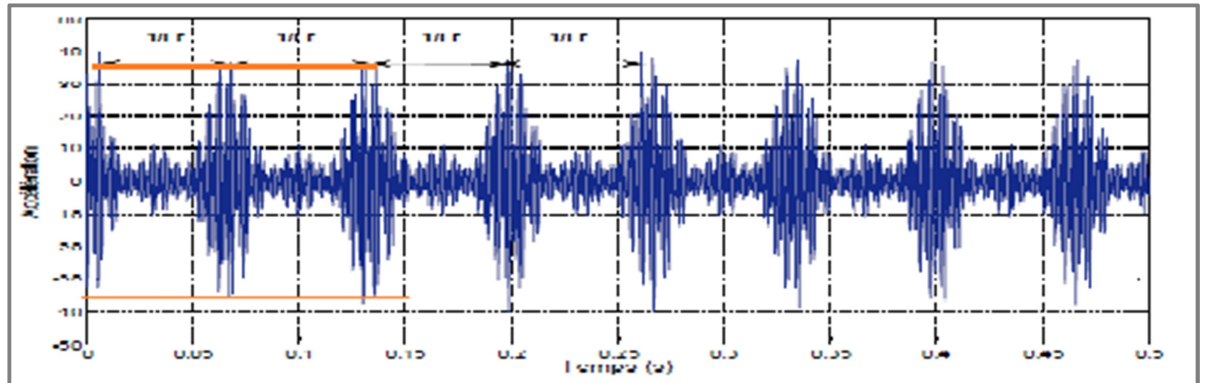


Figure No 22 : Représentation des différentes amplitudes caractéristiques dans le cas d'un signal sinusoïdal (en a), complexe (en b), impulsionnel périodique (en c).

Dans le cas d'une **vibration sinusoïdale** (induite par exemple par un balourd), les amplitudes crête, crête à crête et efficace sont liées par les relations

$$A_{eff} = \frac{\sqrt{2}}{2} A_C = 0,707 A_C$$

$$A_{C-C} = 2\sqrt{2} A_{eff} = 2,828 A_{eff}$$

suivantes :

Dans le cas d'un signal vibratoire complexe, il n'existe pas de relations mathématiques Liant les valeurs crête et efficace. Ces trois grandeurs, dont deux ne peuvent donc se déduire l'une de l'autre, devront donc être mesurées ou Calculées simultanément par l'appareil de mesure suivant les formules :

Avec :

– **max [s(t)]** : amplitude instantanée la plus élevée atteinte par le signal pour

$$A_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T s^2(t) dt}$$

$$A_C = \sqrt{\max[S^2(t)]}$$

$$A_{C-C} = \max[s(t)] - \min[s(t)]$$

La période d'observation T

– **min [s(t)]** : amplitude instantanée la plus faible atteinte par le signal pour

La période d'observation T

– $s(t)$: fonction représentative du signal.

III.2.2.5 GRANDEURS ASSOCIÉE À L'AMPLITUDE D'UNE VIBRATION

On peut déduire en général qu'une vibration est caractérisée par trois grandeurs physiques ou cinématiques fondamentales qui sont :

1. Déplacement : indique la position du point par rapport à un point de référence « **Distance** » Les unités courantes : **mm ; μm**

2. Vitesse : correspond a la variation de ce déplacement par unité de temps

Les unités courantes : **mm /s ; $\mu\text{m/s}$**

3. Accélération : correspond a la variation de cette vitesse par unité de temps

Les unités courantes : **mm /s² ; $\mu\text{m/s}^2$**

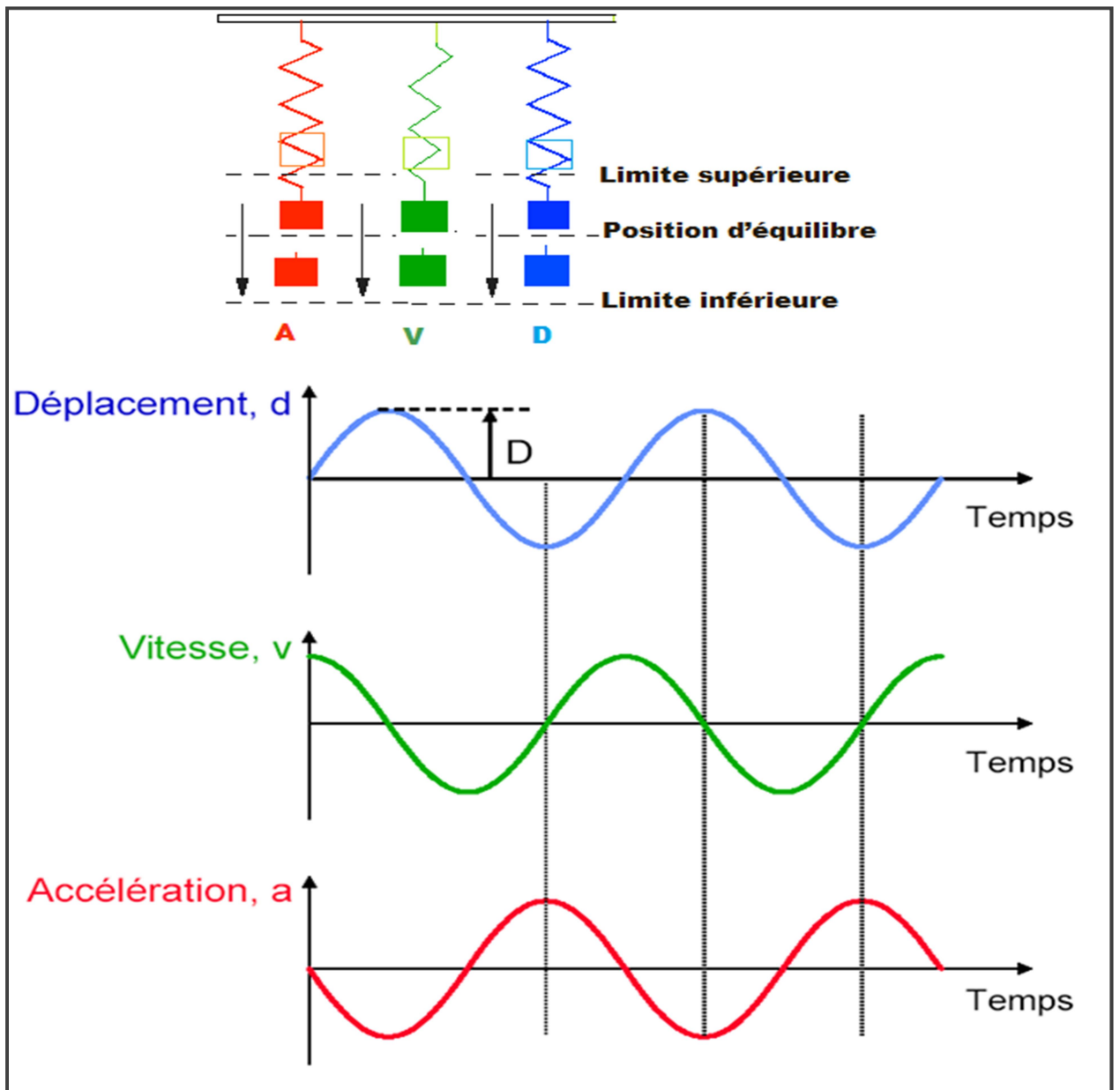


Figure.N° 23 : Représentations du mouvement d'un système masse-ressort selon les grandeurs (déplacements ; vitesse et Accélération).

III.2.2.6 RELATIONS ENTRE DÉPLACEMENT, VITESSE ET ACCÉLÉRATION

La vitesse est définie comme étant la dérivée du déplacement et l'accélération comme la dérivée de la vitesse (ou la dérivée seconde du déplacement).

Le déplacement X est représenté par : $X(t) = A \sin(2 \pi ft)$

En dérivant cette équation, on obtient la vitesse v du mouvement vibratoire

:

$$\frac{v(t)}{dx(t)}$$

Et en dérivant à nouveau, on obtient son accélération :

$$A(t) = \frac{dv(t)}{dt} = \frac{d^2x(t)}{dt^2}$$

$$V(t) = 2 \pi f x(t) \text{ et décalé de } 2 \pi f$$

$$A(t) = - (2 \pi f)^2 x(t) \text{ en opposition avec le déplacement avec } (2 \pi f)^2$$

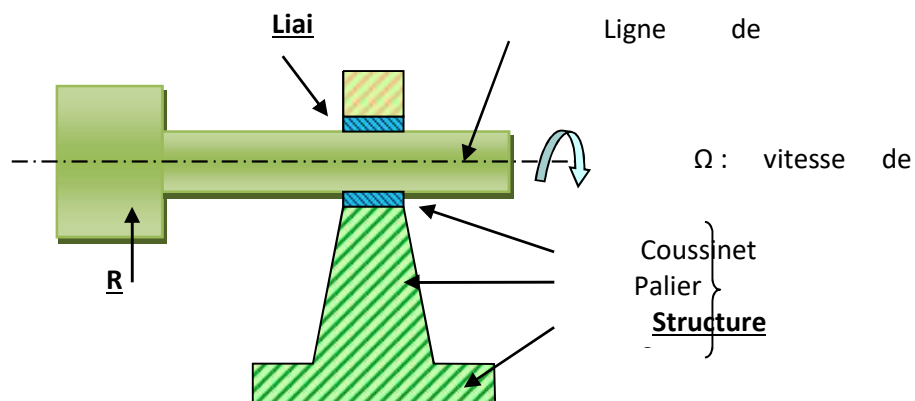
Ces relations montrent que la vitesse **V** et l'accélération **A** du mouvement de la masselotte sont, au même titre que son déplacement **X**, représentées par des fonctions sinusoïdales de même **fréquence** décalées dans le temps, Cependant, si les fréquences restent identiques

Les valeurs d'amplitudes diffèrent, Alor que :

Un rapport de $2 \pi f$ entre déplacement et vitesse ou vitesse et accélération et entre $(2 \pi f)^2$ déplacement et accélération [(A Boulenge, 2009)].

III.2. 3 LES VIBRATIONS DES MACHINES ET FACTEURS D'INFLUENCE :

Les machines sont des systèmes dans lesquelles se compose des organes et des ensembles qui se distinguer : des rotors, stators et des liaisons, le rotor est une structure rotative qui assuré le mouvement rotatif pour un ou plissures



machines,

Une structure non rotative comprend les différents éléments tel que : stator, les paliers, coussinets, le massif et le radier (ou la fondation qui assure la liaison entre massif et le sol) ...etc.

Figure N° 24 : Représentations les organes et origines de vibration

Les liaisons : le rotor est lié à la structure avec des liaisons qui assurent le guidage du rotor, en fin les liaisons sont classé en général en trois catégories :

- Les liaisons à fluide.
- Les liaisons à roulements, paliers.
- Les liaisons magnétiques [(R.BIGRET, 1994)]

Les mouvements des machines est assuré en collaboration entre ces derniers organes qui se traduit à des forces de vibration engendrées.

L'amplitude d'une vibration détermine l'importance du phénomène qui l'induit et souvent, par sa valeur élevée ou la rapidité de son évolution, la gravité du défaut et l'urgence d'une intervention corrective. Cependant, **L'amplitude mesurée par un capteur est seulement une image des forces dynamiques transmises par la structure de la machine.** Cette image peut être fortement altérée par cette dernière, mais aussi par de nombreux autres Facteurs d'influence tels que :

- La position du capteur et son mode de fixation,
- La bande passante de la chaîne d'acquisition,
- Le type de machine et ses conditions de fonctionnement,
- La nature des défauts susceptibles de l'affecter.

Cependant, les grandeurs vibratoires (déplacement, vitesse ou accélération) Induites par ces forces dynamiques présentent le grand intérêt d'être facilement Mesurables ; d'où la place prépondérante qui 'occupe l'analyse vibratoire en dépit de toutes ces difficultés comme technique de surveillance et de Diagnostic de machines à des fins de maintenance. Les facteurs d'influences Sont nombreux et peuvent être regroupés en quatre familles distinctes.

III.2. 3.1 transfert vibratoire : Les machines est le siège de forces dynamique d'origine diverses ces forces sont d'autre part susceptible d'être

modifier selon l'état d'enivrement dans laquelle la machine intègre Les vibrations qui représentent la réponse a ces forces des différents organes constituant La machine et des éléments auxquelles liées.

La force d'excitation et la vibration qu'elle induit sont liées par la relation :

$$s(t) = h(t) * f(t)$$

Relation dans laquelle la fonction « h », communément appelée « réponse Impulsionnelle ou fonction de transfert », caractérise le transfert vibratoire entre le point d'application de la force dynamique d'excitation et le point de mesure.

Dans cette relation, l'opérateur « * » représente le produit de convolution.

La réponse en fréquence de la structure donnée par différentes techniques, correspond, pour chaque fréquence, au coefficient qui lie l'amplitude de la Force à celle de la vibration qu'elle induit ainsi qu'au déphasage entre ces deux grandeurs.

Le module de cette fonction présente un certain nombre de maximale appelés « fréquences propres ». à chaque fréquence propre est associé un mode de déformation (flexion, torsion...) ou un mouvement particulier sans déformation de la structure (pompage, tangage, lacet...) appelé « mode propre ».

La maîtrise du transfert vibratoire joue un rôle essentiel au niveau de la surveillance vibratoire des machines et tous sa contribution sur les valeurs des grandeurs mesurées.

- Si la grandeur vibratoire mesurée représente l'accélération la fonction transfert est appelée « **ACCÉLÉRANCE** ou **INERTANCE** ».
- Si elle représente la vitesse vibratoire elle est appelée « **MOBILITÉ** ».
- Si elle représente le déplacement elle est appelée « **COMPLIANCE** ».

III.2. 3.2 l'environnement de la machine :

Le comportement vibratoire d'une machine dépend fortement de son environnement ; qui est caractérisé par la nature de son procédé de production dans laquelle s'intègre et les structures dans auxquelles elle est physiquement reliée. Ces facteurs d'influence classent en deux catégories selon leur mode d'action :

- **L'environnement actif** : (alimentation en énergie ; procédé ; sources extérieures ; machines voisines ; équipements statiques tel que four, chaudière, réacteurs

chimiques susceptible à induire des excitations vibratoires spécifique dues aux résonnances acoustiques ...) qui influe directement sur les forces internes de la machine ; souvent qui génère des forces affectent ses comportements.

▪ **L'environnement passif** : Les effets des masses, inerties, rigidités et amortissements des différents éléments Constituant la machine et les structures auxquelles elle est liée par des liaisons (châssis support, fondations, tuyauterie...) dont les liaisons affectent son transfert vibratoire.

Ces facteurs d'influence sont spécifiques à chaque machine, à chaque structure, à chaque procédé, cette spécificité annihilent de fait tout crédit à l'utilisation de critères standard même s'ils sont définis par type machine et classe de structure.

III.2.3.3 La prise de mesures : Le fondement de la surveillance vibratoire périodique d'une machine repose sur l'analyse des évolutions de comportement vibratoire d'une collecte à l'autre. La comparaison de valeurs d'indicateurs ou de formes d'images n'est valable que si les procédures de prise de mesure respectent **le principe de reproductibilité** Ce principe signifie que la proposition « forces d'excitation identiques et transferts vibratoires identiques » qui entraîne un « comportement vibratoire identique » soit toujours vérifiée. Pour cela, il est indispensable que les conditions de fonctionnement de la machine, les caractéristiques du capteur et son mode de fixation soient identiques d'une collecte à l'autre ainsi que la bande passante de l'unité de conditionnement du signal délivré par le capteur. Ces conditions étant respectées, toute modification de comportement vibratoire traduira alors une modification :

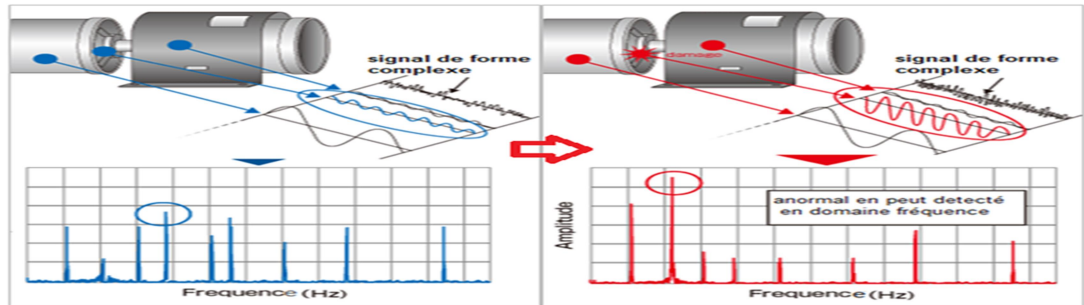
- Soit des forces d'excitation dues à l'apparition de défauts,
- Soit du transfert vibratoire « mécanique » dû à des défauts de liaison (desserrage, Fissuration d'ancrages), vieillissement de plots de suspension.

III.2.3.4 La nature de la pathologie affectant la machine :

L'énergie vibratoire et son étendue spectrale induite par un défaut dépendent fortement :

- De la nature du défaut (balourd, désalignement, desserrage, jeux de paliers
Ou d'accouplement, écaillages de denture ou de bague de roulement...)
- De la vitesse de rotation de la ligne d'arbres qu'il affecte.

Les facteurs susceptibles d'affecter de manière significative la mesure d'une Grandeur vibratoire ou l'interprétation de son évolution sont nombreux et Parfois difficiles à maîtriser. L'opérateur doit toujours faire preuve de rigueur Au niveau de la prise de mesure et d'esprit critique au niveau de l'interprétation des évolutions. [(A Boulenge, 2009)] [(F.YACINE, 2006)].

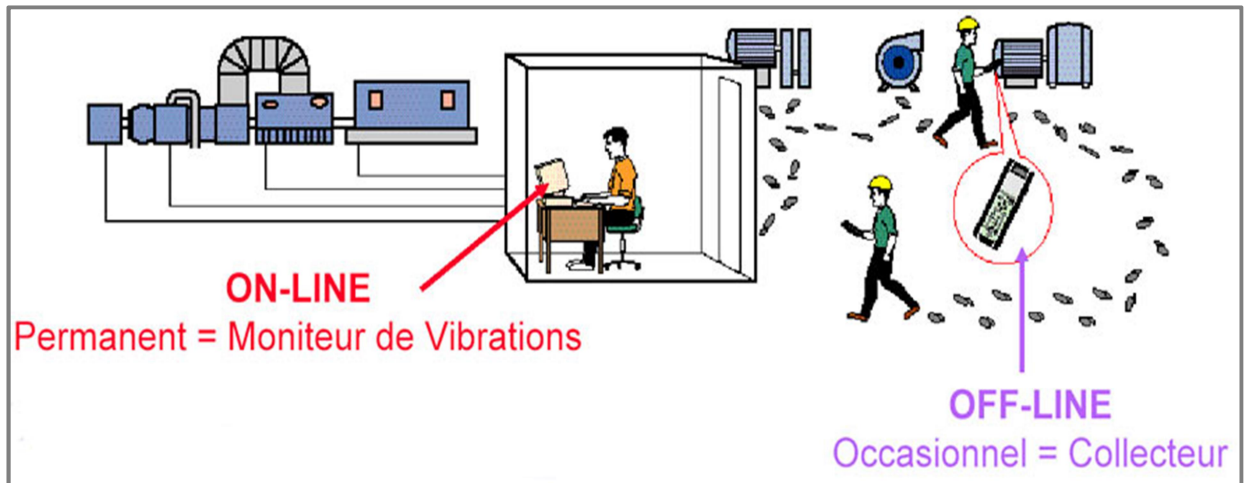


FigureN° 25 : la nature des défauts avec spectre (www.imv.co.jp)

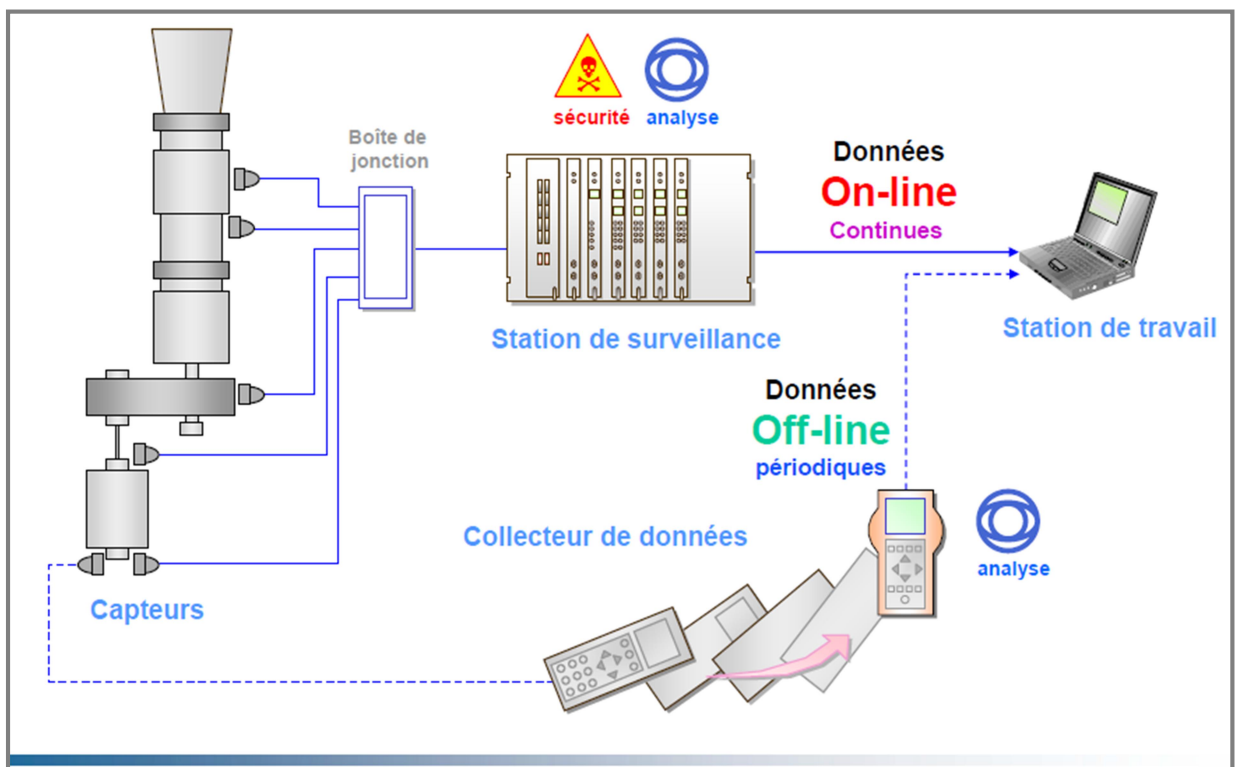
III.3. LA SURVEILLANCE PAR ANALYSE VIBRATOIRE

III.3.1 types de surveillances :

On distingue deux types de surveillance selon les collectes des données ou mesures :



Figure№ 26-a : les modes de Surveillance vibratoire (image formation SKF SONATRACH)



Figure№ 26-b : les modes de Surveillance vibratoire (image formation SKF SONATRACH)

III.3.2 SURVEILLANCE ONLINE /OU PERMANENTE :

Les machines sont surveillées de manière continue par un monitor de suivi ou une salle de control ou un tableau de télémaintenance, Les capteurs sont installés à demeure sur la machine. Initialement destiné à assurer la sécurité d'un équipement par son arrêt immédiat en cas de dépassement du seuil de danger par la valeur d'un indicateur, avec le progrès technologique l'utilisation des systèmes d'acquisition multivoies et la micro-informatique est plus souvent.

• **Avantages de la surveillance permanente :**

- Un suivi permanent des valeurs des indicateurs choisis,
- Une détection possible des défauts à évolution rapide,
- Une association possible et facile avec d'autres paramètres procédés :
Température, vitesse, charge, intensité absorbée, pression...,
- Un arrêt automatique de l'installation, envisageable sur alarme,

• **Inconvénients de la surveillance permanente :**

- Le coût de sa maintenance est élevé.
- Le coût de formation du personnelles spécialisées.
- Le risque d'effet de masque.

III.3.3 SURVEILLANCE OFFLINE OU PÉRIODIQUE :

Les machines sont surveillées de manière périodique et en suivre l'évolution dans le temps a des intervalles réguliers à l'aide D'un appareil portable le plus souvent informatisé appelé « collecteur de données », Ce Jorn de surveillance est réservé pour les systèmes industrielle qui n'influe pas sur la sécurité des personnes Ou l'environnement.

• **Avantages et inconvénients de la surveillance périodique :**

- Le faible coût de l'investissement de base au regard du nombre de machines qui peut être surveillées avec un seul appareil et un ou deux capteurs.

• **Les principaux inconvénients sont :**

- Resèque d'avoir un défaut entre les collectes des données.
- Un historique d'évolution d'indicateurs bien moins riche

[(A.boulenger, 2003)].

III.4. MISE EN PLACE DE LA SURVEILLANCE PAR ANALYSE VIBRATOIRE :

Il existe des techniques de surveillance fiables et économiquement intéressantes, pour mettre en place une stratégie de surveillance la mieux appropriée, fiable et faisable aussi avec des indicateurs prédéterminer adapter avec elle qui nous a permet de planifier les interventions, les travaux en phase opérationnel de la surveillance.

La démarche d'implanté une stratégie de surveillance comporte deux parties :

- Mettre en place la stratégie
- Démarrer la surveillance

III.4.1 Premier Partie : Mettre en place la stratégie de surveillance

III.4.1.1 Sélection des machines sensibles :

Calcifications des machines par criticité en parc machine et ressortir les quelques machines, réellement « stratégiques » par l'analyse de méthode de :

- DIAGRAMME DE PARETO.
- DIAGRAMME ABC.

III.4.1.2 Étude du contexte d'utilisation des machines à surveiller :

« **Surveiller = noter** » On ne peut surveiller que ce que l'on connaît bien, Alor pour chaque machine en doit noter :

- La cadence du travail du machine (volume horaire 24/24 ou 12/24 ou 16/24...).
- Ses particularités (l'état de marche).
- Les organes et les points les plus faible et leur mode défaillance (**AMDEC**).
- L'historique machine (détail des incidents ou des pannes).

