

I.1. INTRODUCTION

Le monde industriel et le monde des transports disposent de machine et d'installation. De plus en plus performante et complexe, les exigences de haute sécurité, la réduction des coûts d'exploitation et la maîtrise de la disponibilité des équipements donnent à la maintenance des systèmes, un rôle prépondérant, elle doit permettre de n'intervenir qu'en présence d'éléments défectueux, de minimiser le temps de réparation, et de fournir un diagnostic fiable et facilement interprétable malgré la complexité des équipements.

Nous intéressons principalement aux transmissions des puissances mécaniques utilisées dans différents domaines tel que l'industrie: l'aéronautique, l'automobile et les transports ferroviaires.

La maintenance de ces systèmes de transmission occupe un temps relativement important par rapport à leur temps d'utilisation, actuellement la recherche scientifique vise à développer les outils nécessaires à l'optimisation de la maintenance de tels systèmes

I.2. DEFINITIONS

D'après la norme AFNOR X60-010 « les activités de maintenance conditionnelle sont déclenchés suivant des critères prédéterminés significatifs de l'état de dégradation du bien ou de service. Les remplacements ou les remises en état des pièces, les remplacements ou les appoints des fluides ont lieu après une analyse de leur état de dégradation. Une décision volontaire est alors prise pour effectuer les remplacements ou les remises en état nécessaire ». [1]

1°. Définition selon la norme EN 13306/2001

Selon la norme européenne, "La maintenance est l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à la maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise."

2°. Définition selon la norme DIN 31051

L'institut allemand de normalisation DIN définit la maintenance comme "l'ensemble des mesures visant à maintenir ou à rétablir l'état prévu d'un bien ainsi qu'à constater et à juger l'état actuel."

3°. Définition selon la norme NF X60-010

La définition selon AFNOR (Association Française de Normalisation) de la maintenance industrielle est la suivante :

"Ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié, ou dans un état où il est en mesure d'assurer un service déterminé". Tel que :

- L'action de MAINTENIR induit la notion de prévention sur un système en fonctionnement.
- L'action de RETABLIR induit la notion de correction consécutive à une perte de fonction.

I.3. OBJECTIFS [02]

Au niveau d'une entreprise industrielle, la fonction maintenance doit être capable de :

1. Assurer la rentabilité des équipements en tenant compte de la politique définie par l'entreprise.
2. Procéder à des études préalables afin de permettre la réduction des coûts et des interventions.
3. Préparer le travail.
4. Etudier les conditions de fonctionnement, les défaillances possibles et les conditions d'intervention.