III.3.1.3 Vérification de la faisabilité technique de la surveillance :

Bien aux machines sélectionnées et dans des conditions satisfaisantes Pour cela, on vérifie que peuvent être respectées les conditions suivantes :

- Vérifier L'aptitude d'accessibilité aux points de mesure.
- Vérifier la vitesse de rotation et de la charge durant la prise de la mesure.
- Choix de la durée de prise de mesure (selon fréquence de rotation et fréquence De manifestation des défauts).
- Établir une reproductibilité des conditions de mesure (définir plusieurs classes de fonctionnement avec des seuils d'alarme propres à chacune d'elles et d'archiver car les conditions de fonctionnement quasi-identiques.
- L'adéquation surveillance/chaîne de mesure (les fréquences auxquelles peuvent se manifester les défauts redoutés, se situent dans la bande passante de la chaîne de mesure (Du capteur à l'analyseur).

III.4.1.4 Évaluation du bousin avant du choix de la stratégie :

La surveillance d'une machine par suivi d'évolution d'indicateurs (surveillance par indicateurs scalaires énergétiques et dépassement de seuils, surveillance par dépassement de gabarits spectraux, surveillance par indicateurs typologiques) présentant un niveau de fiabilité et de précocité de détection mais aussi de difficulté de mise en œuvre très différents d'un mode à l'autre, pour l'apparition éventuelle d'un défaut insensible aux indicateurs définis.

Un autre mode de surveillance est envisageable, la surveillance par diagnostics périodiques Beaucoup mieux adaptée à la détection exhaustive et précoce des défauts de toute nature.

La surveillance par suivi d'indicateurs et la surveillance par diagnostics périodiques sont deux stratégies très différentes, La première est bien adaptée au concept de la maintenance conditionnelle, la seconde à celui de son prolongement qu'est la maintenance prévisionnelle. Avant d'arrêter son choix sur L'une ou l'autre, il convient d'évaluer pour chaque équipement ce que peut apporter chacune de ces deux approches.

III.4.1.5 Critères de Choix des indicateurs pour la Surveillance par indicateurs

Pour les machines sous surveillance par suivi d'indicateurs le choix des indicateurs selon les critères suivants :

- Le type d'organes surveillés
- Le type de défauts redoutés
- Le niveau de fiabilité recherché
- La complexité cinématique de la machine
- Le coût du matériel de surveillance

III.4.1.6 Critères de Choix des indicateurs pour la Surveillance par diagnostics périodiques

L'étude approfondie de la cinématique de l'installation et l'établissement de sa fiche cinématique complète : cette étude permet de :

- **Connaître** les composantes cinématiques de base sur lesquelles de traitements spécifiques sera effectué.
- **Déterminer** les plages d'analyses et les résolutions nécessaires
- L'identification des anomalies
- La détermination des déphasages relatifs

- L'identification de l'origine cinématique des chocs et des phénomènes de modulation
- L'analyse de la sévérité des anomalies avec la démarche suivante :
 5. Suivie de collecte des données (mesures, spectres...).
 6. De localiser, voire d'identifier le défaut
 7. Estimer la gravité des défauts
 8. De prendre une décision

Elle est réalisée en fonction des niveaux vibratoires, l'évolution des mesures (l'image vibratoire) et les seuils préétablis pour le suivie des systèmes

III.4.1.7 Finalisation du choix de stratégie

Ce choix final dépendra :

- Les conductions général (sécurité des personnelles et des biens,).
- Du rapport coût de la surveillance/coût réel de la panne redoutée.
- De la fiabilité recherchée.
- Établir le plan général de suivi et auscultation des systèmes.

III.4.1.8 La stratégie mixte

Suivant des bousions critique de certaines machines il est bien souvent pour les mêmes machines, on emploie une stratégie mixte de surveillance, c'est-à-dire qu'on emploie alternativement les deux stratégies de surveillance : la surveillance par indicateurs énergétiques simples et le diagnostic, selon l'un des deux modèles suivants :

Modèle 01 :

3. En premier lieu, on utilise un mode de surveillance par suivi d'indicateurs calculés dans des bandes fréquentielles plus ou moins étendues avec une périodicité donnée jusqu'à ce que les valeurs de ces indicateurs atteignent des seuils prédéfinis.
4. Puis, pour trouver l'origine et la gravité du défaut redouté un diagnostic est effectué Et de nouveaux indicateurs sont éventuellement définis en fonction des anomalies identifiées afin de fiabiliser la surveillance jusqu'à ce qu'une action corrective Soit décidée.

Modèle 02 :

2. Un diagnostic préalable de la machine avant sa mise sous surveillance est effectué Si l'existence de défauts naissants est révélée, on définit des indicateurs de surveillance particuliers, sensibles aux manifestations dynamiques des défauts qui viennent d'être révélés

III.4.2 Deuxième partie : Démarrer la surveillance

III.4.2.1 Préparation et prise des mesures

- Préparation de plan de surveillance.
- Installation des données sur les caractéristiques de chaque machine.
- Installation des données caractéristiques des organes et éléments de chaque machine.
- Définir les Précautions à prendre lors de la prise des mesures.
- Installer tout le système en place (capteurs ; soft...).

III.4.2.2 Établissement de la signature initiale :

La première série de mesures effectuées sur la machine, Elle servira de référence pour les comparaisons ultérieures et, à ce titre, elle devra être la plus complète et la plus précise possible, Cette signature sera refaite dans des conditions opératoires identiques après chaque opération corrective.

III.4.2.3 Détermination des seuils d'intervention :

La détermination des seuils d'intervention est certainement l'une des opérations les plus délicates et les plus importantes puisque, tant que la valeur d'un (ou des) indicateur(s) choisis pour la surveillance n'excède pas une valeur prédéfinie, l'installation est considérée en bon état et aucune procédure d'investigation complémentaire ou d'intervention corrective n'est engagé, Il existe au moins deux seuils pour l'intervention [**figure15** page 26] :

- Les seuils d'alarme.
- Les seuils de danger ou de panne.

III.4.2.4 Traitement et analyse des Rapport de mesure et historique des pannes

La réussite de la politique de surveillance est d'avoir continu toutes les opérations préliminaires telle l'inspection, control et études pour avoir le maximum de bénéfice de notre démarche de surveillance qui est représenter dans :

- Études et traitement de tout le document de surveillance (historique de pannes machine, fiche cinématique...etc.)
- Bienfit de routeur d'expériences pour les experts

L'analyse est effectuée selon des courbes d'évolution d'un indicateur ce dernier permet de détecter de façon très visuelle l'apparition des défauts auxquels ils sont sensibles. L'évolution dans le temps d'un indicateur est souvent représentée par une courbe constituée d'une suite de points indiquant la valeur de l'indicateur à chaque date de mesure.

III.5 DIFFÉRENTES STRATÉGIES DE SURVEILLANCE DES SYSTÈMES PAR ANALYSE VIBRATOIRE :

Dans ce concept de maintenance, la surveillance des systèmes électromécaniques doit non seulement remplir sa fonction initiale « de sécurité » mais surtout permettre la détection précoce de défauts et d'en suivre l'évolution dans le temps. La détection des défauts à un stade précoce offre la possibilité de planifier et de préparer les interventions nécessaires.

III.5.1 LA SURVEILLANCE PAR SUIVI D'INDICATEURS VIBRATOIRES

III.5.1.1 Les indicateurs :

Toute machine en fonctionnement induit des vibrations celle-ci sont les représentations directes des forces dynamiques engendrée par les pièces en mouvement et occupent une Place privilégiée parmi les grandeurs à prendre en considération pour assurer La surveillance des machines, ces grandeurs est appelée « **indicateurs** ».

La surveillance par indicateurs vibratoire joue un rôle très important dans le diagnostic de l'état machines des installations aussi des systèmes électromécaniques à des fins de maintenance.

Un indicateur de surveillance est un grandeur vibratoire dérivant des trois grandeurs cinématiques de base caractérisant un mouvement vibratoire (accélération, vitesse, déplacement) qui est sensible à l'apparition ou à l'évolution d'un ou plusieurs défauts.

Les trois grandes familles d'indicateurs :

1. Les indicateurs scalaires
2. Les indicateurs spectraux

Dr. M. DEFDAF

3. Les indicateurs typologiques (spécifique)

III.5.1.2 Seuil d'un indicateur :

Chaque indicateur est doté d'un « seuil » qui dépend :

- De l'indicateur considéré et de la nature des défauts qui lui sont associés (déséquilibre, desserrage, désalignement, écaillage de roulements, ...).
- Du type de machine ou système surveillée et de ses conditions de fonctionnement (vitesse de rotation, charge).

Le concept de seuil associé à un indicateur est un des points clés de la surveillance de la maintenance conditionnelle ou prévisionnelle, tant que la valeur n'excède pas une valeur prédéfinie ou seuil, l'installation est considérée en bon état ; aucune investigation ou arrêt pour intervention corrective n'est envisager Le choix du seuil est fondamental.

- ❖ Une valeur trop basse entraîne des alarmes non justifiées.
- ❖ Une valeur trop élevée entraîne une détection précoce.

En doit définir au moins deux seuils :

A. Seuil d'alarme : déclenche une procédure de « diagnostic » pour localiser l'origine de l'anomalie.

B. Seuil de danger : nécessite un diagnostic immédiat de l'état de l'installation pour statuer sur l'urgence arrêt d'une action corrective.

[(MERZOUG, 2005)].

III.5.2 SURVEILLANCE PAR SUIVI D'INDICATEURS SCALAIRES ÉNERGÉTIQUES (ANALYSE TEMPORELLE) :

III.5.2.1 Surveillance par suivi d'indicateurs scalaires « Grandes bandes ».

Ce type de surveillance par des indicateurs grandes bandes ou dite :

« NIVEAU GLOBAL » « MESURES GLOBALES » Qui caractérise les mouvements vibratoires global induit par Le fonctionnement normal où Anormal de la machine est caractérisé ici par un ou plusieurs indicateurs dont l'évolution sera suivie de manière périodique ou continue. Ce type de suivi permet ainsi de connaître l'état vibratoire de la machine et d'en surveiller l'évolution, sans pouvoir bien souvent déterminer avec précision la cause de la vibration (désalignement, balourd ...), Ces indicateurs représentent le plus souvent l'amplitude efficace (et parfois L'amplitude crête, les mesures est effectuer dans

une plage très étendue, souvent dans la bande passante de l'appareil de mesure ou dans une bande fréquentielle normalisée.

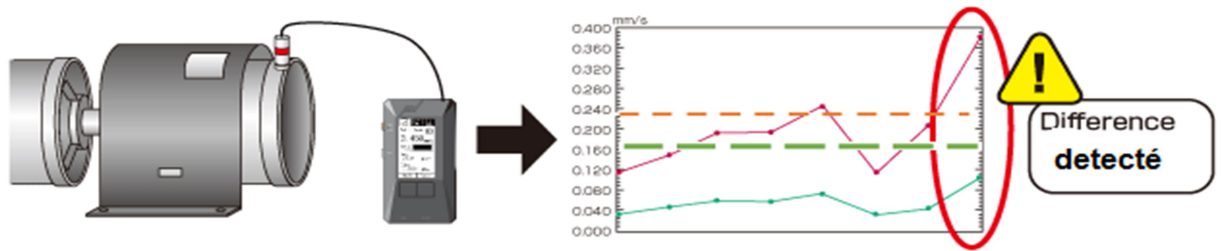


Figure N° 27 : courbe de tendance qui montre suivi par indicateurs (www.imv.co.jp)

Avantages de surveillance par type d'indicateurs :

- Son faible coût de mise en œuvre, qui ne nécessite ni investissement coûteux

En matériel, ni formation importante, ni niveau de qualification élevé.

Inconvénients :

- Danger de l'effet masquée
- Suivre l'évolution sans pouvoir détectée l'origines des défauts.

Note : si d_i représente l'amplitude efficace des manifestations vibratoires induites par un défaut donné i affectant une machine, l'amplitude efficace totale NGD induite par l'ensemble des défauts affectant cette dernière est alors égale à :

$$NGD = \sqrt{d_1^2 + d_2^2 + d_i^2 \dots d_n^2}$$

Alors que l'amplitude efficace globale NGD induite par l'ensemble des défauts affectant une machine est très proche de celle correspondant au défaut qui induit l'énergie vibratoire la plus élevée, dans l'exemple suivant qui décrit un peu plus loin met en évidence ce danger de l'effet de masque dans le suivi en mode global « large bande » : La valeur de l'indicateur du niveau global en mode vitesse NGV d'un des paliers d'une moto-soufflante (figure 25) est de 5,22 mm/s. Ce niveau global est en réalité composé de la façon suivante :

$$NGD = \sqrt{5^2 + 0,1^2 + 0,1^2 + 1,5^2} = 5,22$$

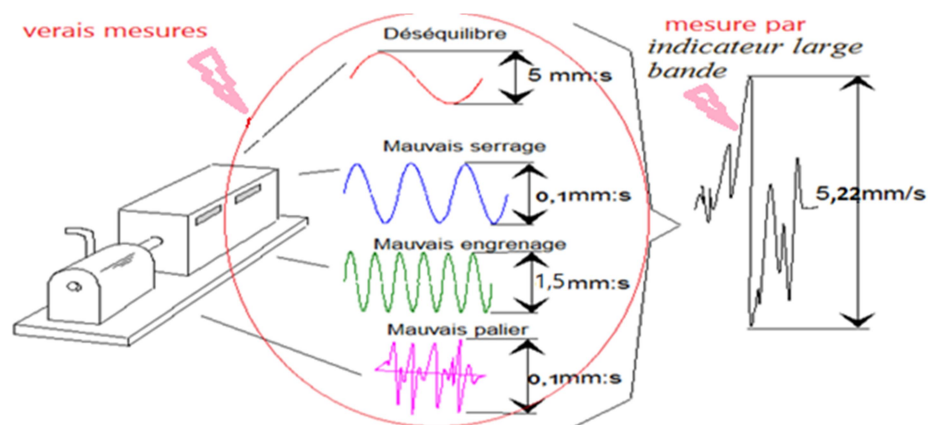


Figure N° 28 : Effet de masque lié à la mesure d'un indicateur scalaire large bande

III.5.2.2 Surveillance par suivi d'indicateurs scalaires « bandes étroites ».

Pour minimiser les dangers qui présentent les effets masques des indicateurs large bande le Suivre des systèmes avec des indicateurs bandes étroites offrent la possibilité de mesurer ou de calculer ces indicateurs scalaires dans plusieurs bandes de fréquences définies par l'utilisateur, d'en suivre l'évolution et d'associer à chacun d'eux des seuils.

Ces possibilités permettent à l'utilisateur :

- De définir des indicateurs et des seuils dont les sensibilités sont beaucoup mieux adaptées à la nature de chaque défaut qu'il souhaite surveiller,
- De réduire, voire d'éliminer, les effets masque induits par le fonctionnement « normal » de l'installation à surveiller.

III.5.3 SURVEILLANCE PAR SUIVI D'INDICATEURS SPECTRAUX ET TYPOLOGIQUE

Indicateurs spectraux

Cette technique de dépistage consiste à comparer le spectre vibratoire issu de chaque mesure avec le spectre de référence de la machine surveillée, obtenu dans des conditions identiques, à un moment où l'état de l'installation a pu être considéré comme satisfaisant. Bien souvent, ce spectre de référence ou signature est remplacé par un gabarit ou un masque de référence fixant les limites acceptables Tout changement significatif du nouveau spectre se traduit par un débordement du gabarit.

La performance de la surveillance par suivi d'évolution spectrale et dépassement de gabarit qui permet d'éliminer les effets de masque dans la mesure où la résolution d'analyse choisie est en adéquation avec la cinématique

de la machine surveillée et les manifestations dynamiques des défauts recherchés.

L'évolution technologique permet de calculer un spectre et son gabarit avec un nombre de lignes spectrales très élevé et augmente sa sensibilité.

Pour cela et empiriquement, on pourra souvent choisir comme découpage, pour la plupart Des machines stratégiques :

- **Un spectre BF basses fréquences** : dont l'étendue sera limitée aux dix premiers ordres de la fréquence de rotation et dont le nombre de lignes sera suffisamment élevé pour séparer les ordres de la fréquence de rotation des ordres de la fréquence du courant d'alimentation dans le cas d'un moteur asynchrone ou à courant continu, ou pour séparer les premiers harmoniques des fréquences de rotation des différentes lignes d'arbres constituant l'installation.

- **Un spectre HF hautes fréquences** : dont l'étendue correspondra à la bande passante de la chaîne d'acquisition. Il est destiné à suivre les évolutions énergétiques des réponses à des excitations périodiques ou aléatoires des modes hautes fréquences de paliers, roulement, dentures.

- **Zooms** : des zooms centrés autour des principales composantes cinématiques de la machine (fréquence de rotation, fréquence d'engrènement, fréquence de passage de pales, d'encoches...) destinés à suivre les évolutions des distributions d'amplitudes des bandes latérales de modulation associées.

- **spectre PBC pourcentage de bande constant** : Certains produits offrent la possibilité de regrouper les spectres BF, MF et HF de résolutions différentes en un spectre unique représenté avec une échelle fréquentielle logarithmique par concaténation ou par transformation de plusieurs spectres à résolutions constantes en un spectre dont la résolution est alors inversement proportionnelle à la fréquence le suivi de la forme spectrale des indicateurs par comparaison avec un gabarit est plus fin et plus fiable que les deux techniques précédemment étudiées, sous réserve d'une constance des conditions de fonctionnement de la machine, notamment en ce qui concerne sa vitesse de rotation, celle-ci conditionnant la superposition des fréquences.

III.5.4 Les outils de surveillance

Les outils de surveillance ou les méthodes temporelles sont basés sur l'analyse

Statistique du signal recueilli.

II.5.4.1 La valeur efficace ou valeur RMS (Root Mean Square)

C'est un indicateur scalaire large bande très utilisé, bien qu'il présente des inconvénients, Le premier inconvénient, il est sensible à l'effet de masque, c'est à dire qu'il peut s'avérer inefficace à l'apparition de certains défauts. Le deuxième inconvénient, la valeur efficace ne détecte pas tous les défauts et donne une alarme tardive, ce qui représente un inconvénient majeur dans le cadre de la maintenance conditionnelle. La forme discrétisée de la valeur efficace est donnée par :

$$V_{efficace} = V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} [S(t)]^2}$$

Où $S(t)$ est le signal temporel mesuré, N_e représente le nombre d'échantillons prélevés dans le signal.

Son efficacité dépend de son bon paramétrage en termes de bandes de fréquences D'analyse liées à la structure des machines surveillées.

II.4.4.2 Les indicateurs crêtes

Contrairement à la valeur efficace de l'amplitude d'un signal, des indicateurs spécifiques comme le facteur crête est le mieux adapté pour représenter un signal induit par des forces impulsionnelles telles que les écaillages de roulements. Ces indicateurs sont issus des valeurs crêtes du signal temporel mesuré [(Pachaud, 1998)]. Il est possible de distinguer principalement : Le facteur de crête, défini comme étant le rapport entre la valeur crête et la valeur efficace :

$$Facteur\ de\ crête = \frac{Valeur\ crête}{Valeur\ efficace} = \frac{Sup|S(t)|}{\sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} [S(t)]^2}}$$

Le facteur K est défini comme étant le produit entre la valeur crête et la valeur efficace

$$\text{Facteur } K = \text{Valeur crête} \cdot \text{Valeur efficace} = \text{Sup}|S(t)| \cdot \sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} [S(t)]^2}$$

Le facteur **K** est plus sûr pour effectuer une analyse ponctuelle (analyse « spot ») des roulements. Sa valeur est directement liée à l'état du ou des roulements. Contrairement au facteur de crête, le facteur **K** est un indicateur instable.

II.4.4.3 Le Kurtosis

Le Kurtosis vient du mot grec « **Κυρτοσις** » ou Kyrtoisis qui signifie « bosse » qui veut dire aplatissement en français et “convexity” ou “peakiness”, “spikiness” qui est la réduction des pics en anglais [(R.BIGRET, 1994)], ce paramètre a été introduit pour la première fois par le mathématicien Britannique Pearson en 1905 pour comparer une distribution quelconque à la distribution Gaussienne.

Comme le Kurtosis d'une distribution Gaussienne est égale à 3, cette valeur est devenue référence pour évaluer le degré d'aplatissement d'une distribution par rapport à celle normale. Pearson a distingué trois distributions : Mesokurtic, Leptokurtic, et Platycurtic, respectivement pour un Kurtosis égale, supérieur ou inférieur à trois (**3**). Certains mathématiciens utilisent le Kurtosis Exess qui est égal au Kurtosis moins trois (**-3**), et de ce fait le Kurtosis exess d'une distribution Gaussienne est égale à zéro.

Mathématiquement est donné par [(Pachaud, 1998)] :

$$\text{Kurtosis} = \frac{M_4(S(t))}{M_2^2(S(t))} = \frac{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} (S(t) - \bar{S})^4}{\left[\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} (S(t) - \bar{S})^2 \right]^2}$$

Où **M₄** et **M₂** sont les moments statistiques d'ordre 4 et d'ordre 2, **S̄** est la valeur moyenne des amplitudes.

III.6. LE SUIVI PAR DIAGNOSTIC

Diagnostic est un mot du grec « **diagnosis** : connaissance » est l'action d'identifier une maladie (défaut une anomalie) à partir d'une analyse méthodique des symptômes présentés par le malade (la machine) [(A.boulenger, 2003)]. Le diagnostic doit permettre d'identifier avec précision la nature de l'anomalie et si possible d'en préciser la gravité de cette dernière, Alor La philosophie du

diagnostic est donc fondamentalement différente de celle de la surveillance traditionnelle reposant sur le simple suivi d'évolution de l'énergie vibratoire à partir d'un nombre restreint d'indicateurs.

III.6.1 BUT DU DIAGNOSTIC

- Identifier les sources d'anomalies
- Compère l'état des composants
- Optimiser les coûts d'arrêts techniques
- Fiabiliser les outils de la production
- Contribuer à l'amélioration du capital investi dans l'outil de production

III.6.2 OUTILS DE DIAGNOSTIC :

III.6.2.1 L'ANALYSE SPECTRALE (descripteurs du domaine fréquentiel)

Le signal vibratoire est le pouvoir de représenter une vibration en fonction du temps dans une forme exploitable, on a cherché à le représenter dans un diagramme amplitude-fréquence appelé « *spectre* » Elle permet d'identifier avec précision les fréquences des composantes discrètes constituant le signal, d'en quantifier les amplitudes [(A Boulenge, 2009)].

L'analyse spectrale est avant tout la base de tout diagnostic, La qualité d'une analyse spectrale dépend de sa capacité à révéler toutes les fréquences des composantes constituant le signal, composantes qui permettent d'identifier les défauts recherchés.

Pour Une bonne analyse nécessite :

- De choisir une résolution Δf et une bande d'analyse B en adéquation avec la Cinématique de la machine et les images spectrales des manifestations vibratoires Induites par le défaut recherché,
- De ne pas intégrer le signal délivré par le capteur avant d'en calculer le spectre.

Cela n'exclut pas la possibilité a posteriori de quantifier l'amplitude de certaines

Composantes ou familles de composantes en vitesse ou en déplacement,

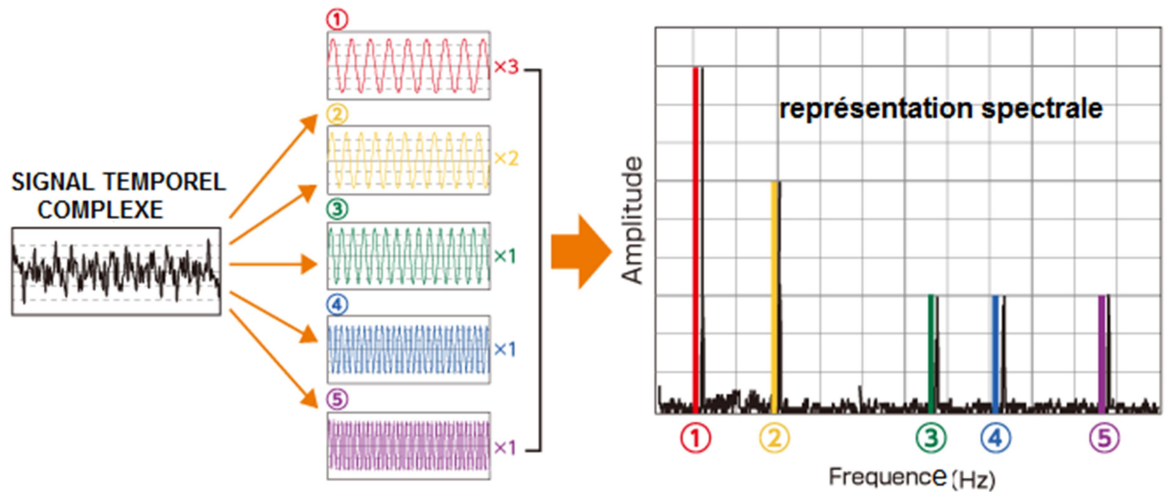


Figure N° 29 : exemple calculé spectrale d'un signal temporel

(www.imv.co.jp)

- D'afficher les amplitudes spectrales en décibels ou avec une échelle logarithmique Et non avec une échelle linéaire.

Enfin aucune bande de fréquences ne peut contenir la fréquence des principales composantes Alor l'opérateur devra faire appel à la technique du zoom FFT.

III.6.2.2 L'ANALYSE DU SPECTRE ZOOM :

L'observation du spectre en fréquences relevé sur le palier défectueux offre une autre possibilité d'analyse. Dans ce cas il faut rechercher les fréquences caractéristiques des défauts. Elles sont calculées en fonction de la vitesse de rotation et des caractéristiques du roulement. Les fréquences résultantes se situent au voisinage des fréquences de rotation, et sont donc chargées de vibrations parasites. Ainsi, ces raies ne deviennent visibles que lorsque le défaut est déjà très avancé. La situation sera plus favorable si en utilisant les zones de résonances de la structure, plus riches en énergie. On obtient un meilleur rapport signal /bruit lorsque l'on s'éloigne des fréquences de rotation.

Une autre méthode intéressante, lorsque l'on ne connaît pas les fréquences caractéristiques de défauts, consiste à surveiller l'évolution du *fond de spectre* dans les domaines de hautes fréquences (on appelle *fond de spectre* silhouette générale formée par les raies non discrètes) La fonction zoom FFT permet de centrer la plage d'analyse B autour de n'importe quelle fréquence f_0 en translatant le spectre de telle sorte que cette dernière devienne la fréquence zéro.