I.4. PHILOSOPHIES DE MAINTENANCE

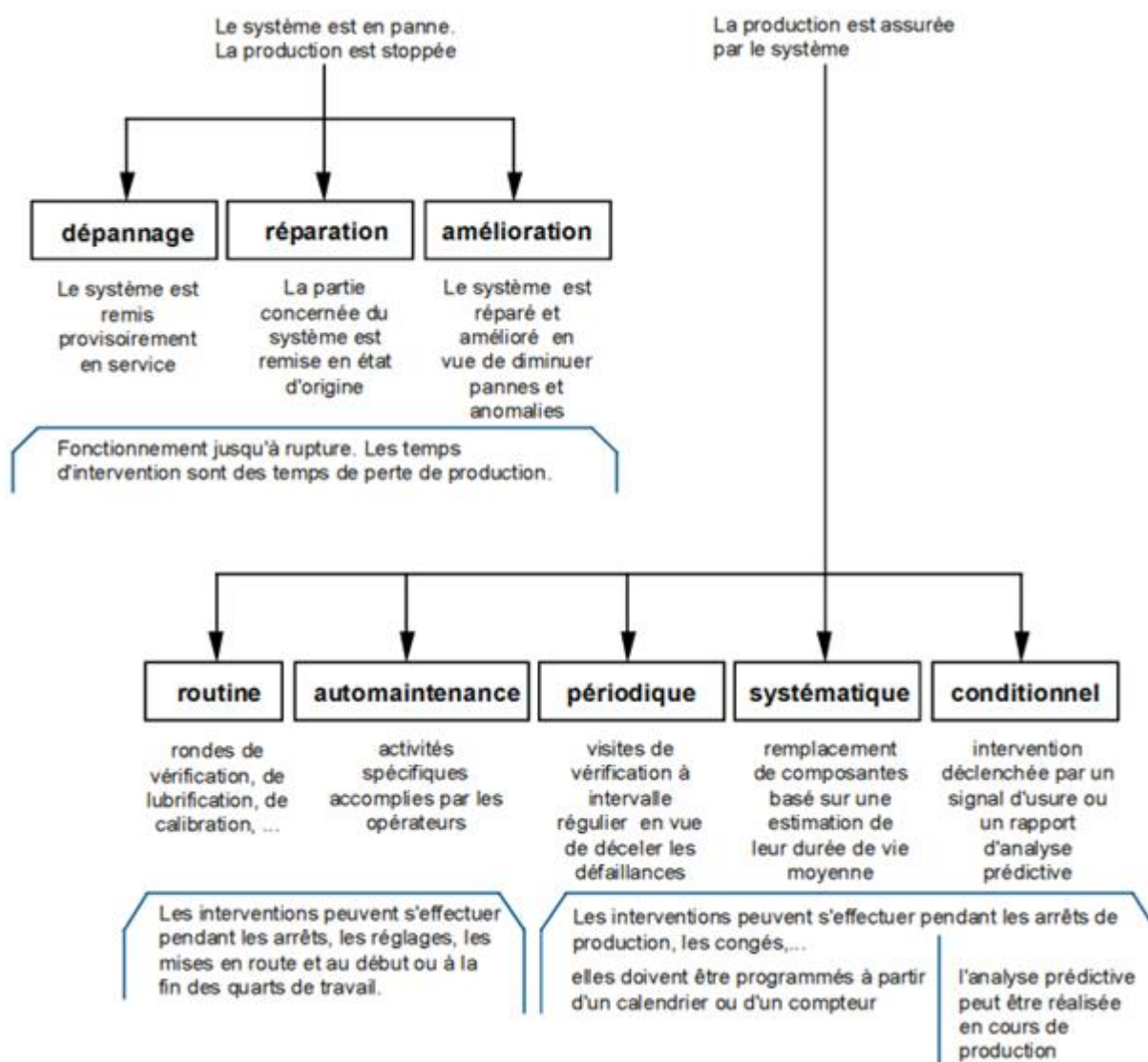


Figure. I.1 : Différentes philosophies de la maintenance

Les différentes philosophies de maintenance employées par les différentes installations industrielles sont légèrement semblables, malgré la grande différence dans la nature de leurs opérations. Ces philosophies sont habituellement classées en quatre catégories (**Figure 1.1**)

- Corrective ou maintenance de catastrophe,
- Préventive systématique: Maintenance à base de temps ou de délais,
- Préventive conditionnelle (ou Prédictive) : Maintenance à base de conditions,
- Préventive Proactive : maintenance de prévention (systématique + conditionnelle)

I.4.1. Maintenance corrective [02]

La maintenance corrective correspond à une attitude passive d'attente de la panne ou de l'incident. Elle est n'est entreprise qu'après constat d'un état de panne. La réaction consiste alors à éliminer le défaut, grâce à un dépannage ou une réparation. C'est donc l'improvisation avec toutes les conséquences qui en résultent (pertes de temps, arrêts prolongés des machines, absences de schémas de dépannage), elle est appelée aussi maintenance de catastrophe. C'est la politique d'entretien la plus coûteuse vue sous l'aspect coûts directs et coûts indirects. L'opération de maintenance corrective n'a pas de condition d'applications particulières.

I.4.2. Maintenance préventive [02]

I.4.2.1. Principe

La maintenance préventive correspond à la volonté de **prévoir la dégradation** du bien (matériel ou équipement), afin d'éviter d'être pris au dépourvu par la panne. Dans ce type de maintenance, on n'attend pas que le matériel ou l'équipement tombe en panne. Elle est effectuée selon des critères prédéterminés, dans l'intention de réduire la probabilité de **défaillance** d'un bien ou d'une dégradation d'un service rendu. Elle consiste à :

- Procéder à des visites systématiques en cours de marche ou à l'arrêt pour suivre les usures des pièces. Ces visites sont à caractère périodiques et déterminées d'avance ;
- Faire des contrôles en cours de marche ou à l'arrêt ;
- Opérer à des réglages et resserrage et changer éventuellement des pièces défectueuses.

I.4.2.2. Types de maintenance préventive [03]

1°. Maintenance préventive systématique

a. Définition

« C'est une politique de maintenance effectuée selon un échéancier établi en fonction du temps Ou le nombre d'unités d'usage. ». Cette périodicité d'intervention est déterminée à partir de la mise en service ou après une révision partielle ou complète. Même si les temps est l'unité la plus

répandue, d'autres unités peuvent être retenues telles que : la quantité de produits fabriqués ; la longueur de produits fabriqués ; la distance parcourue ; la masse de produits fabriqués ; le nombre de cycle effectué ; etc.

b. Conditions d'applications

La maintenance préventive systématique nécessite de connaître : le comportement du matériel ; les usures ; les modes de dégradations ; le temps moyen de bon fonctionnement entre deux avaries (MTBF).

c. Les avantages

- Planification des arrêts d'entretien.
- Optimisation des l'intervention (préparation).
- Limite les risques de panne.

d. Les inconvénients

- Coût de maintenance élevé.
- Approche statistique.
- Risque induit par une intervention parfois non nécessaire. [5]

e. Domaines d'applications

La maintenance systématique peut être appliquée dans les cas suivants :

Equipements soumis à la législation en vigueur (sécurité réglementée). Par exemples : appareil de levage, extincteur (incendie), réservoir sous pression, convoyeurs, ascenseurs, monte-charge, etc. Equipements dont la panne risque de provoquer des accidents graves. Par exemples : tous les matériels assurant le transport en commun des personnes, avion, trains, etc. Equipements ayant un coût de défaillance élevé. Par exemples : éléments d'une chaîne automatisée, systèmes fonctionnant en continu. Equipements dont les dépenses de fonctionnement deviennent anormalement élevés au cours de leur temps de service. Par exemples : consommation excessive d'énergie, allumage et carburation déréglés pour les véhicules à moteurs thermiques.

2°. Maintenance préventive conditionnelle**a. Définition**

C'est une politique de maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé, (autodiagnostic, information d'un capteur, mesure d'une usure, etc.), révélateur de l'état de dégradation du bien. La maintenance conditionnelle est donc une maintenance dépendant de l'expérience et faisant intervenir des informations recueillies en temps réel. On l'appelle parfois maintenance prédictive.

b. Conditions d'applications

La maintenance préventive conditionnelle se caractérise par la mise en évidence des points faibles. Suivant les cas il est souhaitable de les mettre sous surveillance et à partir de là, nous pouvons décider d'une intervention lorsqu'un certain seuil est atteint, mais les contrôles demeurent systématiques et font partie des moyens de contrôle non destructifs. Tous les matériels sont concernés.

Cette maintenance préventive conditionnelle se fait par des mesures pertinentes sur le matériel en fonctionnement et concerne des paramètres mesurés tels que :

- Le niveau et la qualité d'une huile ;
- Les températures et les pressions ;
- La tension et l'intensité du matériel électrique ;
- **Les vibrations et les jeux mécaniques ;**
- Thermographie.
- Etc.

De tous les paramètres énumérés, l'analyse vibratoire est de loin la plus riche quant aux informations recueillies. Sa compréhension autorise la prise à bon en pleine connaissance de cause des décisions qui sont à la base d'une maintenance préventive conditionnelle. La surveillance peut être soit périodique, soit continue.

c. Les avantages

- Optimisation de la durée de fonctionnement.
- Optimisation de l'intervention (préparation).
- Evaluation réelle de l'état de la machine.
- Evite les pertes de production.

d. Les inconvénients

- Coût de l'investissement (homme / matériel).
- Astreindre à un programme suivi. [5]

e. Organisation de la maintenance conditionnelle

On définit l'organisation de la maintenance conditionnelle par l'organigramme suivant