De ce fait, elle permet d'obtenir la résolution Δf souhaitée pour un nombre de lignes spectrales beaucoup plus faible en jouant sur l'étendue de la bande d'analyse B

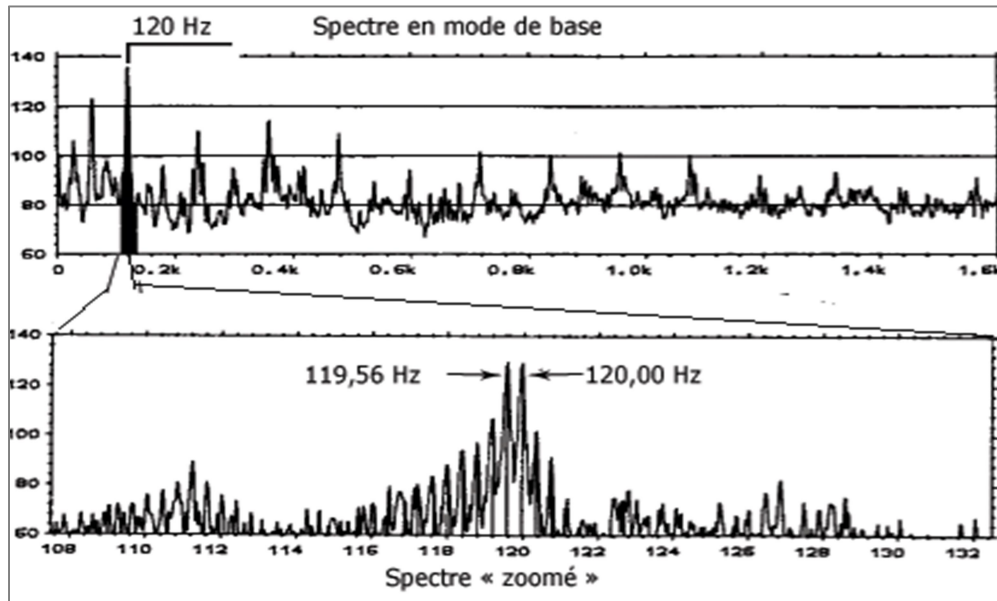


Figure N°30 : Le spectre "zoomé" l'existence d'un bien de deux composantes vibratoires d'amplitude élevée : l'une à deux fois la vitesse de rotation du moteur (119,56 Hz) ; l'autre à deux fois la fréquence du courant d'alimentation mentionné plus haut (120 Hz).

Ne pas confondre :

- **Le zoom graphique**, ou « loupe » qui divise à la fois la bande d'analyse et le nombre de lignes, améliorant ainsi la lisibilité graphique sans modifier la résolution et qui s'avère une fonctionnalité très utile pour examiner un spectre calculé avec un nombre de lignes Très élevé.
- **Le zoom FFT, ou « vrai zoom »** qui permet d'augmenter la résolution d'analyse grâce à une concentration des lignes spectrales dans une bande de fréquences restreinte autour d'une fréquence centrale

III.6.2.3 L'ANALYSE CEPSTRALE :

Cette fonction (transformée inverse du logarithme du spectre) permet, dans un

Spectre de rechercher, d'identifier et de quantifier rapidement toute famille de Composantes périodiques.

Le cepstre est un opérateur mathématique qui associe à un spectre permet d'identifier et quantifier immédiatement toutes les structures périodique (peigne de raies ou famille de bande latérale) contenues dans ce spectre.

Propriété : $\text{Log}(x \cdot y \cdot z \dots) = \log x + \log y + \log z + \dots$

Une vibration être considérée comme le produit d'une force d'excitation $e(t)$ par la réponse impulsionnelle de la structure $h(t)$ au point de fixation du capteur.

$$S(t) = e(t) * h(t)$$

$$F[s(t)] = E(f) * H(f)$$

$$\text{Log}[F(s(t))] = \log E(f) + \log H(f)$$

$$F^{-1}[\log F(s(t))] = F^{-1}[\log E(f)] + F^{-1}[\log H(f)]$$

$$\text{Donc } \|C[s(t)]\| = \|C[e(t)] + C[h(t)]\|$$

Le cepstre d'un signal vibratoire donc être considéré comme la somme de 2 fonctions :

-le cepstre de la réponse impulsionnelle de la structure sur laquelle est fixée le capteur

- une fonction représentant le cepstre des forces d'excitation

Intérêt

Cette technique permet le diagnostic de modulations de nombreux défauts surtout sur des engrenages (desserrages, jeux de palier ou de clavette, écaillage de roulement ou de denture...) même à basse vitesse, le cepstre est un outil puissant de diagnostic, Le cepstre peut être aussi efficacement utilisé comme indicateur de surveillance :

- En tant qu'indicateur scalaire très sensible à l'apparition de peigne de raies constituant les manifestations vibratoires des défauts précités alors que, à cause des effets de masque, l'impact vibratoire énergétique de ce type de défaut peut être souvent très faible donc non détectable par les indicateurs larges bandes couramment utilisés.
- En tant que complément spectral associé à un gabarit.

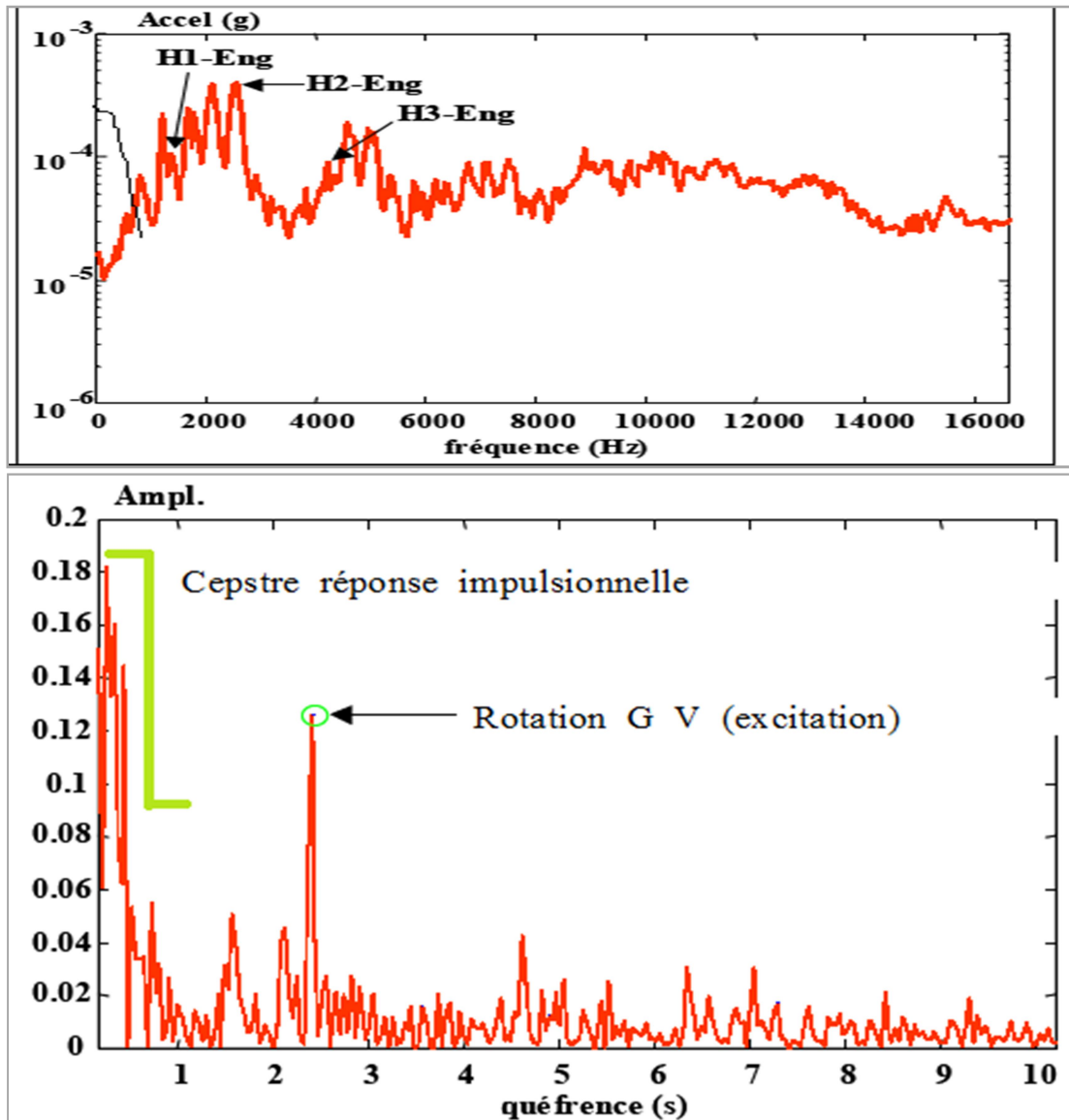


Figure N°31 : Le spectre d'un signal associe avec son cepstre de structure

III.6.2.4 MODULATIONS (Analyse des fonctions de modulations) :

Le suivi d'un signal temporel ou fréquentiel délivré par un capteur sur machine est rarement constitué uniquement de composantes d'amplitudes et de fréquences purement des grandeurs cinématiques. En effet, ces fréquences sont le plus souvent modulées en amplitude ou en fréquence de manière périodique ou aléatoire. L'information la plus intéressante n'est donc pas toujours donnée par l'amplitude ou la fréquence d'une composante cinématique, mais par l'analyse de ses fonctions de modulation. Les phénomènes vibratoires de modulation peuvent être regroupés en deux catégories :

1. Les phénomènes de type chocs dont l'information est portée par la réponse d'un mode propre de structure à une excitation impulsionnelle. Les

fréquences porteuses sont, dans ce cas, indépendantes de la cinématique de la machine et de sa vitesse de rotation. Elles dépendent uniquement des fréquences des modes propres des différents éléments constitutifs (roulements, paliers, engrenages...) et de son environnement proche (châssis, charpente, fondations)

2. Les phénomènes de type sinusoïdal dont l'action induit des variations de

L'amplitude ou de la fréquence d'une composante liée à la cinématique de la

Machine (fréquence de rotation, fréquence d'engrènement, fréquence D'encoches ...) et de ce fait, aux différentes forces dynamiques de même

Nature dont elle est le siège.

III.6.2.5 L'ANALYSE D'ENVELOPPE :

Les forces impulsives induisant par les différents phénomènes de type choc des éléments de la machine avec son environnement proche qui excitent des modes propres des différents éléments constituant la machine. Ces modes répondent sous forme de trains d'oscillations libres et amorties dont les fréquences correspondent aux fréquences propres de ces modes et dont l'espacement correspond à la période de répétition des chocs.

Les fréquences propres de ces modes sont bien sûr indépendantes de la cinématique de la machine. Les informations intéressantes à extraire ne sont pas dans le signal proprement dit mais dans son enveloppe.

Les techniques de démodulation « globale » aussi l'analyse des fréquences de démodulation HFRT (High Frequency Resonance Technic) permet d'identifier les fréquences de répétitions des phénomènes impulsifs excitateurs.

Les fréquences de résonances peuvent être considérées comme des fréquences porteuses dont les amplitudes sont modulées par les défauts. L'enveloppe du signal peut donc représenter les défauts, mieux que son spectre

Sa mise en œuvre se décompose en quatre étapes distinctes :

1. Identification des zones hautes fréquences de concentration de l'énergie
Vibratoire « **bosses spectrales** ».
2. Filtrage passe-bande du signal autour de chaque « **bosse** ».
3. Extraction de l'enveloppe du signal filtré.

4. Calcul du spectre d'enveloppe.

III.6.3 LES ANALYSES COMPLÉMENTAIRES SPÉCIFIQUES

Ces analyses, généralement complémentaires des techniques habituelles précédemment exposées ; suivants les types des machines (machines électriques, ou à vitesse variable ...etc.) lorsque si nécessaire pour mieux affiner le diagnostic

Parmes ces analyse sont :

III.6.3.1 L'ANALYSE DES SIGNATURES DE L'INTENSITÉ DU COURANT(MCSA)

Toute variation du flux du courant d'alimentation d'un moteur se traduit par un courant induit inverse, proportionnel à la variation et de même fréquence. Cette variation peut être due à une fluctuation de couple ainsi qu'à tout mouvement intempestif ou à une mise en vibration du circuit magnétique à l'intérieur du solénoïde constitué par le stator. [(A Boulenge, 2009)].

La méthode AIC ou (SCA) représente un moyen très sensible, sélectif et rentable pour la surveillance à distance d'une grande variété de machines industrielle lourdes Difficiles d'accès (pompes immergées, milieu stérile ou microbien, nucléaire, cryogénie, hautes températures), l'analyse des signaux des courants statoriques peut être capable de détecter, de différencier, et suivre l'état d'avancement des anomalies tels que les défauts des dents d'engrenage, les roulements.

Cette propriété est aussi utilisée pour assurer la surveillance des machines qui cherche à détecter l'apparition de chocs induits par des rattrapages de jeux angulaires ou des fluctuations de couple sans devoir arrêter les machines de qui sont de nature lourd, en effet, l'analyse des signaux des courants statoriques peu :

- fournit la capacité de surveillance non intrusive sur un site distant à l'équipement de mesure.
- offre une grande sensibilité à une variété d'anomalies électromécaniques affectant les installations opérationnelles.
- peut être réalisée rapidement par un personnel relativement peu qualifié en utilisant des équipements peu coûteux.
- Est également applicable à des machines (AC et DC) de grande puissance.

[(A, 2015).]

L'analyse de la signature des courants statoriques peut être donc réalisée à l'aide de plusieurs techniques telles que la représentation dans le repère DQ, l'analyse spectrale et la décomposition en ondelette.

Analyse spectrale des courants : Les signaux de courant moteur peuvent être obtenus à partir des sorties des capteurs de courant qui sont placées d'une manière non intrusive sur l'un des fils d'alimentation. Ces signaux sont ensuite analysés afin de présenter les indicateurs de défauts à détecter, Les techniques de traitement du signal à mettre en œuvre dépendent dans leurs modalités de la grandeur physique analysée (intensité du courant, vitesse de rotation) et du type de moteur (CC ou AC). Elles reposent essentiellement sur l'analyse du spectre et

Sur la démodulation de composantes. [[Torsional_Vibration_Effects_on_Induction](#)]

Dans le cas d'un moteur à courant continu, le traitement du signal consiste en une analyse spectrale basses fréquences dont l'étendue et la résolution se définissent à partir du fichier cinématique de la machine et en une démodulation de l'amplitude et de la fréquence de la composante de GRAËTZ.

Dans le cas d'un moteur alternatif, le traitement consiste en un filtrage passe bande du signal autour de la composante principale du courant et en une démodulation de l'amplitude et de la fréquence de cette dernière. [[A Boulenge, 2009](#)]

III.6.3.2 L'ANALYSE DES DÉPHASAGES

Les différentes méthodes et transformation du fourrier ne donne aucune information sur les déphasages entre composantes. Cela signifie que des phénomènes se produisant à la même fréquence mais en des temps différents seront confondus dans le spectre, par exemple, sera identique pour la dégradation d'un pignon de réducteur, que celui-ci ait une ou plusieurs dents cassées (à moins qu'il y ait une symétrie de défauts), On appelle « déphasage » l'écart temporel entre deux signaux sinusoïdaux de même fréquence, écart que l'on exprime le plus souvent en degré ou en fraction de tour

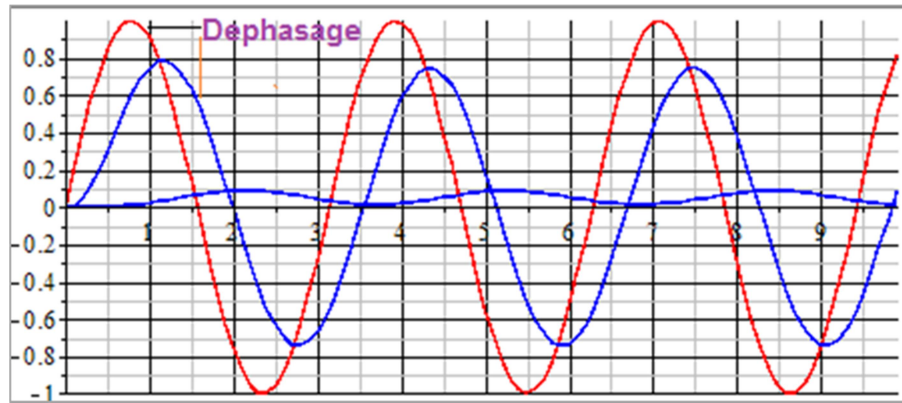


Figure N° 32 : Exemple d'un déphasage

Ce déphasage, qui renseigne donc sur le décalage de deux phénomènes ou sur le décalage entre la manifestation de ce phénomène et sa réponse au point de mesure, se détermine généralement analogiquement

Avec un phasemètre ou se calcule numériquement généralement à partir de l'inter spectre entre deux signaux, l'inter spectre se définissant comme le produit de la transformée de Fourier du premier signal par le conjugué de

La transformée de Fourier du second.

a. ANALYSE DES ORBITES CINÉTIQUES

Une vibration est une grandeur vectorielle au même titre que la force dynamique qui la génère. Il est donc important de connaître le mouvement vibratoire d'un point dans l'espace, au moins dans un plan radial par rapport à l'axe de rotation, c'est-à-dire de pouvoir observer l'orbite du mouvement de l'arbre.

Le tracé d'une orbite se fait pratiquement à l'aide des capteurs sans contact (des sondes sur le principe des courants de Foucault) et consiste à créer une courbe de Lissajous à partir de deux signaux issus de deux capteurs fixés sur un palier selon deux directions radiales orthogonales, L'orbite cinétique contient toutes les informations concernant les vibrations relatives d'arbre ou de façon détailler

La forme de l'orbite, qui donne alors des informations très précises sur la nature du défaut dépend du déphasage des signaux délivrés par les deux capteurs

Pour un signal sinusoïdal les réponses sur les questions suivant :

- Le tracé de l'orbite à l'ordre 1 de la fréquence de rotation est-il circulaire

Ou elliptique, faiblement excentré ou elliptique quasi rectiligne ?

- Axialement, les quatre points cardinaux d'un palier vibrent-ils en phase où En opposition de phase deux à deux ?
- Pour une direction de mesure donnée, deux paliers consécutifs se déplacent-

Ils en phase ou en opposition ?

Permettent d'affiner un diagnostic de balourd (balourd statique, balourd dynamique...), de défaut de lignage, de déformation de ligne d'arbres, de charge directionnelle...etc. [(A Boulenge, 2009)].

Dans le cas où le signal n'est pas sinusoidal mais présente un taux de distorsion harmonique élevé, les formes des orbites peuvent devenir beaucoup plus complexes présentant des boucles ou des points de rebroussement.

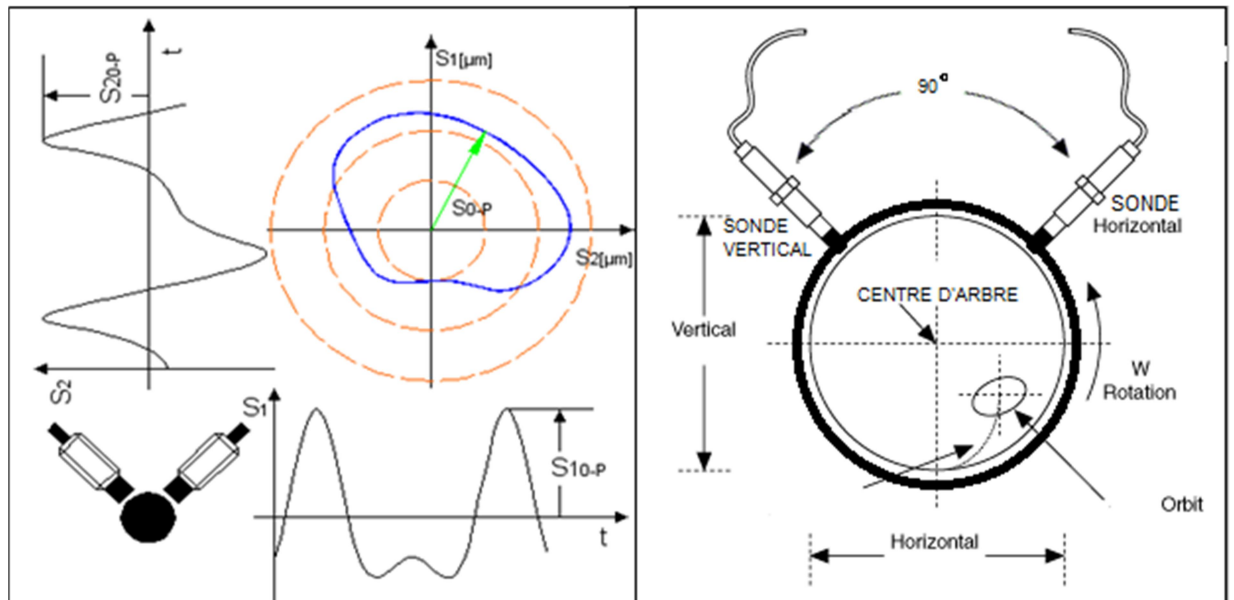


Figure №33 : mesures des orbites cinétiques d'un mouvements d'arbre (SONATRACH-FORMA).

b. Analyse modale des structures (ODS)

L'ODS ou l'analyse la déforme opérationnelles de la structure C'est une technique de visualisation de mouvement vibratoire d'un système sous les conditions de fonctionnement, ce dernier peut être décomposé en un grand nombre de systèmes masses ressorts à un degré de liberté en parallèle, caractérisé chacun par sa fréquence d'oscillations libres, et qu'il existe un décalage entre l'application d'une force dynamique et la réponse de chaque système, lorsque la fréquence d'excitation est au-

dessus à la fréquence propre C'est cette propriété qui est souvent utilisée pour statuer sur

[(mouhamed, 2012)]

L'existence réelle d'un mode et pour analyser le comportement vibratoire de l'ensemble d'une machine et de sa structure support.

En peut effectuer cette opération en marche ou à l'arrêt selon des maillages prédéfinis de la structure.

En marche, les forces d'excitation sont internes à la machine. On mesure à l'aide d'un capteur tri axial le mouvement relatif de chaque nœud du maillage par rapport à un point fixe de référence. Un logiciel d'analyse de déformées calcule automatiquement les transferts vibratoires de chaque nœud par rapport au point de référence et permet de tracer pour chaque fréquence excitatrice, la déformée opérationnelle de la machine et des structures qui lui sont liées (châssis support, tuyauterie...).

À l'arrêt, chaque nœud du maillage est excité à l'aide d'un marteau de chocs (Marteau instrumenté d'un capteur de force) et le point de référence est

Équipé d'un capteur dans les trois plans. Un logiciel calcule pour chaque point du maillage le transfert force/vibration et extrait automatiquement les différentes fréquences de résonance à partir d'un test automatique de cohérence et de rotation de phase, permettant de tracer la déformée modale associée à chaque fréquence propre identifiée.

L'analyse de ces deux déformées (en marche et à l'arrêt) apporte des éléments essentiels pour la formulation d'un diagnostic. [(A Boulenge, 2009)].

III.6.3.3 LES TECHNIQUES D'ANALYSE POUR DES CAS DES MACHINES À RÉGIME VARIABLE

Toutes les machines ne fonctionnent pas à vitesse ou charge constantes (ce qui rend très difficile l'interprétation des évolutions d'éventuels indicateurs de surveillance périodique). Il est cependant bien souvent nécessaire de connaître avec précision les zones de fonctionnement critiques de ces machines, soit pour exclure ces zones des plages d'exploitation, soit pour en tenir compte au niveau des seuils de surveillance. Deux cas de figures sont à considérer :

a. La vitesse de rotation est constante mais la charge varie :

Le tracé des diagrammes « **indicateur/charge** » à vitesse de rotation constante peut être réalisé très simplement en faisant varier par palier un à un certain paramètre représentatif de la charge et en notant manuellement les valeurs.

La vitesse de rotation étant quasi constante, le calcul de la transformée de Fourier avec une résolution fréquentielle suffisante ne pose aucun problème particulier, Certains systèmes d'acquisition disposent de fonctionnalités permettant le tracé automatique de tels diagrammes. Un signal électrique lié à une grandeur représentative de la charge déclenche automatiquement une acquisition et le traitement adapté à chaque variation positive ou négative.

C. La vitesse de rotation varie :

Plusieurs techniques peuvent être utilisées et sont disponibles avec certains produits :

- **Le moyennage spectral instantané ou « Peak Hold »** Procédé de calcul d'un spectre à partir de spectres instantanés, calculés à partir de blocs temporels acquis les uns à la suite des autres avec un taux de recouvrement le plus élevé possible (□75%). L'amplitude de chaque ligne spectrale du spectre résultant correspond à l'amplitude la plus élevée de la ligne de même rang des spectres instantanés.

- **Le spectrogramme** :il existe deux types :

1. **Le spectrogramme par TFRCT ou STFT** (transformation de Fourier rapide à court terme).

2. **Le spectrogramme TFR ou FFT** (par échantillonnage angulaire et transformée de Fourier rapide).

L'intérêt des méthodes d'analyse de variation de vitesse basées sur le spectrogramme est de permettre l'extraction d'ordres, c'est-à-dire le tracé de l'évolution de l'amplitude de chaque ordre de la fréquence de rotation en fonction de cette dernière (figures 4.32 b et c). Ces tracés permettent de connaître non

Seulement les fréquences de différents modes excités mais aussi de savoir quels sont les ordres des composantes qui les excitent alors que le moyennage spectral instantané « Peak Hold » ne donne aucune information sur l'origine de l'excitation et sur l'amplitude de la réponse du mode à cette dernière.

III.6.3.4 L'ANALYSE TEMPS-FRÉQUENCE

Dans le traitement du signal, l'analyse temps-fréquence comprend des techniques qui étudient simultanément un signal dans les domaines temporels et fréquentiels en utilisant les différentes représentations temps-fréquence.

En pratique l'intérêt de l'étude temps-fréquence est que l'analyse par la transformée de Fourier classique suppose que les signaux sont infinis dans le temps, tandis que la majorité des signaux en pratique sont de courte durée et changent considérablement au cours de cette durée.

Cette technique dérivée de l'analyse synchrone permet de visualiser en trois 3D dimensions des phénomènes cycliques à fréquence variable, à travers une de plusieurs Transformations connues tels que la transformée de Fourier à court terme (TFCT), La Transformée en ondelettes et la transformée de Wigner Ville (TWV).

III.7 LA CHAÎNE DE MESURE

Une chaîne de mesure de vibrations doit comprendre les étapes suivantes :

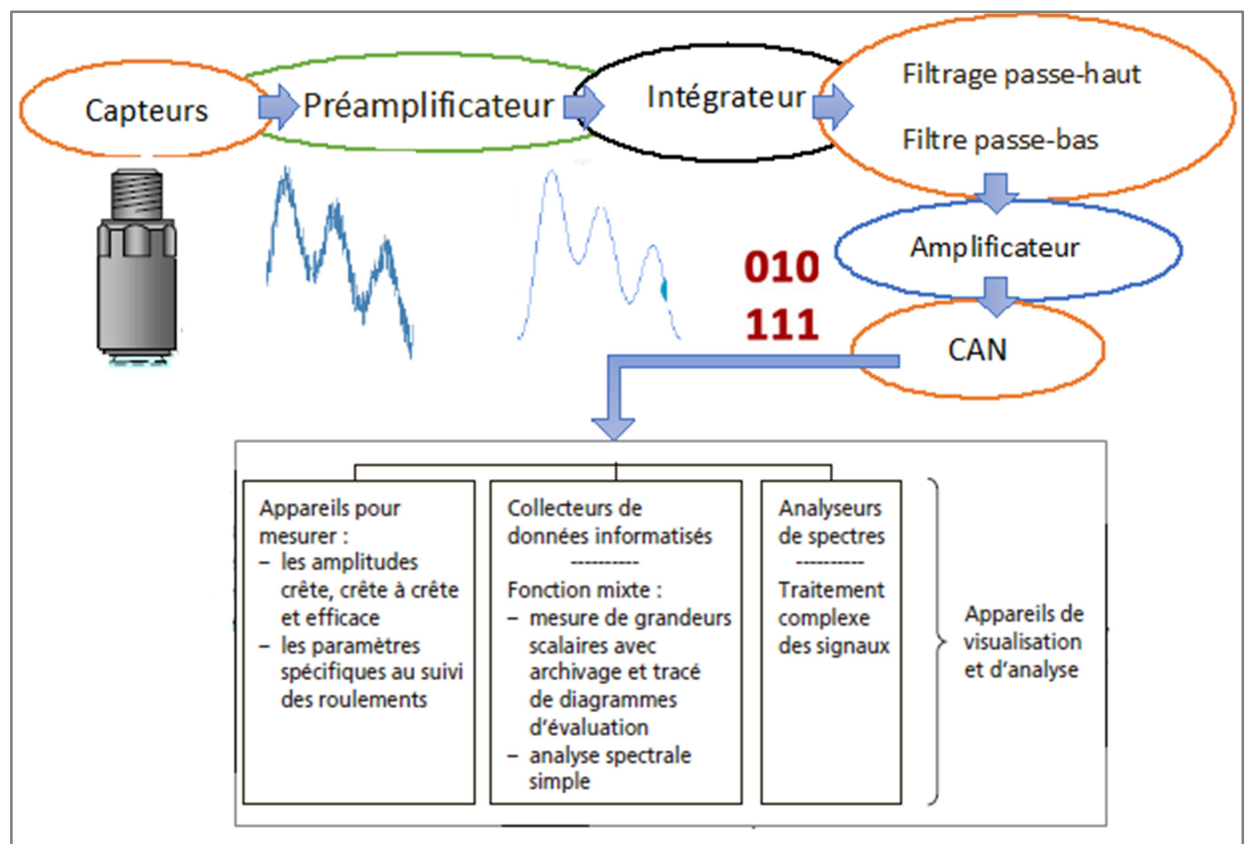


Figure N°34 : la chaîne de mesures d'un capteur

1. Spécifier la grandeur vibratoire qu'en veut mesurer :

Déplacements vitesse ou accélérations etc....

2. Transformer la vibration mécanique en un signal électrique :

(C'est le rôle du capteur)

3. Conditionner le signal de sortie du capteur pour le rendre exploitable et transportable : (C'est le rôle du préamplificateur.)

4. Intégrer le signal. Transformer si nécessaire le signal délivré par un accéléromètre en un signal représentant la vitesse ou le déplacement).

5. Limiter la plage de fréquences du signal :

C'est le rôle des filtres passe-haut, passe-bas, ou passe-bande, à fréquences de coupure fixes ou réglables par l'utilisateur.

6. Amplifier de nouveau le signal obtenu :

Cette amplification permet d'adapter la gamme dynamique d'entrée du convertisseur pour avoir la meilleure qualité de signal sans le tronquer.

7. Numériser le signal :

C'est le rôle du convertisseur analogique/numérique (CAN) qui transforme le signal en données numériques

III.7.1 Les capteurs de vibration :

Le capteur, quelle que soit la nature du signal qu'il délivre (accélération, vitesse, déplacement...) constitue le premier maillon de la chaîne de mesure. Sa fonction est de transformer le mouvement vibratoire en un signal électrique, Les capteurs utilisant ces principes peuvent être *actifs* ou *passifs*. Les capteurs actifs ne nécessitent pas d'alimentation, alors que les capteurs passifs ne

fonctionneraient pas sans source d'énergie auxiliaire.

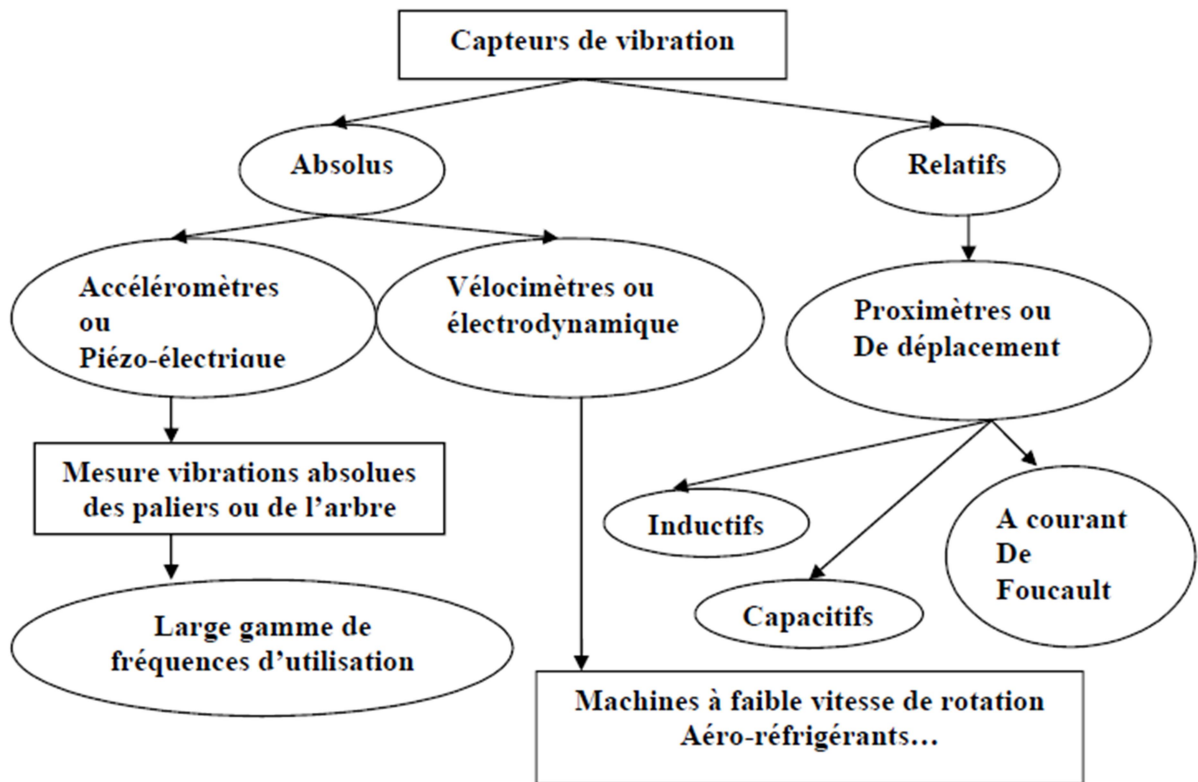


Figure №35 : l'organigramme de capteurs de vibration

Un capteur se caractérise principalement par :

La bande passante : est la plage de fréquences de laquelle le capteur permet de à mesurer Avec une précision exemple [3-8 000 Hz].

La dynamique : C'est le rapport entre la plus petite et la plus grande valeur d'amplitude mesurable du capteur sans distorsion du signal ni bruit de fond.

La sensibilité : C'est la relation qui lie la grandeur sortie électrique délivrée par le capteur et grandeur d'entre ou le mode physique Exemple 10 pico-coulombs par g ou 10 millivolts par μm).

Sa tenue en température : la température peut sensiblement modifier la sensibilité du capteur et même dans le cas d'un capteur piézoélectrique

En doit désigner la plage de températures qui 'influencer sur les capteurs.

Ses grandeurs d'influence : designer les grandeurs d'influence sur les mesures du capteur.

III.7.1.1 capteur de déplacements (sonde de proximité)

Aujourd'hui, le prosimètre le plus utilisé pour la surveillance de machines est le capteur inductif à courants de Foucault, Ces capteurs sont utilisés principalement sur les paliers lisses des turbomachines. Ils permettent de mesurer le déplacement relatif de l'arbre par rapport au palier.

Un oscillateur envoie un signal d'amplitude constante à très haute fréquence au capteur. Le signal, appelé signal porteur, produit un champ magnétique en passant au travers de la petite bobine située à l'extrémité du capteur, L'arbre situé à proximité absorbe une partie de l'énergie du champ magnétique qui, à son tour, produit une réduction proportionnelle de l'amplitude du signal porteur.

Plus l'arbre se rapproche du capteur, plus l'amplitude du signal s'en trouve affectée. La modulation du signal porteur traduit donc l'importance du déplacement relatif de l'arbre par rapport au palier. Le signal est ensuite

Démodulé et la vibration est mesurée.

Avantages

- La mesure directe du mouvement de l'arbre ;
- Mesure sans contact avec palier ;
- La mesure faite directement en unités de déplacement ;
- **Le fonctionnement jusqu'à des fréquences extrêmement faibles.**

Inconvénients

- Mauvaise qualité du signal occasionnée par la présence d'irrégularités à la surface des arbres ;
- L'installation minutieuse requise ;
- La très faible gamme dynamique du capteur (la gamme dynamique est le rapport de l'amplitude la plus élevée à l'amplitude la plus faible qui puisse être mesurée) qui est de l'ordre de 100/1 ;

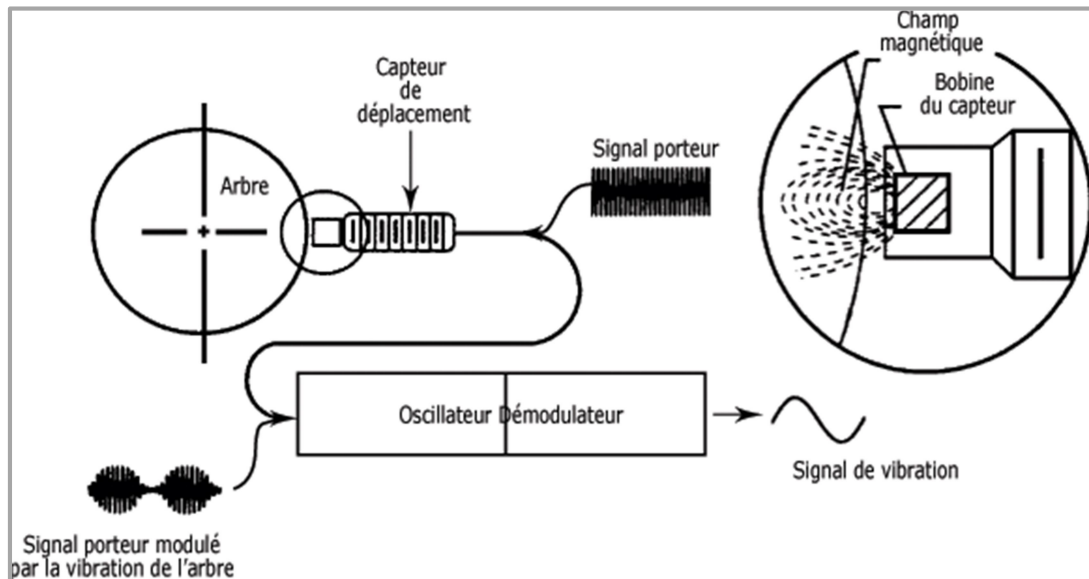


Figure N°36 : Principe de fonctionnement d'un capteur de proximité (AIDE-VIBRA).

III.7.1.2 Les vélocimètres

Les capteurs de vitesse ou vélocimètres sont constitués d'une sonde à contact dite **sonde sismique** qui mesure le mouvement absolu de l'organe sur lequel elle est fixée. Les vélocimètres les plus courants sont constitués d'une masse sismique reliée au boîtier par un ressort et solidaire d'une bobine qui se déplace dans un champ magnétique permanent créé par un barreau aimanté ; Le mouvement de la bobine, induit par la vibration du palier sur lequel est fixé le capteur, génère une tension proportionnelle à la vitesse du mouvement de la bobine.

Avantages : Facile à installer, Avec une très bonne sensibilité, Son alimentation de l'extérieur

Inconvénients : relativement lourd et encombrant, la bande passant est limité en (10-1000 HZ) s'influer pas les pièces mobiles e sensible aux champs magnétique

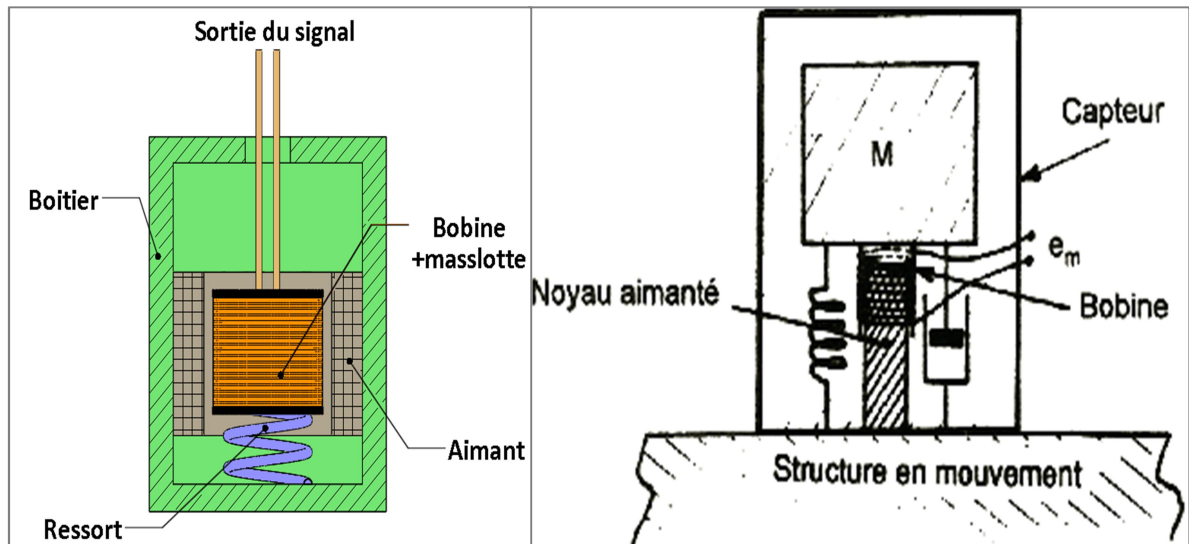


Figure N° 37 : Principe de fonctionnement d'un capteur vélocimètre (Doc- Bruel et Kjaer)

III.7.1.3 Les accéléromètres

Les accéléromètres **piézoélectriques** tendent à devenir les capteurs de vibrations

Absolues les plus utilisés pour la surveillance des machines, Leur principe de fonctionnement repose sur la propriété des matériaux piézoélectriques de générer une charge électrique proportionnelle à la contrainte de compression ou de cisaillement subie. Schématiquement (figure), un accéléromètre est composé d'un disque en matériau piézoélectrique qui joue le rôle d'un ressort sur lequel repose une masse sismique précontrainte, Quand la masse se déplace sous l'effet d'une accélération, elle exerce sur le disque piézoélectrique des contraintes, induisant à la surface de ce dernier une charge électrique proportionnelle à cette accélération.

Selon la direction de travail de l'élément piézoélectrique à l'intérieur du capteur, il existe un capteur à compression ou de capteur à cisaillement, plus sensible aux forces multidirectionnelles susceptibles de l'actionner.

Critères de choix d'un accéléromètre :

Les particularités de l'installation surveiller, concernant l'environnement des machines comme un fort champ électromagnétique, une température excessive, une zone à risque d'explosion (qui nécessite des capteurs antidéflagrants), le choix d'un accéléromètre sera déterminé :

- Par sa bande passante qui doit être en adéquation avec la cinématique de l'installation surveillée entre $3f_r < \text{bande passante} < 200f_r$.

- Par sa sensibilité qui devra être en adéquation avec la typologie vibratoire
Susceptible d'être induite par chaque machine

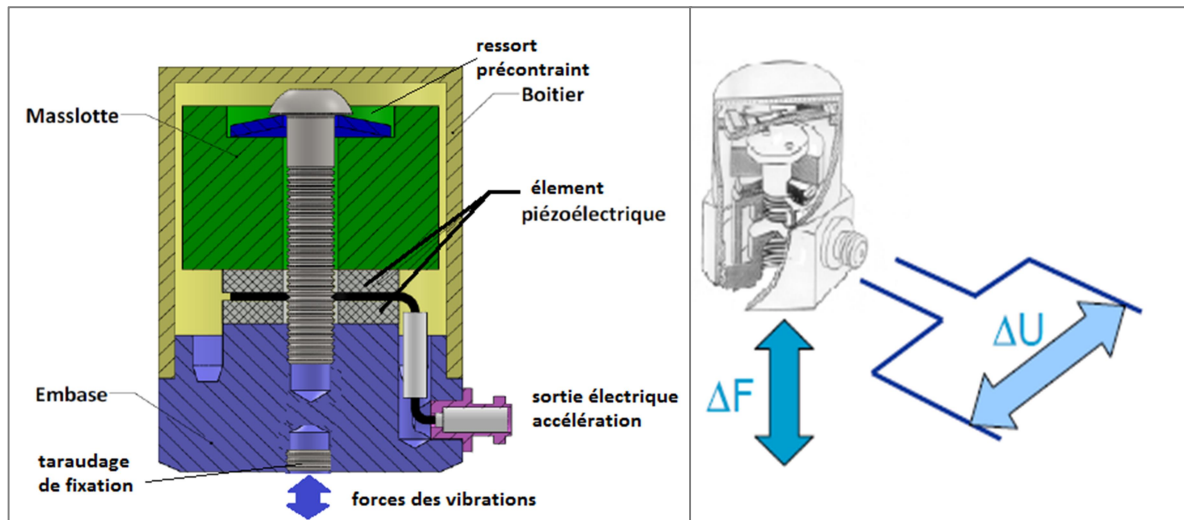


Figure N°38 : Principe de

fonctionnement d'un accéléromètre (Documentation Bruel et Kjaer)

Effet piézoélectrique :

$$\left. \begin{array}{l} Q = k \cdot p \\ P = F/S \end{array} \right\} \rightarrow Q =$$

$$F = M \cdot a$$

Avec :

Q : charge électrique générée par l'effet piézo-électrique [PC]

P : pression exercée sur la céramique [N/m²]

F : Force exercée sur la céramique [N]

S : Surface de contact entre la masse sismique et la céramique [m²]

M : Masse sismique [kg]

a : Accélération du capteur [m/s²]

k : Constante [PC/N/m²]

K : Facteur de transmission [PC/m/s²]

Avantages des accéléromètres :

- L'étendue de la bande passante,
- Une gamme dynamique très étendue
- L'obtention de la vitesse vibratoire et du déplacement par intégration
- Une excellente précision sous des différents conditions environnementales,
- Une excellente fiabilité dans le temps puisqu'aucun élément n'est mobile,
- Un grand rapport sensibilité/masse.

Inconvénients :

- Haut impédance
- Principalement la forte dépendance de sa bande passante avec la rigidité de

Sa liaison avec la surface vibrante,

- Nécessite des préamplificateurs, ou adaptateurs d'impédance.

III.7.1.4 l'emplacement des capteurs et mode de fixation

Il serait souhaitable de réaliser les mesures de vibrations selon les trois directions possibles deux directions radiales (RH et RV) et une autres sur l'axial (Ax).

Et en choisissant la fixation des capteurs sur les paliers pour une installation de plusieurs paliers voire (*Figure.Nº*)

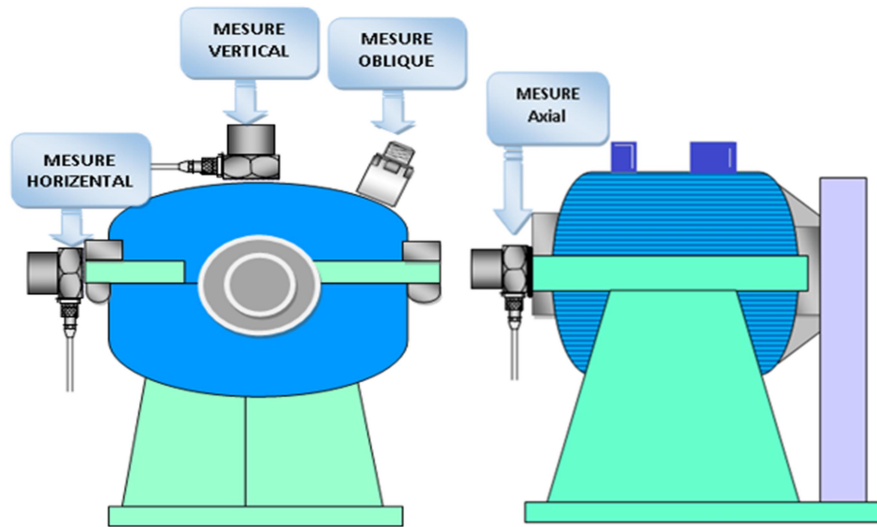


Figure.Nº39 : l'emplacement des capteurs

Les mode fixation : des capteurs sur les paliers ou sur la surface de mesure est l'un des facteurs le plus critique pour l'obtention de résultats exacts à partir de

Mesures des vibrations pratiques, il y a plusieurs types de fixation tel que fixation a goujon, a Collage direct, fixation a aimant et a point de touche, notons que plus

la fixation est rigide plus la réponses s'élargit vers les hautes fréquences

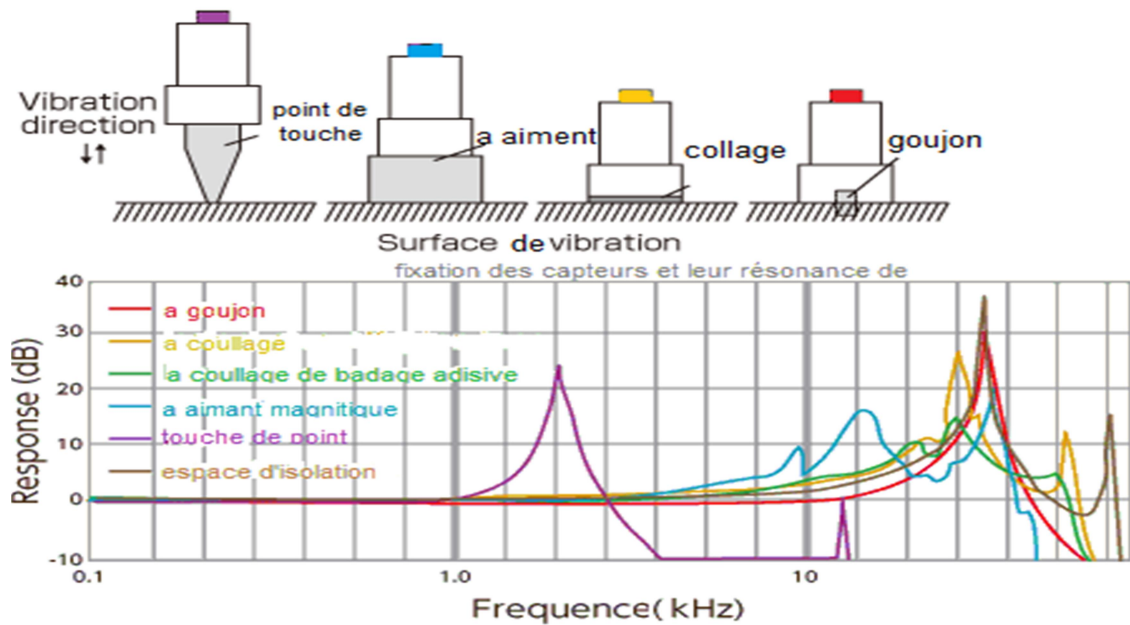
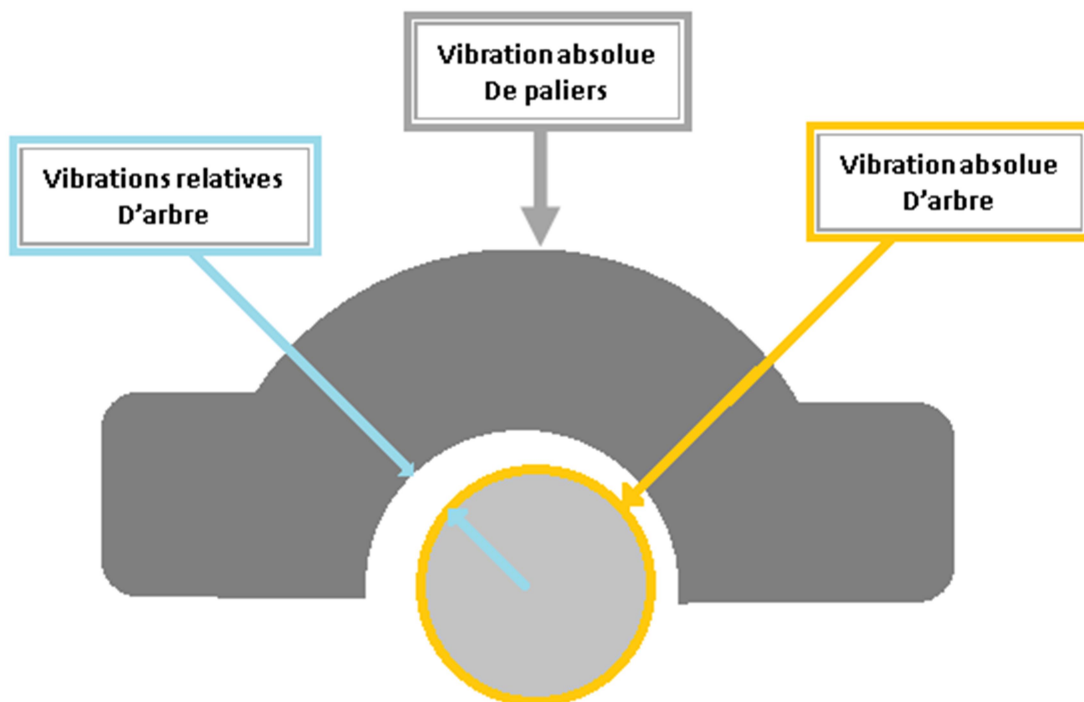


Figure N° 40 : exemple des modes de fixation des accéléromètres et leurs résonances

III.7.2 les types de mesures suivants la nature de vibrations

Dans une machine tournante les vibrations se transmettent du rotor aux structures à travers les liaisons qui peuvent être les roulements ou les



paliers alors que les vibrations seront donc mesurées au niveau du paliers, en distingue trois types de vibrations ; les vibrations relatives d'arbres, les vibrations absolues d'arbres et les vibrations absolues des paliers.