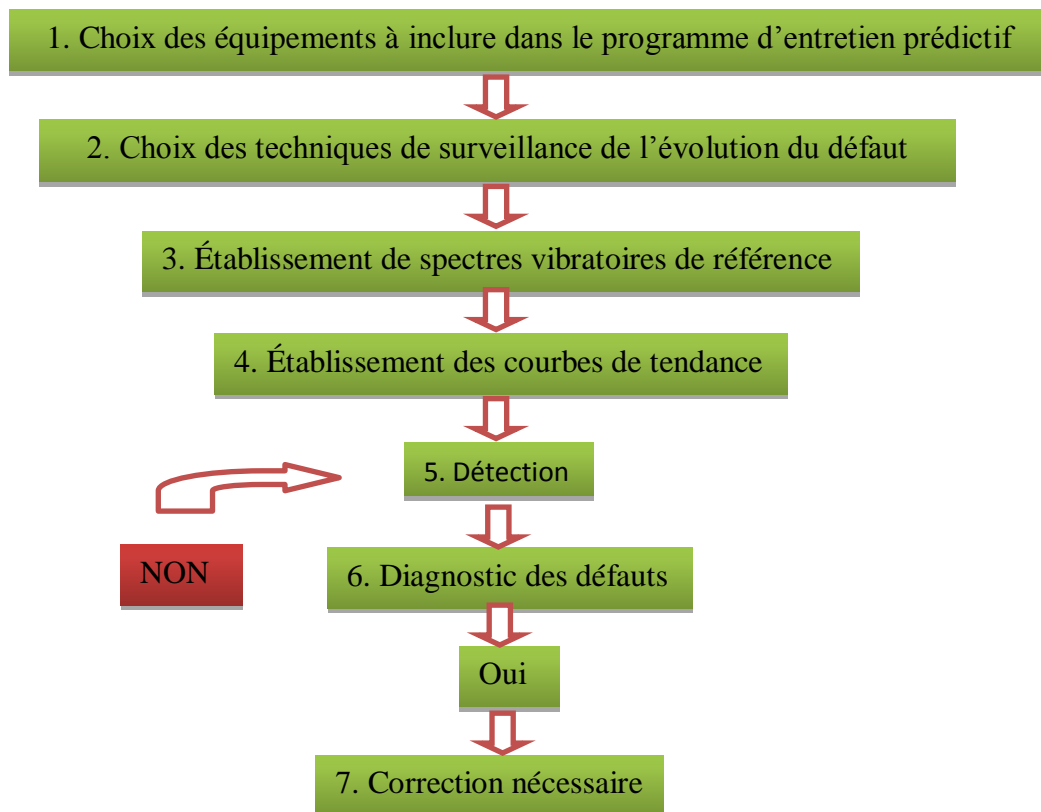


Figure I.2 : Organigramme de la maintenance conditionnelle [6]

f. Domaines d'application

Tous les matériels sont concernés. Ce type de maintenance préventive conditionnelle se fait par des mesures sur le matériel en fonctionnement. Ses Paramètres mesurés porter par exemple sur :

- Le niveau et la qualité d'une huile.
- Les températures et les pressions.
- La tension et l'intensité des matériels électriques.
- Les vibrations et les jeux mécaniques.

I.4.2.3. Opérations de maintenance préventive [03]

Les opérations de maintenance préventive peuvent être classées en quatre groupes d'actions.

Le premier groupe concerne **l'entretien** ; il comprend : Le nettoyage, la dépollution et le retraitement de surface.

Le deuxième groupe concerne **la surveillance** ; elle comprend : l'inspection, le contrôle et la visite.

Le troisième groupe concerne **la révision** ; elle comprend : La révision partielle et la révision générale.

Le quatrième groupe concerne **la préservation** ; il comprend : La mise en conservation, la mise en survie et la mise en service.

1°. L'entretien

L'entretien comprend les opérations courantes et régulières de la maintenance préventive tels que le nettoyage, la dépollution et le retraitement de surface qu'ils soient externes ou internes. Par exemple, on peut signaler pour le nettoyage extérieur l'existence de divers types de nettoyage en fonction de la structure et de l'état d'un bien, des produits utilisés et de la méthode employée (les solutions alcalines aqueuses, les solvants organiques, le soufflage aux abrasifs, etc.). Il faut aussi préciser que le retraitement de surface inclut les opérations suivantes de la lubrification et de graissage.