Figure N° 41 : les différents types de mesures vibratoires

III.7.2.1 mesures du vibrations absolues du palier

Les vibrations absolues des paliers sont les vibrations qui apparaissent à la surface de la machine, et plus particulièrement sur les paliers et généralement la mesure de se jorne de vibration décrite l'état globale ou mesures globales qui est selon les normes basé sur les valeurs efficace.

III.7.2.2 mesures du vibrations relatives d'arbre

On entend par vibrations relatives d'arbre les mouvements rapides de l'arbre par rapport à ses paliers. Elles représentent les réactions du rotor aux forces alternatives agissant sur lui. Par exemple, un rotor balourdé est le siège de vibrations d'arbre : son centre de masse se déplace sur une orbite appelée « ORBITE CINETIQUE ».

III.7.2.3 mesures du vibrations absolues d'arbre

Il est évident que des rotors légers tournant dans une structure très rigide et très lourde ne produiront que des vibrations de paliers faibles. C'est le cas de la plupart des compresseurs rotatifs. Par contre, les mouvements relatifs de l'arbre par rapport aux paliers lisses seront importants. L'amplitude des vibrations relatives d'arbre sera supérieure aux vibrations absolues des paliers dans un rapport variant entre 10 et 50. Dans ce cas, il conviendra de surveiller les premières.

Lorsque la masse du rotor augmente, dans une même structure, le rapport entre vibrations relatives d'arbre et vibrations absolues de paliers change, Il est toujours utile ici de mesurer les vibrations relatives d'arbre, mais il est sage aussi de surveiller les vibrations absolues de paliers, De cette manière, on peut connaître parfaitement le comportement vibratoire de la machine, Dans le cas de très grosses machines, comme par exemple les turbomachines de production d'énergie de grande puissance, le rapport entre la masse du rotor et celle des paliers augmente encore. Les vibrations absolues de paliers peuvent alors devenir aussi grandes que les vibrations relatives d'arbre, Dans ce cas, on mesure de préférence *LES VIBRATIONS ABSOLUES D'ARBRE*.

Les vibrations absolues d'arbre sont la somme vectorielle des vibrations relatives d'arbre et absolues de paliers dans une direction radiale donnée.

III.7.3 interprétations des mesures

Généralement en travaille **avec le suivi de tendance**, Pour les mesures globales à une intervalles de temps réguliers, par exemple une fois par mois, et l'on établit un suivi en fonction de temps. Il est ainsi possible d'établir une référence considérée comme *bon état*. Si, au fil du temps, on s'écarte de cette valeur, on peut diagnostiquer un début de dégradation. Il est impératif dans cette méthode de prendre des mesures tout à fait comparatives.

Pour les utilisateurs d'un nombre important de machines du même type, il existe une autre méthode. On utilise les mesures sur tous les paliers dans des conditions d'utilisation similaires. On en déduit une valeur moyenne. Les mesures qui s'écartent trop de cette valeur moyenne laissent supposer des défauts. Grâce à cette technique, on va pouvoir fixer des seuils, qui pourront servir par exemple de critères d'acceptation lors de la réception d'une machine.

III.7.4 Les appareils de mesure, de collecte et d'analyse

III.7.4.1 Les appareils de mesure d'indicateurs scalaires larges bandes

Ce type d'appareils permet de mesurer l'amplitude efficace du signal vibratoire

(Accélération et/ou vitesse) dans plusieurs plages fréquentielles comprenant

Souvent une plage réservée à la mesure d'un indicateur sensible à la présence

De défauts de type impulsif, Ces appareils équipés de filtres programmables,

D'intégrateurs, et d'un écran d'affichage et ils peuvent se présenter sous forme :

- Un module de surveillance à poste fixe destiné à la surveillance en continu
- De simples appareil portatifs dont certains peuvent également être

Équipés d'un capteur de température infrarouge et d'un tachymètre

L'utilisation de ce type des appareils est très simple mais avec pour inconvénients

Talque parfois pour certains paliers la prise de mesure impossible ou dangereuse

Aussi la mauvaise reproductibilité des mesures a cause la non-maîtrise de

La rigidité de la liaison du capteur avec le palier lorsque le capteur est tenu à la main. (F.YACINE, 2006)

III.7.4.2 Collecteur et analyseurs de signaux

Les capteurs de vibration convertissent le mouvement de vibration d'une machine en un signal électrique. Cependant, ce signal en forme brute est inutile à moins qu'il ne soit conditionné pour fournir des informations significatives reflétant l'état mécanique de la machine. Ainsi, on a besoin d'un collecteur analyseur de vibration qui peut collecter un signal électrique d'un capteur et le transformer en données

Significatives, pour la plupart d'entre eux, des fonctions d'analyses spectrales et d'analyses de signaux plus ou moins complexes. De plus, grâce à une gestion informatisée des données, il a rendu possible la surveillance périodique d'un grand nombre de machines. (A Boulenge, 2009)



FigureN° 42 : collecteur analyseur de vibration (Documentation Bruel et Kjaer)

III.7.5 Base de données et logiciel de surveillance vibratoire

Le Collecteur de vibration recueille et stocke une quantité limitée de données. Donc, ces informations doivent être téléchargées à un ordinateur pour former un historique de mesures vibratoire sur les différentes machines. Pour

exécuter les susdites tâches et aider aussi dans la collecte, la gestion et l'analyse de données des machines, on a besoin d'un progiciel de surveillance vibratoire. Ces programmes de gestion de données pour la maintenance des machines tournantes stockent des données de vibration et font des comparaisons entre des mesures récentes, des anciennes mesures et les seuils prédéfinies d'alarme. Les mesures transférées au logiciel d'analyse de vibration sont rapidement examinées pour des écarts (déviations) de conditions normales. Niveaux globaux de vibration, Spectres, signal temporelle et d'autres paramètres sont produits pour aider analyser ces changements de vibration. On peut aussi générer des rapports montrant les machines qui ont une vibration excessive dépassant les seuils d'alarme.

III.8 les normes vibratoires et seuils de jugement :

Les normes les plus utilisées dans le cadre de la maintenance vibratoire des machines tournantes de façon périodique (offlines) sont les suivantes :

- Norme ISO 10816 qui remplace les normes
Norme ISO 2372
Norme AFNOR E90-300

Ces normes ont pour objectif d'établir des directives générales pour le mesurage et l'évaluation des vibrations mécaniques prises sur les parties non tournantes des machines (si rotor rigide) et ainsi caractériser leurs conditions de marche en ce qui concerne un fonctionnement sans incident et leur influence sur les machines adjacentes.

Niveaux vibratoires		Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV
Amplitude efficace de la Vitesse Vibratoire (mm/s rms)	28 18 11.2 7.1				
Bande passante adaptée au type de la machine	4.5 2.8 1.8 1.12 0.71 0.45	4.5	7.1 2.8 1.12	4.5 1.8	18 7.1 2.8
		D C B A	D C B A	D C B A	D C B A

Tableau N°03 : normes vibratoires ISO 20816

GROUPE I

Éléments de moteurs ou de machines qui, dans leurs conditions normales de

Fonctionnement, sont intimement solidaires de l'ensemble d'une machine (par

Exemple moteurs électriques produits en série, puissance jusqu'à 15 kW).

GROUPE II

Machines de taille moyenne (en particulier moteurs électriques de puissance comprise entre (15 et 75 kW) sans fondations spéciales. Moteurs montés de façon rigide ou machines (puissance jusqu'à 300 kW) sur fondations spéciales.

GROUPE III

Moteurs de grandes dimensions et autres grosses machines ayant leurs masses tournantes montées sur des fondations lourdes et relativement rigides dans la direction des vibrations.

GROUPE IV

Moteurs de grandes dimensions et autres grosses machines ayant leurs masses tournantes montées sur des fondations relativement souples dans la direction des vibrations (par exemple groupes turbogénérateurs, particulièrement ceux qui sont installés sur des fondations légères).

III 8. 1 Seuils de jugement :

La norme propose pour chacun des quatre premiers groupes des seuils de jugement qui déterminent les domaines suivants :

- zone A Bon
- zone B Admissible
- zone C Encore admissible
- zone D Inadmissible

III 8.2 Choix des seuils vibratoires :

III8.2.1 Seuils de vitesse vibratoire :

Selon la norme **ISO 10816** l'intensité vibratoire est la plus grande des mesures en vitesse vibratoire efficace dans la gamme de fréquences (**10-1000 Hz**) sur chaque palier, support et bride dans les trois directions perpendiculaires entre elles (horizontales, verticales et axiales).

La norme propose pour chacun des quatre premiers groupes des seuils de jugement qui déterminent les domaines suivants : bon, admissible, encore admissible, inadmissible.

III.10 Conclusion

Nous avons présente dans ce chapitre des notions de base concernant les vibrations aussi les différentes méthodes de surveillances et la démarche qui en peut suivie pour attendre les résultats nécessaires de diagnostic a fin de maitrisé

La maintenance conditionnelle basée sur l'analyse vibratoire par des indicateurs

Ou par diagnostic suivant les techniques de surveillance associées à chacun.

Il faut dire que la surveillance et diagnostic la seule de détecter pratiquement tous les défauts susceptibles d'apparaître dans les machines ou les systèmes électromécaniques Ces défauts se traduisent par une variation des efforts internes que subit la machine, et donc à une modification de son comportement vibratoire (changement de sa signature vibratoire).

En fin en a présenté de façon général les notions de base de traitement de signal

Aussi les différents technique et les étapes pour visualiser un spectre suivant un signal délivré par un capteur tel qu'amplification, filtrage, échantillonnage etc.

Pour avoir un meilleur diagnostic suivant l'utilisations des théories de traitement de signal et vibrations il faut étudier de façon plus détailler les différentes images vibratoires des défauts selon les déférents applications ou mesures et c'est le but de prochain chapitre.

IV.1 INTRODUCTION

La première démarche d'une action de surveillance ou diagnostic des systèmes électromécaniques est de demander quels sont les symptômes vibratoires associés à chaque défaut susceptible de se rencontrer sur la machine à surveiller, pour avoir l'identification d'anomalies à un stade précoce, et suivi de leurs évolutions.

La seconde concerne et les manifestations de ces défauts, c'est-à-dire, quelles informations, quels paramètres descripteurs du défaut faut-il élaborer et mesurer pour disposer des bonnes informations qui permettront la décision si la situation est normale ou non, aussi celles qui permettront de trouver ultérieurement l'origine et la gravité des défauts.

IV.2 LES DEFAUTS DES SYSTÈMES ÉLECTROMÉCANIQUES

Les défaillances susceptibles d'apparaître sur les machines les systèmes industriels ou systèmes électromécaniques peuvent être d'origines diverses, électriques, mécaniques, magnétiques ou bien encore différents tel que pneumatiques, hydrauliques, Leurs origines sont diverses et peuvent être représenté comme suit [110]

- *Les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts* : surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), survoltage d'alimentation, problème d'isolation électrique, usure des éléments mécaniques (roulements à billes), rupture de fixations, ..., etc. ;
- *Les amplificateurs de défauts* : surcharge fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement, ..., etc. ;
- *Les vices de fabrication et les erreurs humaines* : défauts de fabrication, composants défectueux, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine, ..., etc.

IV.2 images vibratoire des Défauts liées à la fréquence de rotation du rotor

IV.2.1 défauts de balourd

Un rotor est parfaitement équilibré si son axe principal d'inertie se confond avec son axe de rotation, Le balourd est un défaut qui se rencontre en présence

d'un déséquilibre de l'arbre d'une machine, Ce phénomène se produit durant sa rotation et il est dû aux mauvaises répartitions spatiales de la masse dans la structure, entraînant un déplacement du centre de gravité en dehors de l'axe géométrique du rotor de la machine tournante.

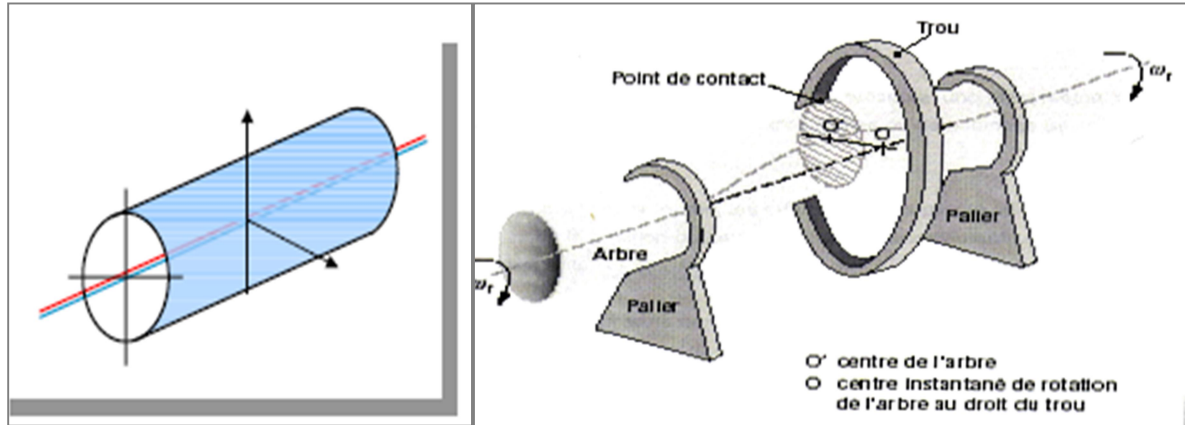


Figure N° 43 : le principe de balourd (SFK).

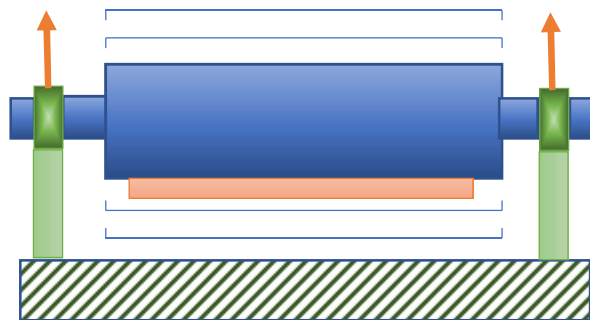
IV.2.1 Types des balourds

Suivant la répartition du balourd sur le long du rotor, on distingue trois types de balourd.

IV.2.1.1 Balourd d'origine mécanique

A. Balourd statique :

Dans ce cas, les deux paliers supportant le rotor vont subir en même temps un effort centrifuge du au déséquilibre. Il n'y aura donc aucun déphasage entre les mesures prises au même point, sur les deux paliers



La force centrifuge est une force radiale, proportionnelle à la vitesse de rotation selon la relation suivante :

$$F = M \cdot r \cdot W^2$$

Ou W : vitesse de rotation

On voit clairement que les efforts exercés sur les deux points de mesures sont parfaitement en phase, les efforts s'exercent dans la même direction (déphasage nul).

B. Balourd couple

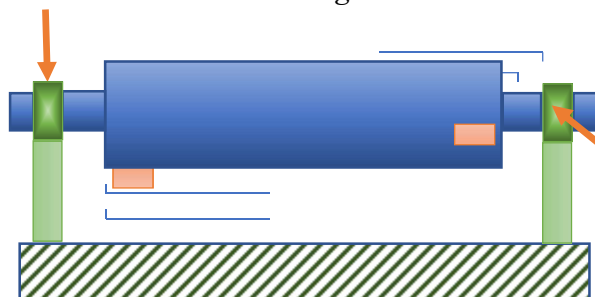
Dans le cas d'un balourd dynamique, les deux paliers supportant le rotor, vont subir les efforts centrifuges de façon alternée. Le déphasage (**voisin de 180°**) entre les mesures effectuées au même point sur deux paliers consécutifs et donc révélateur d'un balourd dynamique, **figure**



Cette répartition du balourd ne peut plus être affectée par oscillation, le rotor au repos n'ayant plus de position préférentielle. Le rotor en rotation entraîne un mouvement de « culbute » autour de son axe giratoire (perpendiculaire à l'axe de rotation), car les deux balourds exercent un couple. Ce type de répartition de balourd est appelé couple de balourd. Pour corriger le couple de balourd, il est nécessaire d'avoir un couple contraire, c'est-à-dire deux balourds correcteurs de même valeur décalés de 180° correspondant au balourd d'origine, et placés dans les deux plans de correction. Il faut prendre en considération les couples de balourd surtout dans le cas de rotors en forme de cylindre allongé.

c. Balourd dynamique

Dans la réalité, le rotor ne possède pas qu'un seul balourd, mais en théorie une multitude répartie arbitrairement le long de l'axe de rotation.



On y remédie par deux balourds résultants (représentés ici par des flèches) placés dans deux plans quelconques et ayant en général des valeurs et des

positions angulaires différentes. L'état de ce balourd ne pouvant être constaté vraiment qu'en rotation, on parle de balourd dynamique, Il se décompose en un balourd statique et un couple de balourd, l'une ou l'autre composante pouvant prédominer. Deux plans de compensation sont nécessaires pour corriger complètement un balourd dynamique. Presque tous les rotors ont un balourd dynamique. Les machines à équilibrer horizontales et verticales conviennent pour de tels cas.

IV.2.1.2 Balourd d'origine thermique

A. Déformation des rotors de turbine

Lorsque les rotors ne sont pas homogènes, ou lorsque la température n'est pas répartie de façon uniforme, les rotors se déforment sous l'effet de contraintes thermiques. S'ils se déforment de façon dissymétrique, les centres de gravité se déplacent et les efforts varient. Le critère de diagnostic repose alors sur la corrélation entre les variations de température et l'évolution des vibrations. La rapidité de l'évolution renseignera sur l'origine du défaut.

IV.2.1. 3 Balourd d'origine électriques

A. Déformation des rotors d'alternateurs ou de moteurs électriques

Comme précédemment, une non-homogénéité du rotor peut induire des déformations. En raison de l'énergie importante dissipée par effet Joule ou par hystérésis, il est nécessaire de refroidir les rotors. Toute dissymétrie de débit (canaux de ventilation bouchés ou pertes de charge différentes) se traduira lors d'une variation de puissance par une variation des vibrations. Les vibrations sont alors fonction de l'échauffement qui dépend de l'intensité du courant dans le rotor, mais aussi de la température du fluide de refroidissement, ou de sa

Pression. Un effet similaire peut être obtenu en cas de court-circuit entre spires, provoquant une dissymétrie d'échauffement. Il faut, pour trouver l'origine de cette déformation, compléter les informations précédentes par des mesures électriques (isolement, résistance interne ou courants).

B. Glissement et dilatation contrariée des bobinages de machines électriques

Si un obstacle s'oppose à la dilatation d'une barre, ou si les forces de frottement deviennent élevées, la dilatation du bobinage ne peut plus se faire

librement et le rotor se tord. On observe alors dans ce cas une évolution du niveau vibratoire.

IV.2.1. 4 Balourd liée au défauts spécifique (évolutifs)

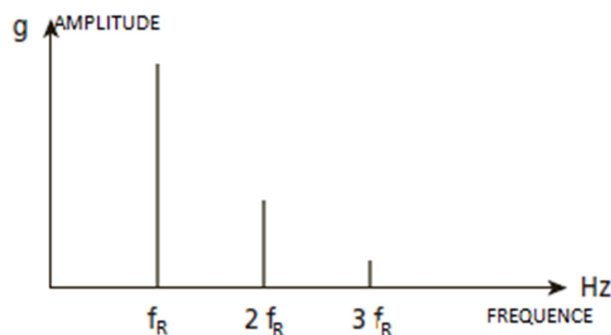
Si au passage par un orifice (palier, joint d'étanchéité par exemple) l'arbre s'échauffe de manière dissymétrique, soit parce qu'il frotte, soit parce que le brassage d'huile provoque un échauffement plus intense d'un côté de l'arbre que de l'autre si de plus, La déformation de l'arbre qui résulte de cet échauffement déplace à son tour le point chaud (vibration maximum décalée par rapport au point chaud qui lui donne naissance), alors, toutes les conditions sont réunies pour amorcer un phénomène de variations cycliques du déséquilibre.[

IV.2.1. 5 Les outils de détections et Typologie du balourd

A. Analyse spectrale

Un défaut de balourd est donc en peut révéler par les trois capteurs (déplacement vélocimètre ou accéléromètre :

- Une composante d'amplitude élevée à la fréquence de rotation du rotor en Direction radiale, parfois en direction axiale dans le cas de rotors en porte à faux,
 - Pas ou très peu d'harmoniques,
 - Pas d'harmonique d'amplitude prépondérante (**en mode accélération**) à Deux ou trois fois la rotation,
 - Pas de sous harmoniques,
 - Une amplitude qui peut varier fortement avec la vitesse de rotation
- Alor L'image vibratoire sera donc constituée d'une composante d'amplitude

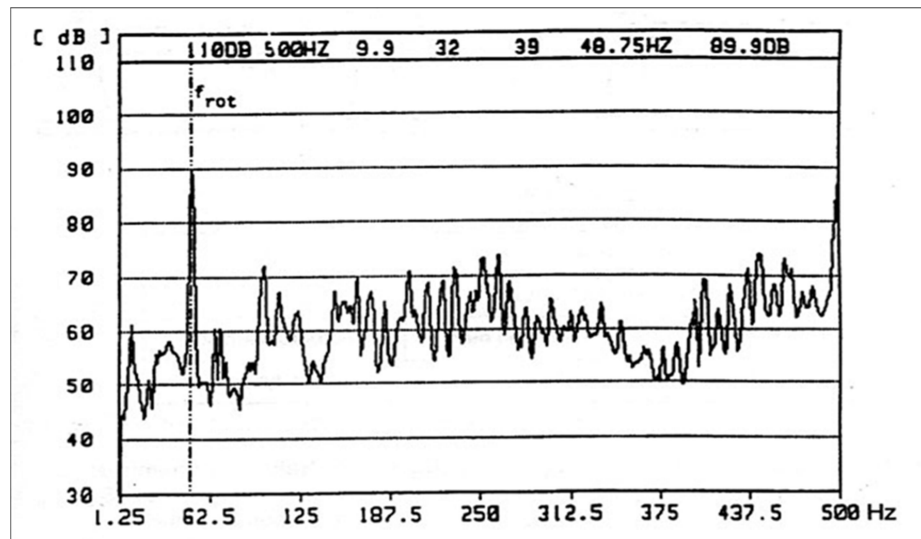


Prépondérante à la fréquence de rotation du rotor

Figure N° 47 a : Image vibratoire théorique d'un balourd. Prépondérance de l'amplitude liée à la fréquence de rotation sans ou avec peu d'harmoniques et sans bandes latérales de modulation.

Généralement, la raie à cette fréquence se voit plus nettement sur un spectre

Issu d'une **mesure prise radialement** (souvent dans la direction **radiale Horizontale**), excepté pour les rotors en porte-à-faux pour lesquels on peut constater également, dans la direction axiale, la prépondérance de l'amplitude de cette composante.



Spectre réel d'un ventilateur tournant à 2925 tr/min

Figure N° 47 b : Spectre du palier (direction radiale horizontale) côté turbine d'un ventilateur tournant à 2 925 tr/min (48,75 Hz : 228 mg ou 7,3 mm/s) traduisant la présence d'un balourd(A-M).

B. L'analyse des phases

L'analyse spectrale de deux types de balourd présentera un spectre identique. L'information de phase n'est pas représentée dans un spectre. Pour pouvoir faire une distinction entre les types de balourd, il est obligatoire de faire une analyse de phase. Lors d'un équilibrage, il est important de savoir de quel type de balourd il s'agit. Pour un balourd statique, un plan d'équilibrage suffit alors que pour un balourd de couple il faut nécessairement deux plans d'équilibrage.

En effet, le déséquilibre induisant une force tournante va produire son effet

Maximum à des moments différents tout au long de la circonférence du Palier et ce **décalage est appelé déphasage**, l'analyse de déphasage nous permet pas seulement de détecter les défauts de balourd aussi comtifiée le nombreux défaut masque qui influent sur ce dernier dont l'amplitude élevée est

correspondant à la fréquence de rotation, alors l'analyse de phase seul permet de Différencier :

- Les défauts induisant des efforts rotatifs comme le balourd,
Si le déphasage entre deux mesures vibratoires sur les deux paliers de la machine :
 - est égale à 0° alors le balourd est statique
 - est égale à 180° alors c'est un couple de balourd
 - est quelconque alors le balourd est dynamique. **[A. Bou/C. pa.009_1]**

- Les défauts induisant des contraintes directionnelles (non tournantes) comme les efforts induits par une courroie trop tendue, un desserrage de palier, le faux rond d'un pignon, une excentricité de poulie...etc.

IV.2.2 Défaut d'alignements

Parmi les principales causes de réduction de la durée de vie des équipements, est les défauts d'alignement, Un défaut d'alignement peut apparaître lorsqu'un arbre doit entraîner un autre arbre, souvent par l'intermédiaire d'un accouplement

Le défaut est créé lorsque L'arbre moteur et l'arbre récepteur ne sont pas parfaitement alignés.

Il y'a en générale deux types de désalignement

- Désalignement angulaire
- Désalignement radial

Mais aussi il existé un troisième type est désalignement mixte entre radial et angulaire.

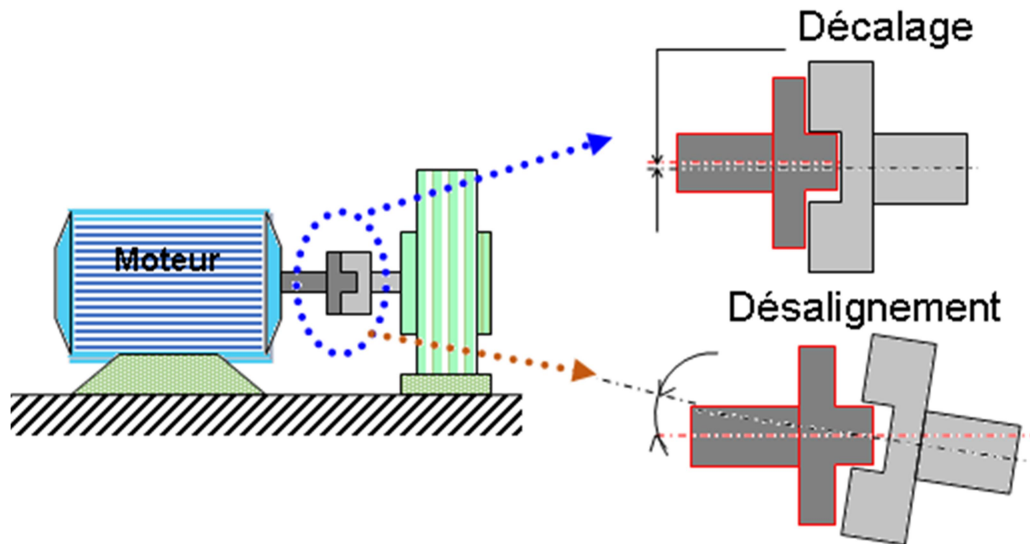


Figure N° 48 : principe désalignements

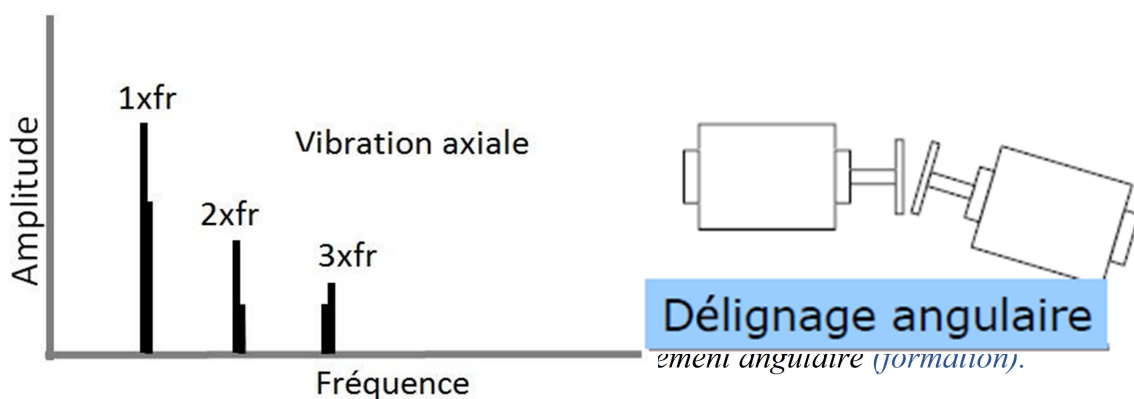
IV.2.2.1 Désalignement angulaire

Un défaut d'alignement est révélé par la présence d'une raie d'amplitude Prépondérante (principalement lorsqu'elle est exprimée en accélération) dont

la fréquence correspond généralement à l'ordre 2 de la fréquence de rotation (Parfois trois ou quatre fois).

A. Image vibratoire Désalignement angulaire

Il apparait une vibration axiale de composante d'ordres 1, 2, 3 ou 4 de la fréquence de rotation avec des amplitudes supérieures à celles des composantes radiales correspondantes



B. Analyse de déphasage

On doit observer aussi un déphasage de 180° entre deux mesures axiales réalisées sur les deux paliers situés de côté de l'accouplement.

IV.2.2.2 Image vibratoire Désalignement radial

A. Image vibratoire de désalignement radial

Ce défaut se traduit par une vibration élevée à $2xfr$ dans la direction radiale

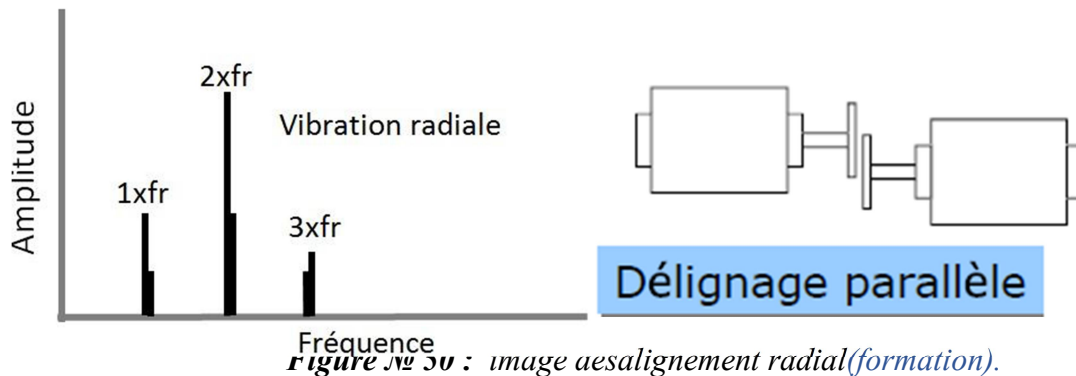


Figure 30 : image de désalignement radial (formation).

B. Analyse de déphasage

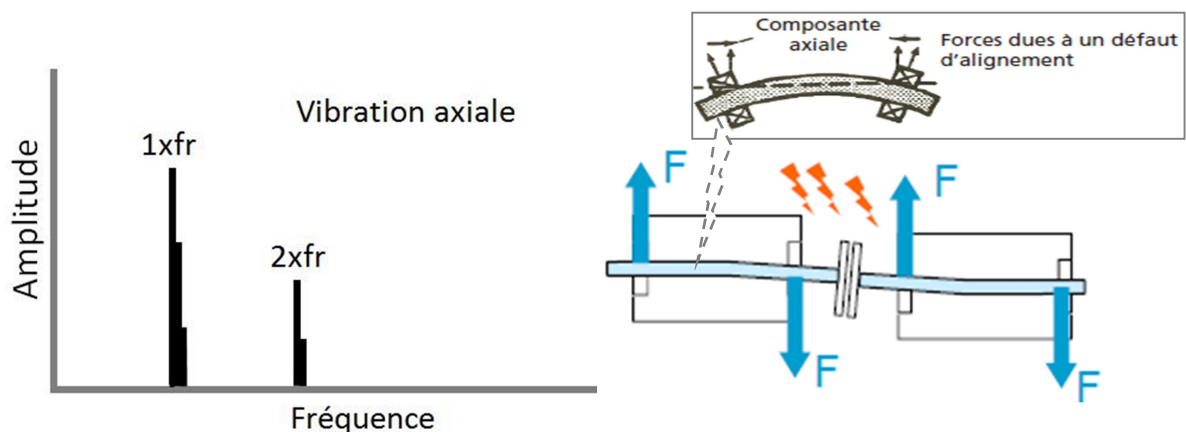
On doit observer aussi un déphasage de 180° entre deux mesures radiales réalisées sur les deux paliers situés de côté de l'accouplement.

IV.2.2.3 Image vibratoire Désalignement dû à l'arbre fléchi

A. Image vibratoire

L'amplitude de la vibration axiale est plus importante que celle de la vibration radiale. Sur le spectre de vibration on va observer deux pics à $1xfr$ et à $2xfr$

- Si la composante d'ordre 1 ($1xfr$) est supérieure à la composante d'ordre 2 ($2xfr$) alors le point de déformation est au milieu de l'arbre.
- Si la composante d'ordre 2 ($2xfr$) est supérieure à la composante d'ordre 1 ($1xfr$) alors le point de déformation est sur l'une des deux extrémités de l'arbre.



NOTE:

Le défaut de lignage peut n'apparaître qu'en fonctionnement, sous l'effet de la charge. Les Causes peuvent être :

- Déformation du stator

Dr. M. DEFDAF

- Efforts dissymétriques sur le rotor
- Calage du rotor (machine à paliers lisses)
- Déformation de la structure porteuse
- Blocage d'accouplement

D'autres phénomènes peuvent donner lieu à des manifestations vibratoires similaires :

- Balourd important
- Chocs périodiques à la fréquence de rotation

IV.2.3 Défaut de Jeu mécanique

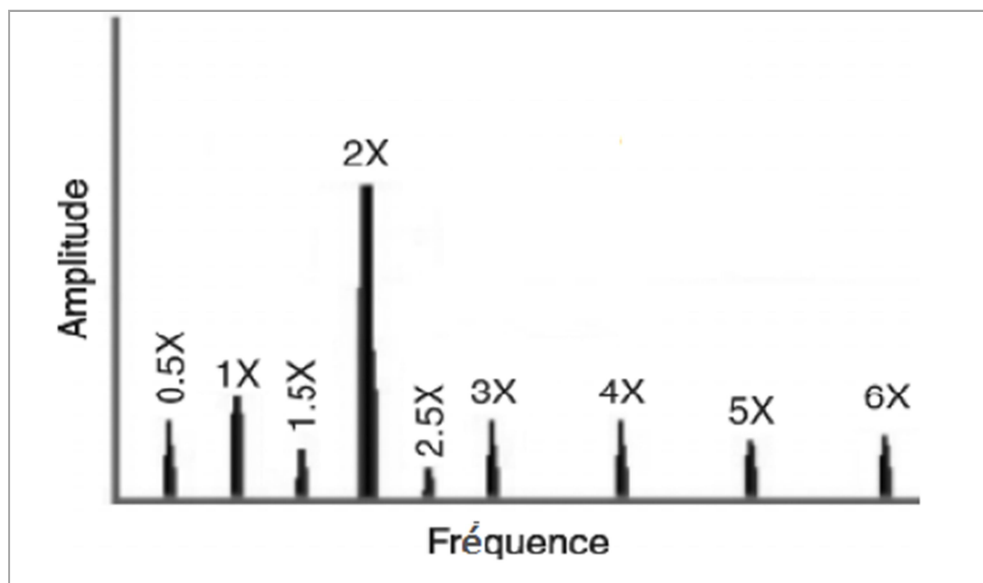
Un tel défaut peut être causé par un jeu excessif entre le roulement et son logement, entre les éléments roulants et les bagues de roulements ou entre un impulseur et son arbre. Généralement c'est dû à un mauvais montage Qui produira plusieurs harmoniques dans le spectre de vibration

A. Analyse temporelle

Le signal temporel va avoir une forme tronquée. La phase de signal est instable et elle peut varier d'une mesure à une autre

B. Analyse spectrale

Ce défaut peut présenter plusieurs images caractéristiques. Il fait ressortir la fréquence fondamentale f_r et ses harmoniques. Contrairement au défaut d'alignement, les harmoniques peuvent ressortir sur une gamme très étendue de fréquences et pas seulement jusqu'au 4e ordre. Il peut aussi parfois faire apparaître la fréquence $1/2 f_r$ et ses harmoniques à un niveau toutefois moindre



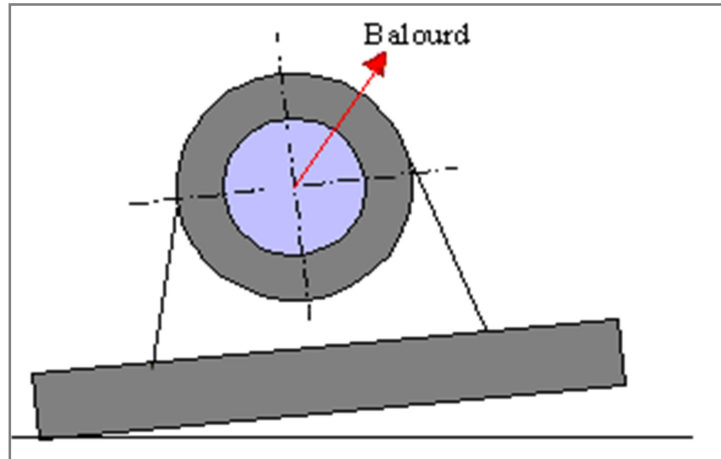
que les harmoniques de la fréquence fondamentale.

Figure N° 52 : image d'un jeu mécanique

IV.2.4 Défaut de serrage

C'est une vibration due au desserrage des boulons d'ancrage ou de fixation des paliers sur le châssis de la machine. Cette vibration se produit sous l'effet du balourd initial et elle peut prendre une amplitude élevée en fonction du degré de desserrage du palier

*Figure N° 53 : desserrage
De structures*



L'image vibratoire de défaut

A. Analyse spectrale

L'image vibratoire induite par un desserrage ou par une fissuration d'ancrage

ou de bâti est également caractérisée par la présence d'une composante d'amplitude prépondérante dont la fréquence peut également correspondre à l'ordre 1 de la fréquence de rotation.

Lorsqu'un palier est desserré ou présente une possibilité de mouvement partiel dans le plan radial, il apparaît une vibration radiale à la fréquence de rotation.

B. Analyse déphasage

Une analyse du déphasage permet de différencier une anomalie due à un balourd (force tournante) d'un défaut de serrage (force directionnelle due à la contrainte).

Le déphasage relatif pour deux composantes radiales orthogonales sera voisin

de zéro ou de 180°, selon la position des capteurs par rapport au plan de

Desserrage ou de fissuration (On observera un déphasage de 180° entre deux mesures radiales verticales réalisées sur la pate de fixation de la machine et le châssis).

IV.2.5 Défauts induits par un frottement entre rotor et stator

Dans le cas d'un **frottement** rotor/stator, la raideur du système rotor/palier Est modifiée lors du contact rotor/stator et devient alors une fonction périodique

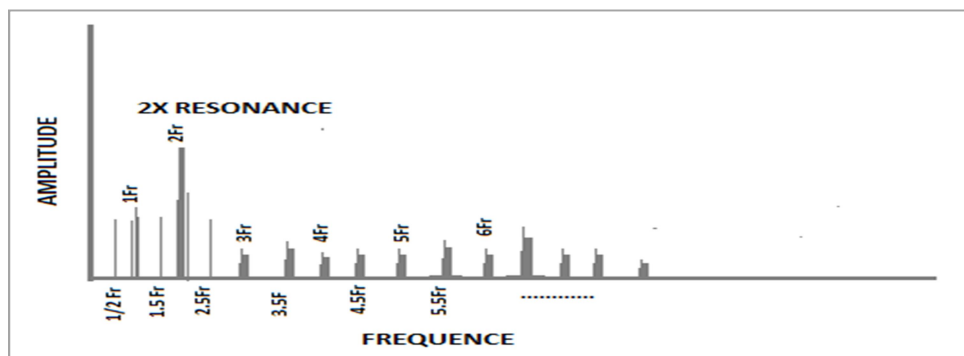
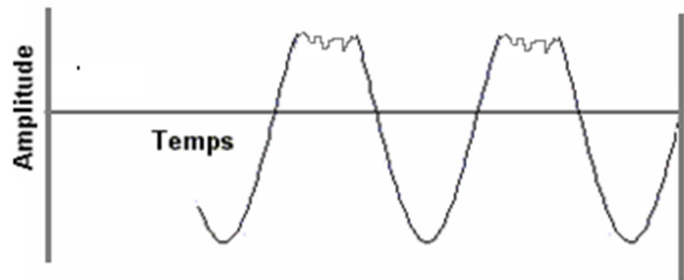
Du temps.

A. Analyse temporelle

Le signal temporel va avoir une forme tronquée :

Figure N° 54 : image temporelle

Un frottement entre rotor et stator



B. Analyse spectrale

Figure N° 54-b : image vibratoire d'un frottement rotor stator

Le mouvement du rotor montre que la rotation du rotor peut induire des vibrations dont la fréquence de base correspond le plus souvent à l'ordre **1/2 de la fréquence de rotation** et parfois aux ordres 1/3, 1/4 et 1/5 (figure 5.16). Cependant, l'image vibratoire d'un frottement rotor/stator correspond généralement à l'ordre 1/2 de la fréquence de rotation

IV.2.6 Défauts induits par les paliers hydrodynamiques

Dans un palier lisse, l'arbre est porté par l'huile sous pression. Il prend une position d'équilibre sous l'effet de son poids, de la vitesse de rotation, et de la force liée à la pression de l'huile. Toute variation de ces forces ou tout effort supplémentaire s'exerçant sur le rotor modifie cette position d'équilibre.

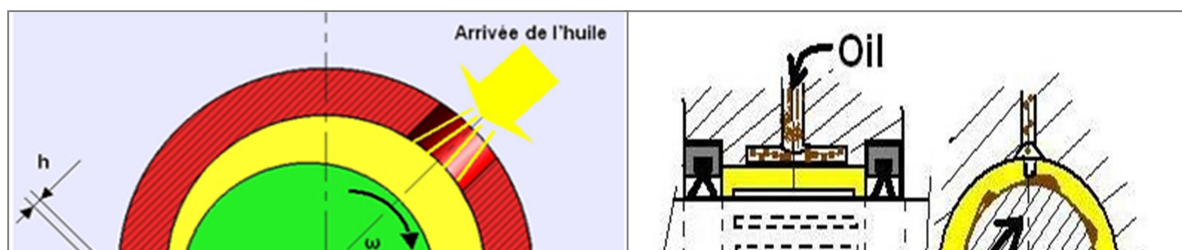


Figure N° 55 : Palier lisse [Wikipédia]

L'image vibratoire

A. Analyse spectrale :

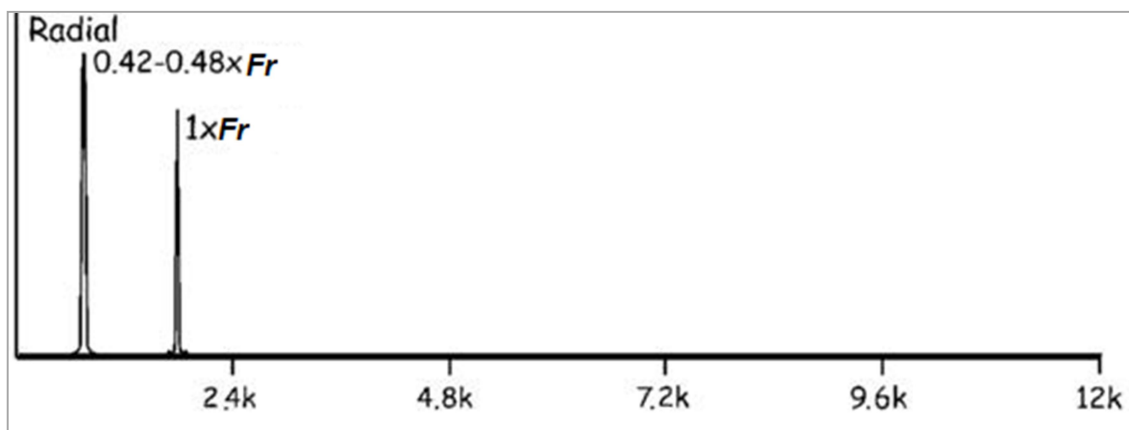


Figure N° 56 : Image vibratoire d'un défaut au niveau de palier lisse

Indépendamment des défauts affectant tous les types des paliers, l'analyse spectrale sur paliers fluides peut mettre en évidence un déséquilibre des forces qui maintiennent l'arbre en position stable, il s'agit des défauts de type :

- Tourbillon d'huile se produisant à une fréquence dépendante de la vitesse de l'huile dans le palier, soit 0,42 à 0,48 fois la fréquence de rotation de l'arbre ;
- Fouettement d'huile lorsque la fréquence de précession dépendante de la vitesse de l'huile (0,42 à 0,48 fois la fréquence de rotation) coïncide ou est supérieure à la fréquence critique de l'arbre. Ce dernier défaut, extrêmement grave, peut entraîner des dégradations rapides et catastrophiques pour la machine.

IV.2.7 cavitations

Il s'agit d'un défaut d'écoulement d'un fluide qui se produit quand la pression, à l'intérieur de la pompe, s'abaisse à un niveau égal à celle de la vapeur

saturante du fluide véhiculé, Il y a formation de bulles de gaz qui, en implosant, excitent un grand nombre de modes de structure. La cavitation est causée par un débit d'aspiration insuffisant et se manifeste par un bruit caractéristique identique à celui que provoquerait le passage de graviers dans le corps de la pompe. Ces phénomènes sont souvent intermittents et s'ils persistent, ils peuvent dégrader des éléments internes de la pompe et notamment éroder les aubes des impulseurs.

La cavitation induit des vibrations aléatoires à spectre étendu et dont l'énergie se concentre souvent autour de la fréquence de passage des aubes et de ses harmoniques et des fréquences des principaux modes de structure.

On pourra distinguer un phénomène de cavitation des autres phénomènes ayant des manifestations vibratoires voisines (usure de bagues de roulement, défaut de lubrification) en prenant une mesure sur le corps de pompe. Pour un défaut lié à un palier, l'énergie vibratoire sera beaucoup plus élevée sur le palier que sur la volute, alors que pour la cavitation, elle sera généralement supérieure sur la volute.

A. Fréquence de passage des pales, aubes, ailettes, encoches

La fréquence de passage des pales d'un ventilateur correspond au produit de la

Fréquence de rotation par le nombre de pales de la roue, multipliée éventuellement par le nombre de ventelles fixes fractionnant la zone de déchargement.

La fréquence de passage des aubes d'une pompe, d'un compresseur ou d'une Turbine correspond au produit de la fréquence de rotation par le nombre d'aubes.

La présence dans le spectre vibratoire de composantes dont les fréquences correspondent à la fréquence de pales ou d'aubage ou à leurs harmoniques est liée au fonctionnement de la machine et ne constitue donc pas nécessairement une anomalie.

IV.2.8 Défauts de transmission par courroies

Les principaux défauts rencontrés sur ce type de transmission sont :

- Une détérioration localisée d'une courroie (partie arrachée, défaut de jointure...),
- Des courroies détendues,
- Des courroies usées,
- Un mauvais alignement des poulies,
- Une poulie excentrée,
- Un défaut de transmission courroie poulies crantées. [Aide-mémoire sur]

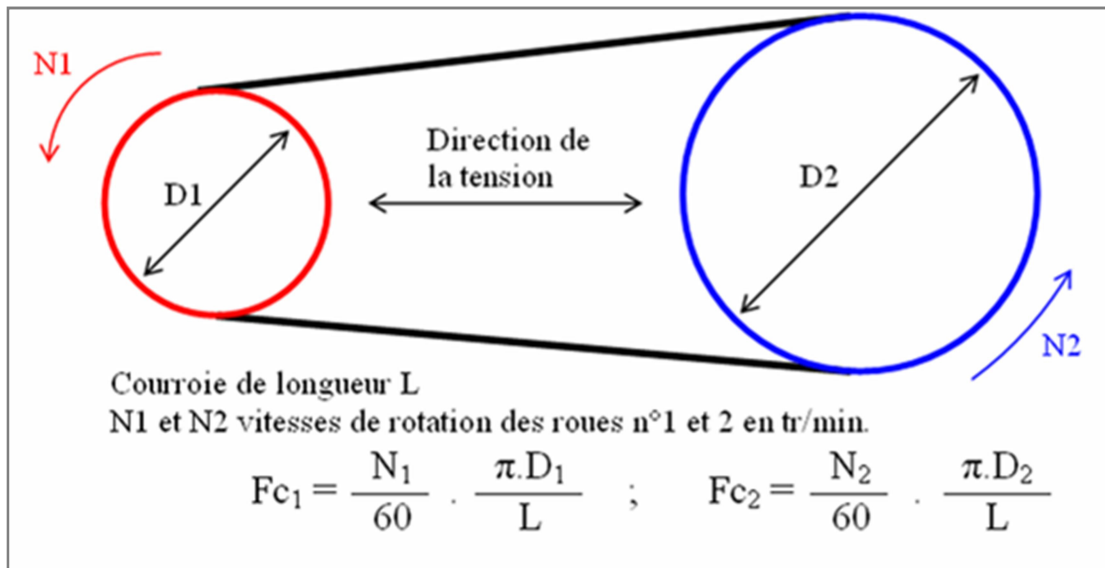
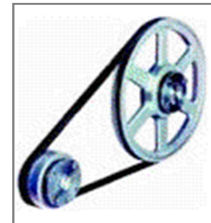


Figure N° 57 : Transmission poulies courroies. [For SKF SONA]



IV.2.7.1 L'image vibratoire des Courroies usées, détendues ou désaxées

A. Courroies trapézoïdales

La détérioration localisée d'une courroie implique généralement un effort ou un choc dont la fréquence de répétition correspond à la fréquence de passage de ce défaut. L'image vibratoire d'un défaut de courroies (figures 5.14 a et b) est constituée d'un peigne de raies dont le pas correspond à la fréquence de passage de courroies avec prépondérance des composantes dont les fréquences sont voisines de fréquences propres de structure.

La fréquence passage de courroies se situe toujours en dessous des fréquences de rotation des arbres menant et mené. À cause des inévitables glissements poulies/courroies, la fréquence réelle sera toujours inférieure de 2 à 3 % de sa valeur théorique calculée à partir de la relation :

$$F_c = \frac{\pi d}{L} F_{rot}$$

Avec :

- L : la longueur de la courroie,
- f_{rot} : la fréquence de rotation de la poulie et d le diamètre correspondant.

Lorsque les courroies sont usées ou détériorées, détendues ou désaxées, on observe dans le spectre vibratoire la présence de composantes dont les fréquences

Correspondent aux premiers ordres de la fréquence de passage de Courroie. Souvent, l'amplitude de la composante d'ordre 2 est prépondérante

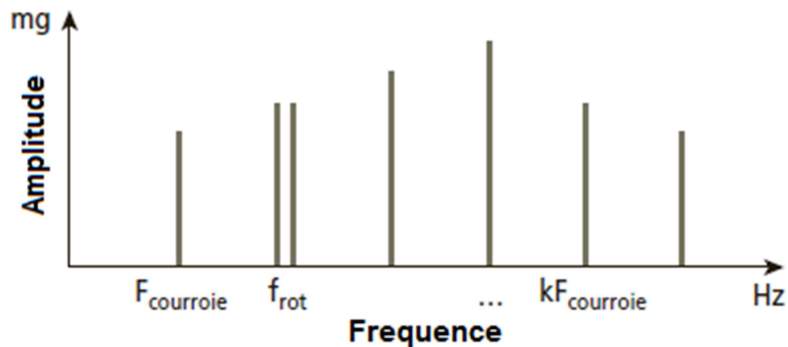


Figure N° 58 : Image théorique d'un défaut localisé de courroie.

B. Courroies crantées

Dans le cas d'une courroie crantée, l'usure ou le désalignement des poulies se Manifestent par la présence d'une composante d'amplitude élevée dont la fréquence correspond à la fréquence de synchronisation (Produit de la fréquence De passage

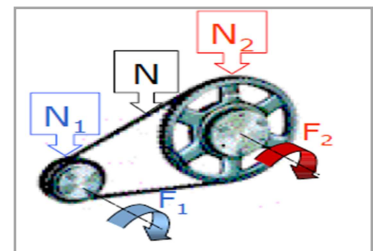


Figure N° 59 : courroie crantée (SKF)

De courroie par le nombre de crans ou de la fréquence de rotation des roues menante ou menée par le nombre de dents de cette dernière). Pour ce type de transmission, les fréquences rencontrées sont les mêmes que pour les engrenages avec cependant des amplitudes vibratoires moindres du fait de la nature du matériau qui a tendance à amortir les chocs, La fréquence de passage de la courroie s'écrit alors :

$$F_{courroie} = \frac{Z}{Z_c} F_{rot}$$

Avec : $F_{courroie}$ = fréquence de passage de la courroie

f_{rot} = fréquence de rotation d'une poulie

Z = nombre de crans de cette même poulie

Z_c = nombre de crans de la courroie

IV.2.8.2 Mauvais alignement des poulies

Un désalignement de poulies induit une composante d'amplitude élevée prépondérante en direction axiale à la fréquence de rotation des arbres menant et menée, très Souvent, Le diagnostic peut être confirmé par la mesure des déphasages entre composantes axiales de même fréquence.

IV.2.8.3 Poulie excentrée

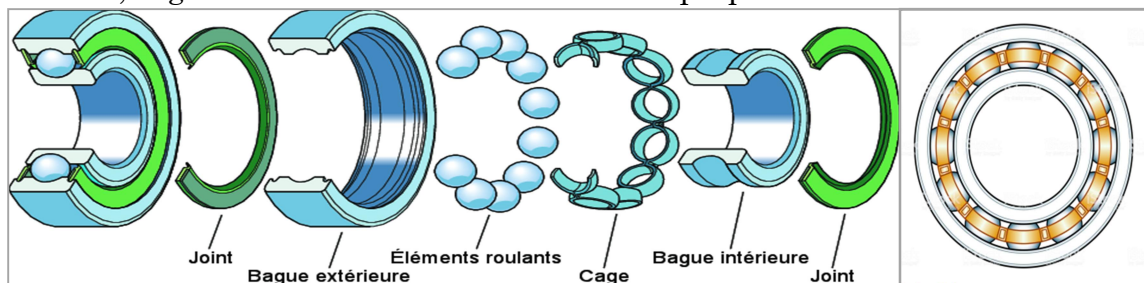
Une poulie excentrée (centre de gravité différent du centre de rotation) induit une composante vibratoire d'amplitude élevée à la fois sur les paliers des poulies menante et menée en direction radiale, dont la fréquence correspond à la fréquence de rotation de la poulie excentrée, L'excentricité d'une poulie peut être confirmée par une mesure de déphasage.

Remarque

La meilleure méthode de diagnostic d'un défaut de transmission poulies/courroies est à partir de l'image du couple que représente l'intensité du courant statorique d'un moteur.

IV.2.9 études des Défauts de roulements

Généralités : Un roulement est composé de bague intérieure, bague extérieure, cage et d'éléments roulants. Dans la plupart des cases



Un roulement est l'organe le plus sensible dans une machine tournante. Sa durée de vie est une donnée statistique caractérisant le nombre de cycles. Le nombre de cycles est le nombre de tours qu'il peut effectuer en étant soumis à une contrainte spécifique avant de présenter des défauts, On trouve, dans les catalogues des constructeurs, des indications sur la durée de vie prévisionnelle pour des conditions de charge déterminées. Grâce à ces données, il est possible d'établir un calendrier indicatif dans lequel on prévoira le remplacement du palier après ce temps de fonctionnement.

IV.2.9.1 déterminations des fréquences caractéristiques

Dans la plupart des cas, la dégradation à un stade précoce se traduit par la présence d'un défaut localisé ponctuel (fissure, trace de micro grippage, amorce d'écaillage, empreinte...) affectant une des pistes, ou d'un élément roulant du roulement, produisant un choc à chaque passage sur le défaut ou à chaque contact du défaut avec une des deux pistes. Pour chaque type de roulement et en fonction des cotes de fabrication de chacun de ses éléments (figure), on peut considérer quatre fréquences caractéristiques :

- La fréquence de passage des billes (ou rouleaux)

Sur la bague externe du roulement, F_{be} :

$$f_{be} = \frac{Nb}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha\right) \cdot f_r$$

- La fréquence de passage des billes (ou rouleaux)

Sur la bague interne du roulement, F_{bi} :

$$f_{bi} = \frac{Nb}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha\right) \cdot f_r$$

- La fréquence de passage d'un défaut de cage, F_c :

$$f_c = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha\right) \cdot f_r$$

- La fréquence de rotation des éléments

Roulants sur eux-mêmes, F_e ou F_b :
roulement

$$f_b = \frac{D}{2d} \left(1 - \left(\frac{d}{D} \cos \alpha\right)^2\right) \cdot f_r$$

Avec :

Nb : le nombre d'éléments roulants

D : le diamètre primitif

d : le diamètre des éléments roulants

α : l'angle de contact

f_r : la fréquence de rotation de la bague interne (la bague externe étant supposé fixe)

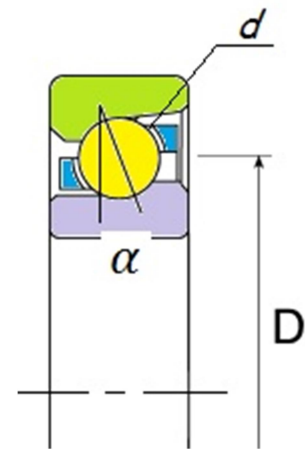


Figure N° 61 : constitution d'un roulement

IV.2.9.2 Les dégradations et les défauts de roulements

Les roulements sont, sans doute, les organes les plus sensibles d'un parc de machines, la plupart des dégradations de roulements ont pour origine des maladresses de manutention ou de montage, donc pour éviter les démontages systématiques en optant pour une stratégie de surveillance appropriée, Les causes de dégradation de roulements sont nombreuses :

- Usure normale
- Charge

- Défaut de graissage
- Défaut de montage
- Agents extérieurs, ...

La dégradation d'un roulement se traduit généralement par un caillage des surfaces en contact (bagues et roulements roulants) qui s'étend et évolue dans le temps. La dégradation peut être localisée ou généralisée.

IV.2.9.3 Les dégradations généralisées

L'écaillage augmente lorsque la dégradation du roulement évolue pour gagner l'ensemble des éléments en contact. Cette évolution anarchique entraîne l'apparition de nombreux chocs durs qui excitent les fréquences de résonances (hautes) du roulement. Le spectre associé présente un pic dont l'aire (représentative de l'énergie) augmente avec la dégradation.

Le processus normal de dégradation d'un roulement est l'écaillage par fatigue qui présente quatre stades de dégradation bien distincts auxquels sont associées des typologies vibratoires bien différenciées.

Stade 1

Le spectre de mesure vibratoire sur un roulement peut être divisé en trois zones :

- Zone A : fréquence de rotation de la machine et ces harmoniques
- Zone B : fréquences caractéristiques du roulement (80 - 500Hz)
- Zone C : fréquence propre du roulement (500 – 2000 Hz)
- Zone D : Détection à haute fréquence (HFD : High Frequency Détection) (20 – 60 KHz)

(KHz)

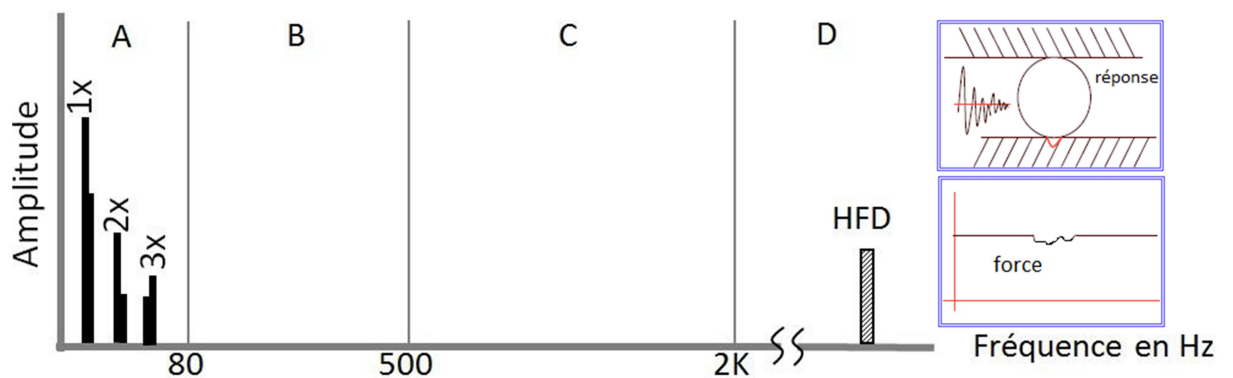


Figure N° 62: Image vibratoire d'un défaut de roulement au premier stade

Les premiers signes de fatigue d'un roulement se manifestent avec des gammes de fréquence ultrasoniques (20 - 60 KHz). Ces fréquences sont évaluées par La méthode de détection à haute fréquence (HFD) : « pointes d'énergie » ou « ondes de choc »....

Stade 2

Durant cette phase il y'aura création de micro fissures interne par fatigue. Le passage des éléments roulants à proximité de ces fissures va engendrer des vibrations ayants des fréquences égales aux fréquences de résonance du roulement. L'image vibratoire va se caractériser par un pic et une paire de bandes latérales espacées de la fréquence de rotation dans la zone C. D'autre part l'amplitude HFD va doubler par rapport à celle obtenue au premier stade.

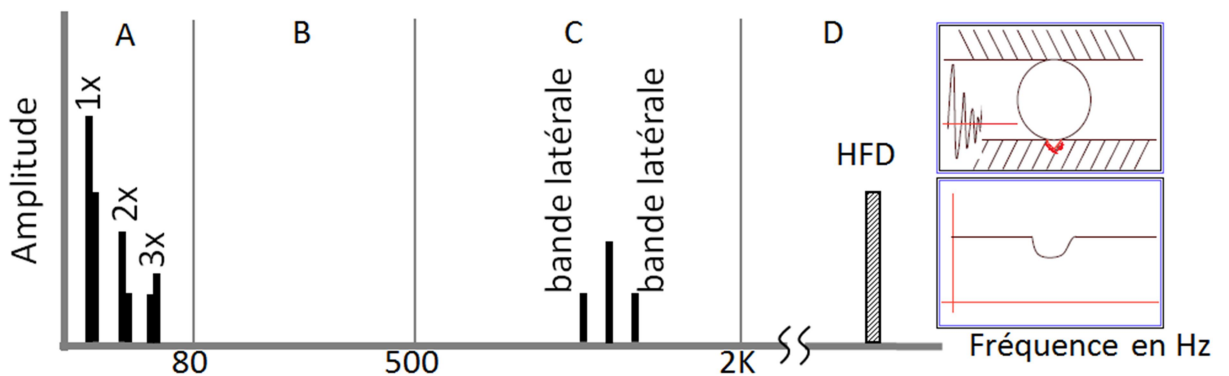


Figure No 63 : Image vibratoire d'un défaut de roulement au deuxième stade

Stade 3

Durant cette phase les micros fissures vont se propager jusqu'à la surface des pistes du roulement et leurs nombres va augmenter. L'analyse spectrale de ce phénomène montre un ou plusieurs peignes de raies dans la zone B ayant comme composantes principales la fréquence caractéristique du ou des composants endommagés et ces harmoniques. A chaque composante de ce peigne, sont associées plusieurs paires de bandes latérales.

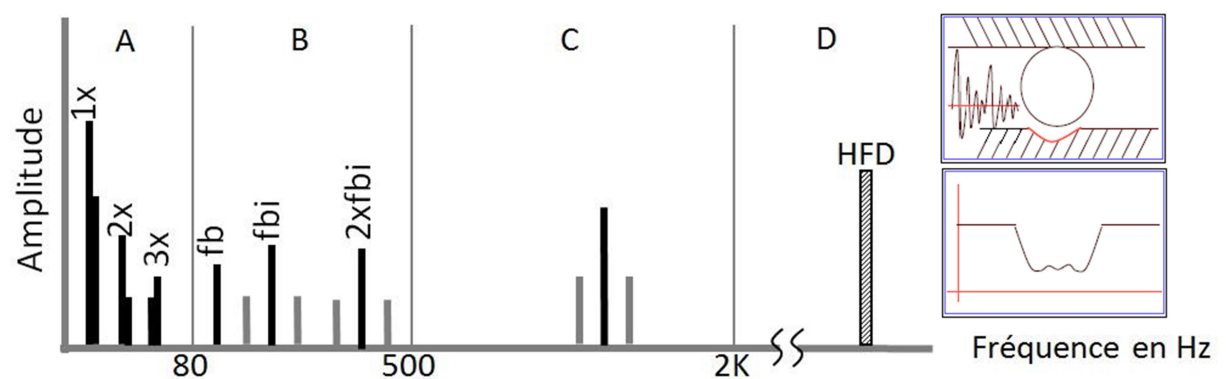


Figure N° 64 : Image vibratoire d'un défaut de roulement au troisième stade

Stade 4

En phase finale de petites particules de matériau du *roulement* se détachent de la surface du chemin de *roulement* ou des éléments du *roulement* (Écaillage) le roulement est complètement endommagé. Sur le spectre de vibration on va voir une densité spectrale de bruit dans la zone C et qui s'étend vers la zone B aussi.

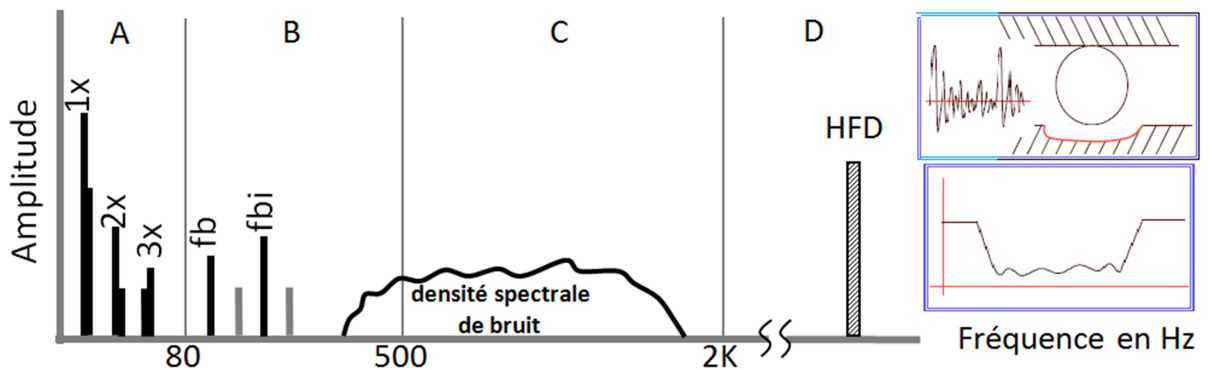


Figure N° 65 : Image vibratoire d'un défaut de roulement au quatrième stade

IV.2.9.4 les défauts de Dégradation localisée

Un défaut localisé sur un des éléments se manifestera par un choc dur la Fréquence de contact de la détérioration :

- Défaut sur bague extérieure choc FBE
- Défaut sur bague intérieur choc FBI
- Défaut sur élément roulant choc 2. FB

A. défauts Affectant la bague fixe ou extérieur

Si le défaut affecte la bague fixe d'un roulement, généralement la bague externe, le défaut se manifestera, dans le domaine spectral, par un peigne de raies de pas égal à la fréquence F_{be} et dont l'amplitude dépendra essentiellement à la réponse impulsionnelle du roulement et de son palier, l'amplitude des forces d'excitation étant constante exemple :

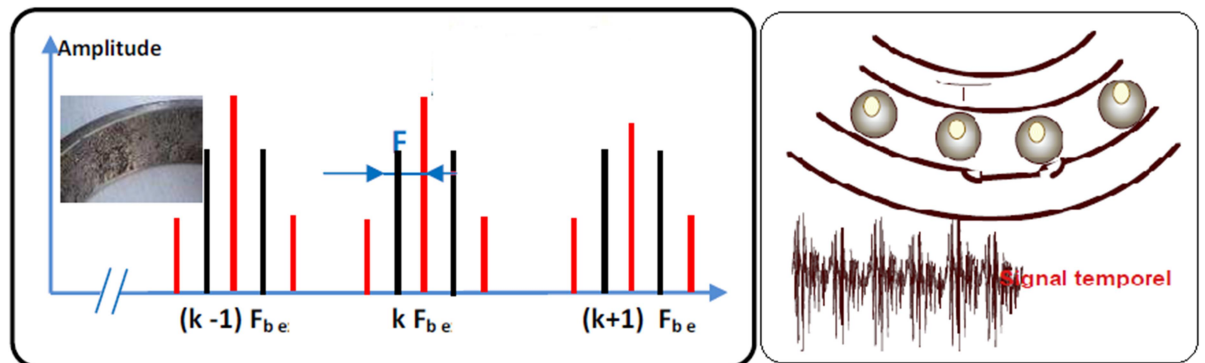


Figure N° 66 : Image vibratoire d'un défaut de bague extérieure

B. Défauts Affectant la bague roulante ou intérieur

Un défaut de type écaillage affectant la bague interne de roulement a pour image

vibratoire un peigne de raies. À chaque composante de ce peigne, sont associées

Plusieurs paires de bandes latérales espacées de la fréquence de rotation.

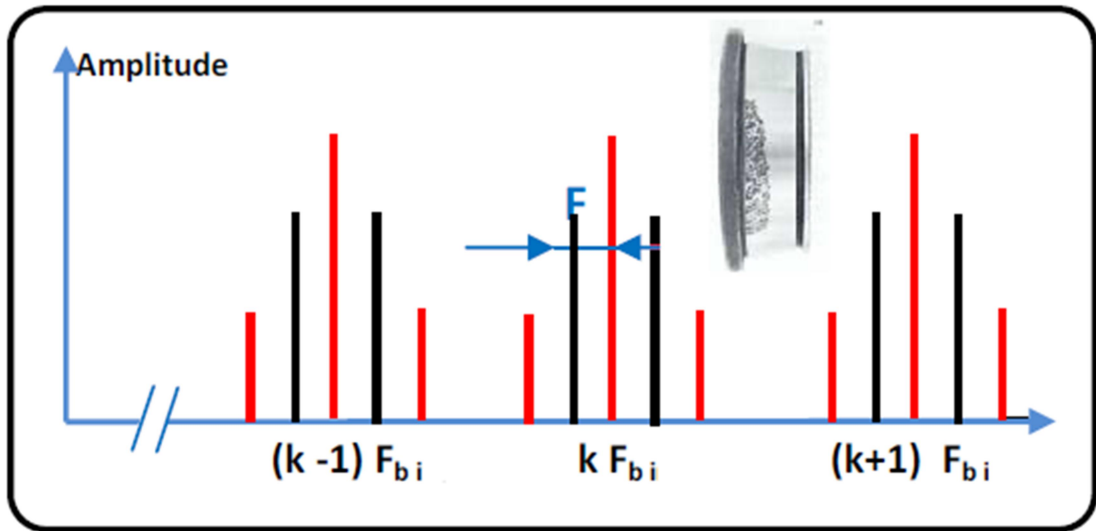


Figure N° 67 : Image vibratoire d'un défaut de bague intérieure

C. Défauts Affectant l'élément roulant

Un défaut de type écaillage sur un élément roulant (bille, rouleau ou aiguille) a

pour image vibratoire un peigne de raies. à chaque composante de ce peigne, sont

associées plusieurs paires de bandes latérales espacées de la fréquence de la cage

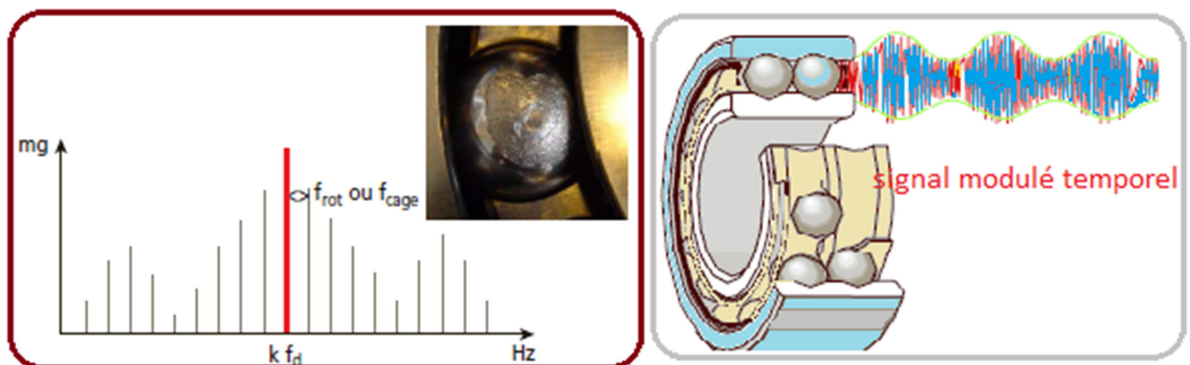


Figure N° 68 : Image spectrale théorique d'un défaut ponctuel affectant la bague tournante ou un élément roulant dans le cas d'une charge radiale pure. La fréquence du défaut f_d est égale à f_{bi} ou f_e et la fréquence de modulation correspond à la fréquence de

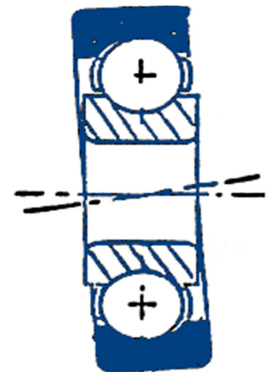
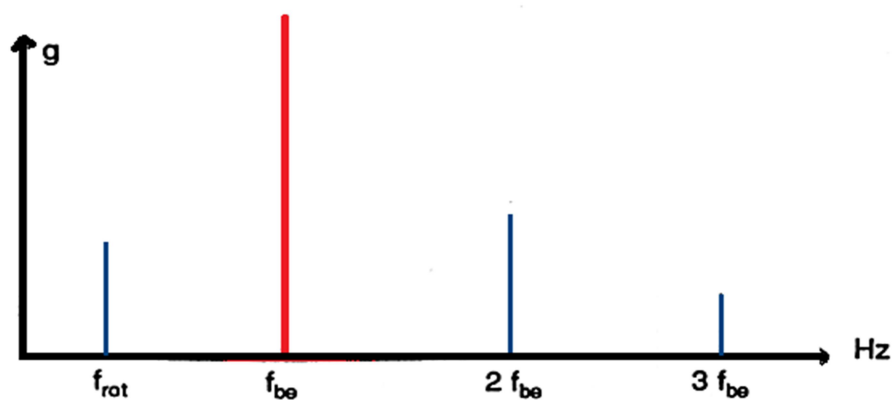
rotation de l'arbre ou de la cage selon que le défaut affecte la bague tournante ou un élément roulant

D. Rupture de la cage

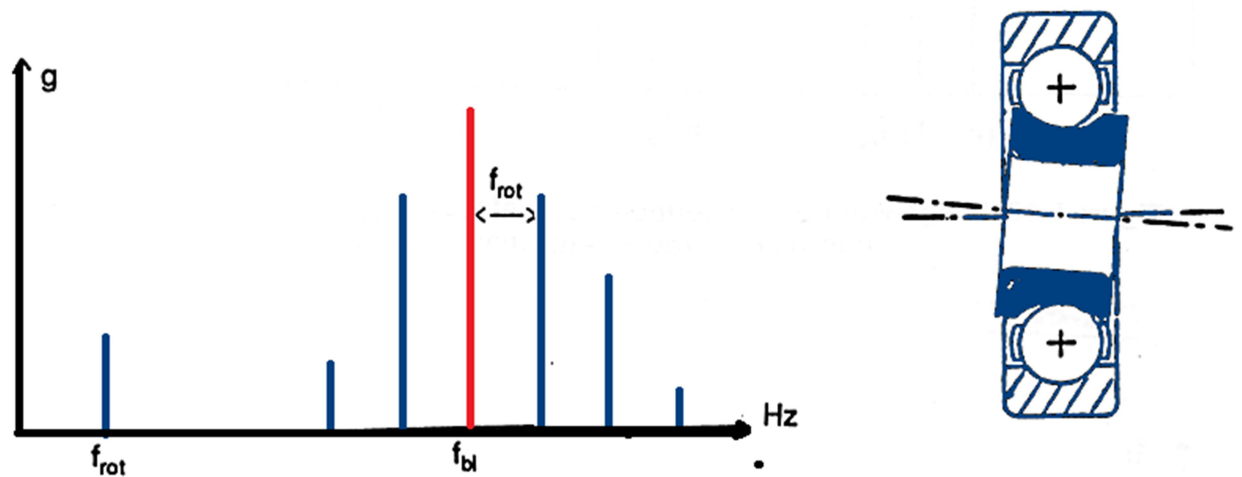
L'évolution rapide de ce type de défaut en rend la surveillance difficile. Dans la plupart des cas, un roulement dont la cage est cassée va très vite se détériorer. Les éléments roulants (billes ou rouleaux) n'étant plus maintenus, ils vont se regrouper et créer un fléchissement de l'arbre ou, notamment dans le cas de rouleaux, se mettre en travers, entraînant ainsi le blocage immédiat du rotor, généralement dans un spectre FFT l'image vibratoire d'un rupture de cage est égale à $0,4 \times$ la vitesse de rotation mais.

E. Déversement de bague

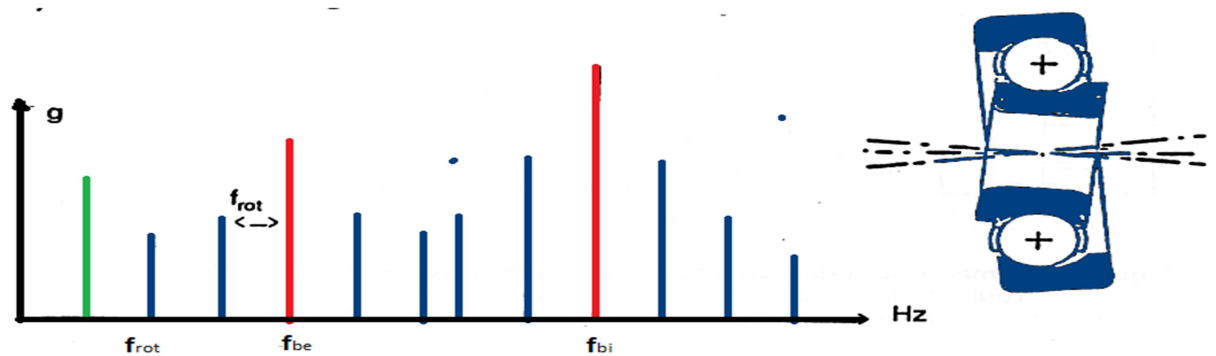
Généralement le défaut de déversements des bagues des roulements est du à un défaut de désalignement d'arbre motrice qui réduisent considérablement la durée de vie d'un roulement de manière plus ou moins importante, Un déversement de bague se manifeste dans le domaine vibratoire par la présence d'une raie d'amplitude importante dont la fréquence correspond à la fréquence de défaut de la bague déversée, l'amplitude de cette composante étant largement prépondérante face à ses premiers harmoniques avant que ce défaut n'induisse, par fatigue, des écaillages. L'amplitude de cette composante dépend de l'importance du déversement, du type de roulement.



a) Déversement de bague externe.



b) Déversement de bague Interne.



c) Déversement simultané de bague Interne et bague externe.

Figure N° 69 : Image vibratoire théorique de défauts de déversement de bagues externe et/ou interne

F. Jeux de paliers

Les typologies vibratoires liées à des jeux de palier se caractérisent selon l'importance du défaut par :

- L'excitation des résonances hautes fréquences des différents éléments constitutifs du roulement et palier par chocs. La fréquence de répétition correspond à la fréquence de rotation et à la fréquence de cage dans le cas d'un jeu interne conséquent entre éléments roulants et cage

- un peigne de raies basses et moyennes fréquences plus ou moins étendu de pas correspondant à la fréquence de rotation, dû à la troncature par la fonction de transfert de la force d'excitation sinusoïdale induite par le déséquilibre résiduel (ou non) de la ligne d'arbres

- aussi on pourra parfois observer :

en présence d'un défaut de serrage de l'arbre dans le roulement entraînant un mouvement relatif l'arbre et la bague interne, un peigne de raies basses fréquences dont le pas correspond à un sous-harmonique de la fréquence de rotation (généralement l'ordre 1/2), dans le spectre basses fréquence

J. Altération due au passage de courants de fuite

L'apparition de cannelures affectant les pistes d'un roulement induite par le passage de courants de fuite se traduit par la présence d'un peigne de raies dont le pas correspond le plus souvent à la fréquence de défaut de bague externe, même si souvent les cannelures affectent à la fois les bagues externe et interne. L'amplitude du peigne de raies dans la bande fréquentielle [1 500- 5 000 Hz].

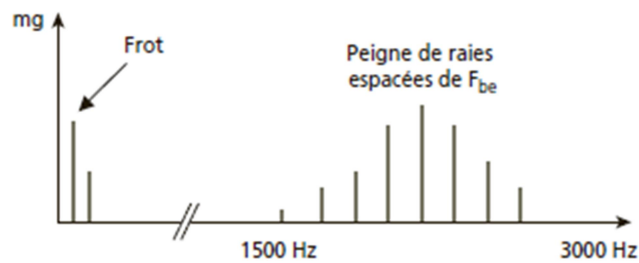


Figure N° 70 : Spectre vibratoire typologique induit par une altération de bague de roulement par électroérosion

IV.2.9. Défaut d'Engrenages

Considérons un engrenage (figure) composé d'un pignon E1 possédant z_1 dents tournant à la vitesse f_1 et d'une couronne E2 possédant z_2 dents et tournant à la vitesse f_2 . La fréquence de rotation du pignon sera f_1 , celle de la couronne sera f_2 , et l'engrènement se fera au rythme d'engagement des dents selon une fréquence ***f_{eng}***, appelée fréquence d'engrènement, égale à la fréquence de rotation multipliée par le nombre de dents. Soit : $f_{eng} = Z_1 f_1 = Z_2 f_2$

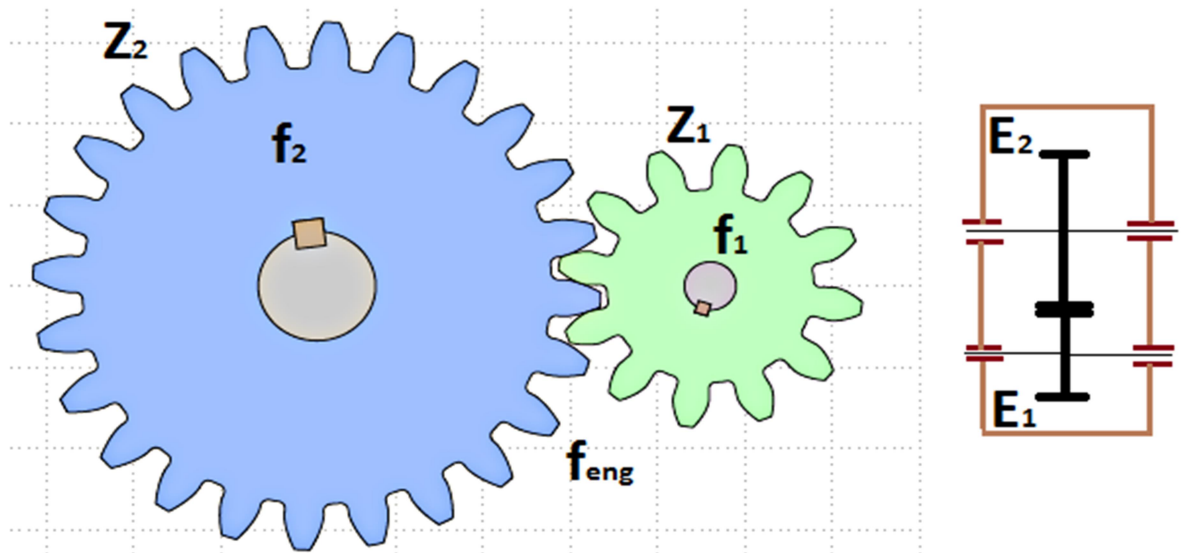


Figure N° 71 : Fréquence d'engrènement [Wikipédia]

L'amplitude de la vibration à la fréquence d'engrènement ne suffit pas à caractériser un Problème.

- Pour qu'un défaut soit significatif, il faut une augmentation de l'amplitude à la fréquence d'engrènement, mais aussi, la génération d'autres fréquences (harmoniques et modulation de la fréquence d'engrènement)

Sources de vibrations des engrenages :

- Flexion des dents due à la charge.
- Usure régulière, uniforme de la denture.
- Phénomènes locaux (dent fissurée...).

Ces vibrations affectent la fréquence d'engrènement « **Fe** » :

Fe = Nombre de dents x Frot et ses harmoniques

Si la denture est correcte et si aucun phénomène parasite ne vient perturber l'engrènement, le spectre vibratoire est constitué de raies dont les fréquences

Correspondent à la fréquence d'engrènement f_{eng} et à ses harmoniques. L'amplitude de la composante fondamentale d'engrènement dépend de la portée et croit avec le couple à transmettre

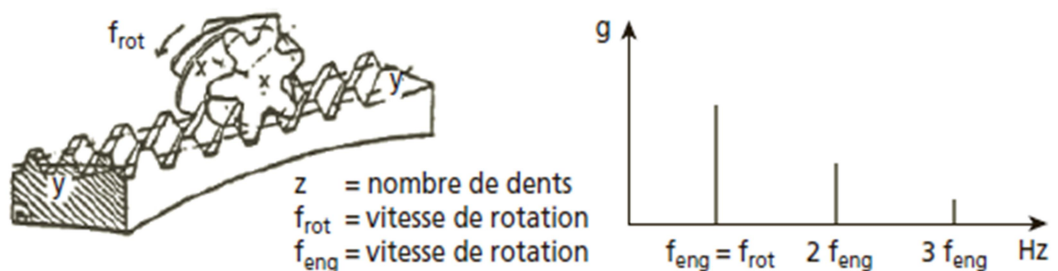


Figure N° 72 : typologie vibratoire d'un engrenage sain (A-M)

Les amplitudes vibratoires générées par l'engrènement d'engrenages à denture

Hélicoïdale sont généralement plus faibles que celles générées par les autres Types de dentures.

A. Signature de Détériorations d'une dent d'engrenage

Si l'une des roues possède une dent détériorée, il se produit un choc périodique à la fréquence de rotation de la roue considérée, Le spectre montrera donc, non seulement la fréquence d'engrènement, comme précédemment, mais aussi et surtout un pic à la fréquence de rotation (par exemple f_1 si le défaut est sur la roue 1) et de nombreuses harmoniques.

Les nombreuses harmoniques de la fréquence constituent ce que l'on appelle un peigne de raie, Elles sont dues au phénomène de chocs. Dès qu'un défaut se traduit par des chocs, cela se retrouve sur le spectre par un peigne de raie dont la fréquence est celle du défaut

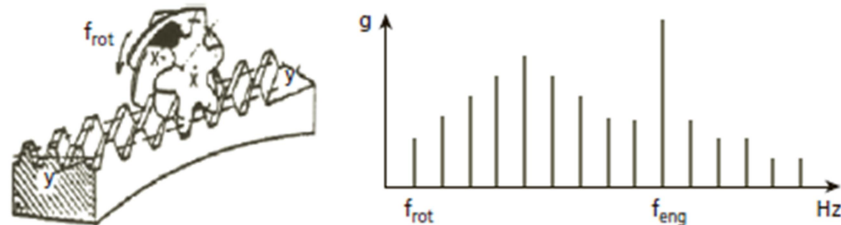


Figure N° 73 : typologie vibratoire d'un engrenage présentant d'une dent détériorée (A-M)

B. Signature de Détériorations d'un ensemble des dents d'engrenage

Lorsque l'ensemble de la denture est usé ou détérioré, les chocs se produisent à l'engrènement de chaque dent. Le spectre est constitué d'un peigne de raies de faible étendue spectrale (choc « mou ») dont le pas correspond à la fréquence d'engrènement, mais cette fois avec une amplitude beaucoup plus élevée. L'évolution de l'amplitude correspondant à cette fréquence est beaucoup plus significative de la dégradation que la seule présence (normale) de cette fréquence dans le spectre.

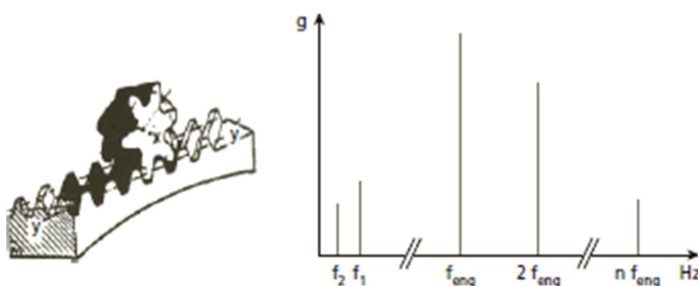
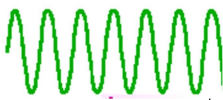
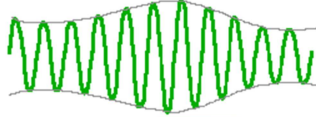
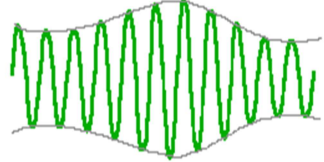


Figure N° 74 : typologie vibratoire d'un engrenage présentant un ensemble des dents détériorées(A-M)

C. Signature d'un défaut d'excentricité d'engrenage

Si l'arbre ou le pignon présente un défaut d'excentricité, ou de faux rond, il va apparaître une modulation d'amplitude du signal par la fréquence de rotation due à la modulation de l'effort d'engrènement.

		
Signal d'un engrenage sain	Signal d'un engrenage traduisant une modulation en amplitude.	Augmentation de la modulation d'amplitude qui traduit une évolution du défaut d'excentricité.

L'image vibratoire théorique de ce type de défaut présente autour de la fréquence d'engrènement ou de ses harmoniques, des raies latérales dont le « pas » correspond à la fréquence de rotation de l'arbre qui porte le défaut.

C'est ce qu'on appelle des bandes latérales de modulation d'amplitude. Les amplitudes des bandes latérales sont généralement très faibles devant l'amplitude de la fréquence d'engrènement.

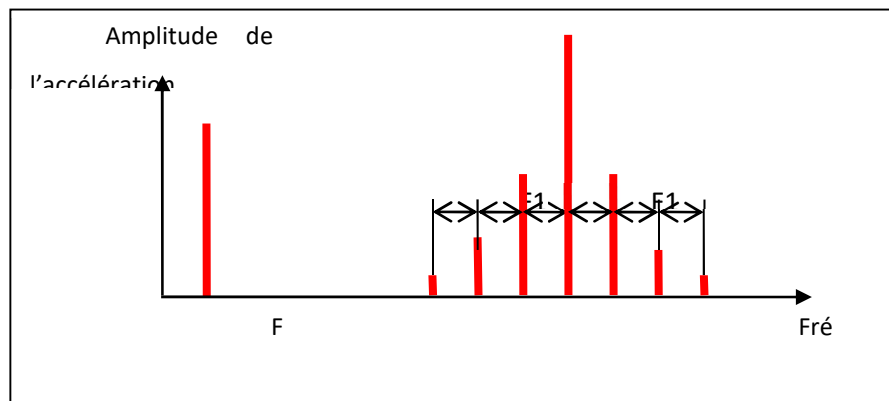


Figure N° 75 Spectre théorique d'un engrenage présentant un défaut

IV. 3. Signatures vibratoires des Défauts électriques et électromagnétiques

Pour bien des machines électriques comme les alternateurs ou les moteurs synchrones, les fréquences significatives d'une anomalie électromagnétique, multiples de la fréquence du courant d'alimentation, sont confondues avec la fréquence de rotation de la machine ou de ses harmoniques.

Pour ces machines, le moyen le plus simple d'identifier une anomalie électromagnétique est de couper brutalement le courant d'alimentation (lorsque Cela est possible) : si l'amplitude vibratoire chute brutalement pour les harmoniques de la fréquence du courant, c'est qu'il s'agit bien d'un défaut électromagnétique

IV. 3.1 Défauts électromagnétiques sur moteurs asynchrones

Dans un moteur asynchrone, la fréquence de rotation dépend :

- Du nombre de paires p des pôles,
- De la fréquence du courant d'alimentation f_{crt} ou f_A ,
- Du glissement g , lui-même fonction de la charge.
- De la fréquence de champ tournantes f_s
- De la fréquence d'encoches principale f_{enc}

Ce sont la recherche et l'étude de la fréquence de ce glissement qui permettent

Le diagnostic des défauts électromagnétiques affectant les moteurs asynchrones.

Ces défauts sont de deux types :

- Les défauts dus à des anomalies électromagnétiques sur stator ;
- Les défauts dus à des anomalies sur rotor

IV. 3.1.1 Défauts électromagnétiques sur stator (défauts stationnaires)

Ces défauts stationnaires (statoriques) ont deux origines :

- **La variation d'entrefer** (figure), elle-même provoquée par une déformation ou l'ovalisation du corps du stator...
- **La variation de courant**, elle-même provoquée par un défaut d'enroulement au niveau du stator, un déséquilibre de phase, des spires ou tôles statoriques de mauvaise qualité, en court-circuit ou desserrées, ou encore un défaut d'isolement...

Ces défauts peuvent être observés de manières différentes :

A. Observation Basses fréquences :

Autour de deux fois la fréquence du courant d'alimentation, aussi Les images vibratoires théoriques des défauts de type « variation de courant » et « Variation d'entrefer » sont identiques avec la prépondérance d'une **raie dont la**

fréquence correspond à l'ordre 2 de la fréquence du courant d'alimentation égale à 100 Hz pour un courant d'alimentation à 50 Hz

Cependant, dans le cas d'un défaut **d'enroulement statorique**, l'amplitude de la raie à 100 Hz est peu dépendante de la charge, alors que dans le cas **d'une variation d'entrefer** due à une déformation du stator, l'amplitude de la raie dépendra fortement de cette charge, pour mieux jugée en est bousions d'un analyse zoom pour certains cases.

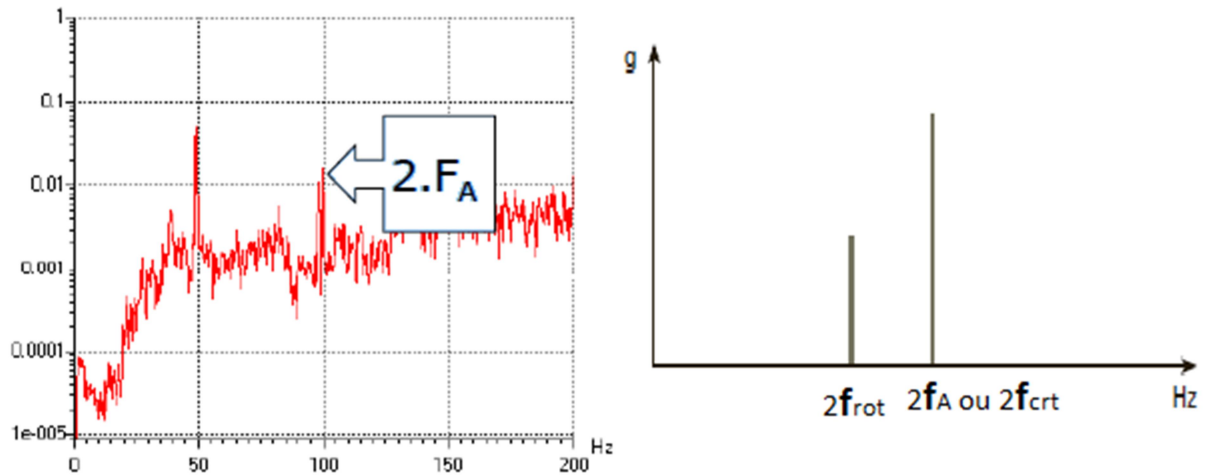


Figure N°76 : Image vibratoire théorique d'un défaut dû à une anomalie électromagnétique affectant le stator (f_{crt} : fréquence principale du courant d'alimentation) [formation str].

B. Observations aux moyennes fréquences

Les phénomènes vibratoires aux moyennes fréquences revient à les étudier autour de la fréquence de passage des encoches (figure), plus simplement appelée fréquence d'encoches et égale à la fréquence de rotation multipliée par le nombre d'encoches du rotor, Dans le cas d'une variation d'entrefer, à la raie dont la fréquence correspond à la fréquence d'encoches est associée une famille de bandes latérales dont le **pas correspond à deux fois la fréquence du courant d'alimentation**, mais avec des valeurs d'amplitude nettement dissymétriques de part et d'autre de la fréquence d'encoches.

Cette technique de dépistage autour de la fréquence d'encoches peut être utilisée non seulement sur les moteurs asynchrones mais aussi sur les **moteurs synchrones**, puisqu'elle ne se sert pas du glissement comme moyen d'observation

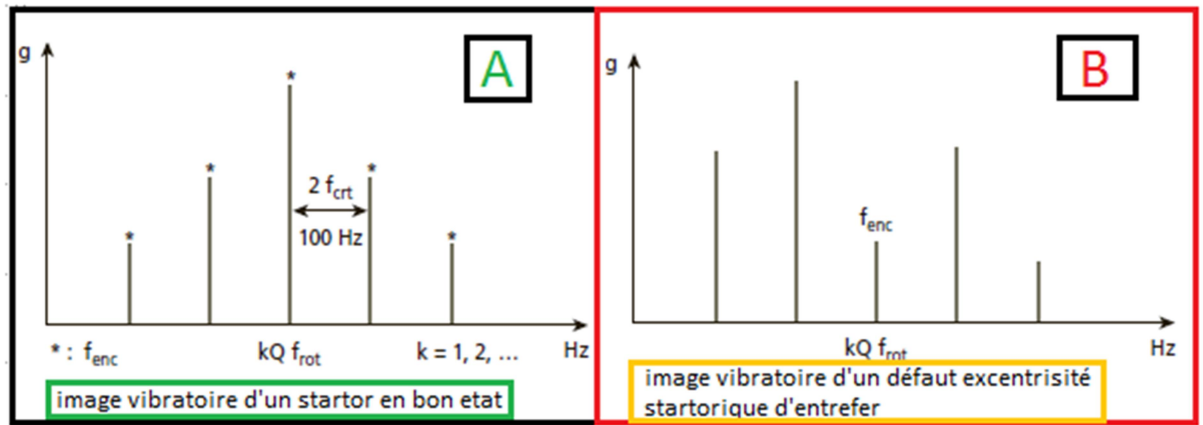


Figure N° 77 : Les Images vibratoires théorique qui montrent l'évolutions d'une excentricité statique d'entre-fer. La nette dissymétrie des niveaux d'amplitude des bandes latérales de modulation de pas 100 Hz réparties autour de la fréquence d'encoches, indique une anomalie électromagnétique sur le stator, (Q = nombre d'encoches).

IV. 3.1.1 Défauts électromagnétiques rotoriques (défauts tournants)

Comme pour les défauts sur stator, ils ont deux origines :

➤ **L'excentricité du rotor** d'entrefer, provoquée par un désalignement,

Une déformation du rotor ou un jeu de paliers important

- L'excentricité statique (Figure a) : le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe.
- L'excentricité dynamique (Figure b) : le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe (est le plus important).
- L'excentricité mixte : associant les deux cas précédemment cités

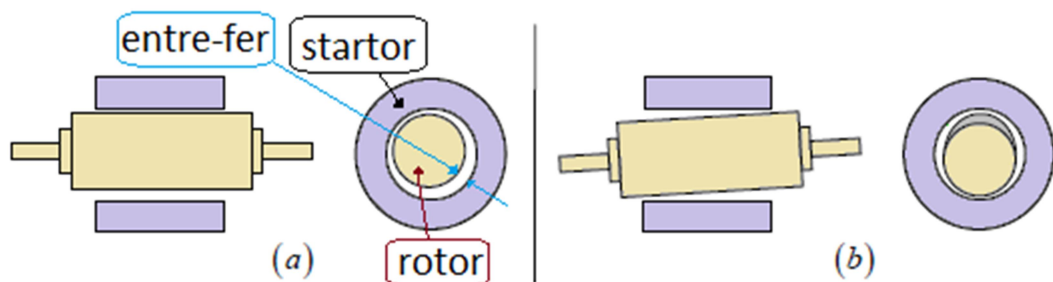


Figure N° 78 : Modélisation schématique de l'excentricité a) statique et b) dynamique

➤ **La variation de courant**, provoquée par des barres rotoriques cassées ou fissurées, par une anomalie de résistivité au niveau des liaisons barres anneau, par des tôles ou des spires rotoriques en mauvais état ou en court-circuit.

Ces défauts peuvent être décelés autour de la fréquence de rotation et, à l'instar des défauts statoriques, autour de la fréquence d'encoches ou de ses harmoniques

A. Observations autour de la fréquence de rotation

Le balourd résiduel du rotor (il en reste toujours un) tourne à la fréquence de rotation du rotor (f_{rot}). Toute anomalie rotorique (par exemple, barres cassées ou fissurées, mauvaise qualité de la mise en spires, défaut de liaison barres-anneaux) ou toute variation dynamique d'entrefer va induire une modulation de l'amplitude et/ou de la fréquence de rotation et de ses harmoniques. L'image vibratoire d'un tel défaut se traduit par l'apparition de bandes latérales autour des premiers harmoniques, dont le **pas correspond** à la fréquence

De glissement f_g , multipliée par deux fois le nombre p de paires de pôles, soit

$$2 p f_g, \text{ que l'on déduit de la relation suivante : } f_g = (f_{crt}/p - f_{rot})$$

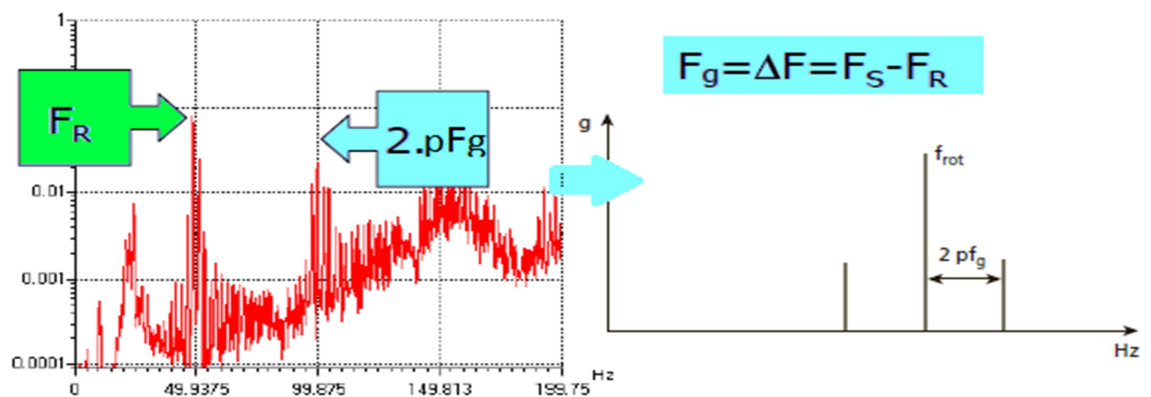


Figure N° 79 : Image vibratoire théorique d'un défaut rotorique modulant la fréquence de rotation. (f_g = fréquence de glissement) [formation str].

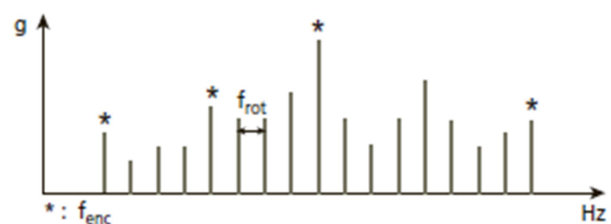
B. Observations autour de la fréquence d'encoches

1 / Défaut de type excentricité dynamique d'entrefer

L'image vibratoire est caractérisée par de nombreuses bandes latérales situées de part et d'autre de la fréquence d'encoches ou de ses harmoniques, dont le **pas correspond** à la fréquence de rotation de l'arbre

Figure N° 80 : Image vibratoire théorique d'une variation d'entrefer.

[A-M]



Cette technique de dépistage d'une excentricité dynamique d'entrefer autour de la fréquence d'encoches peut être utilisée non seulement sur les moteurs asynchrones, mais aussi sur les moteurs synchrones, puisqu'elle ne se sert pas du glissement comme moyen d'observation.

2 / Défaut de type barres cassées ou fissurées

Ce cas, plus difficile à diagnostiquer, se caractérise par l'évolution ou l'amplitude anormale de bandes latérales autour de la fréquence d'encoches ou de ses harmoniques, dont le **pas correspond à 2 p fois la fréquence de glissement, soit 2 pfg**. Le dépistage de ce défaut nécessite souvent un zoom puissant capable de faire ressortir la fréquence de glissement, qui peut être très faible en cas de moteur peu chargé.