2°. La surveillance

Les termes définis ci-après sont représentatifs des opérations nécessaires pour maîtriser l'évolution de l'état réel du bien, effectuées de manière continue ou à des intervalles prédéterminés ou non, calculés sur le temps ou le nombre d'unités d'usage.

a. L'inspection : C'est une activité de surveillance s'exerçant dans le cadre d'une mission définie. Elle n'est pas obligatoirement limitée à la comparaison avec des données préétablies. Cette activité peut s'exercer notamment au moyen de ronde.

b. Le contrôle : C'est une vérification de la conformité à des données préétablies, suivie d'un jugement. Le contrôle peut :

- comporter une activité d'information,
- inclure une décision : acceptation, rejet, ajournement,
- déboucher sur des actions correctives.

c. La visite : C'est une opération consistant en un examen détaillé et prédéterminé de tout (visite générale) ou partie (visite limitée) des différents éléments du bien et pouvant impliquer des opérations de maintenance du 1er niveau.

3°. La révision

C'est l'ensemble des actions d'examen, de contrôles et des interventions effectuées en vue d'assurer le bien contre toute défaillance majeure ou critique pendant un temps ou pour un nombre d'unités d'usage donné. Il est d'usage de distinguer suivant l'étendue de cette opération les révisions partielles des révisions générales. Dans les deux cas, cette opération implique la dépose de différents sous-ensembles. Ainsi le terme de révision ne doit en aucun cas être confondu avec les termes visites, contrôles, inspections, etc. Les deux types d'opération définis (révision partielle ou générale) relèvent du 4ème niveau de la maintenance.

I.4.2.4. Défaits et paramètres de suivi

En maintenance prédictive, les principaux paramètres utilisés pour le suivi des équipements sont (Tableau 1.1): Température ; Pression ; Débit ; Courant ; Tension ; Analyse des huiles et des gaz ; Thermographie ; Vibrations, etc....

Tableau 1.1 : Relation Défaits-Paramètres-Moyens de suivi

Anomalies ou défauts	Paramètres de suivi	Moyens utilisés	Exemple D'appareils associés
Balourd	Vibrations	Analyseur de vibration	STELL DIAGNOSTIC
Désalignement des arbres			
Défaut roulement	Onde de choc	Analyseur d'ondes de choc	Pistolet SPM
	Ultra-sons	Analyseur ultrasonique	Sonde ultrasonique C.M.D.T
	Température	Thermomètres	Caméra infrarouge H.G.H
Echauffement	Thermographie infrarouge		
Fuites	Débit	Débitmètre	Compteur de particules Mesure de la teneur en eau
	Pression	Manomètre	
Présence de particules métalliques	Dégradation des huiles	Analyseur d'huile (Ferro graphie, spectrographie)	Valise de colorimétrie MILLIPORE
		Analyseur d'huile (Colorimétrie)	

I.5 LA SURVEILLANCE

I.5.1. Introduction

Surveiller une machine nécessite de procéder au préalable d'un certain nombre d'indicateurs. Un indicateur de surveillance est issu d'un paramètre ou d'une grandeur plus au moins élaboré dont l'acquisition est le plus souvent possible en fonctionnement. Un indicateur doit, par définition, caractériser l'état ou les performances d'une machine. Son évolution dans le temps doit être significative de l'apparition ou de l'aggravation d'un défaut ou d'un ensemble de défauts. la température d'un palier, le taux de concentration dans le lubrifiant de particules métalliques et le spectre dimensionnel de ces derniers, le rendement mécanique ou thermodynamique d'une machine le bruit, le spectre ou la forme du courant d'alimentation d'un moteur , le taux de rebuts de fabrication ...sont autant d'indicateurs susceptibles de représenter l'état ou les performances d'équipent et d'en suivre l'évolution dans le temps.

En surveillance on distingue deux classes d'indicateurs :

- Les indicateurs principaux ou précoces qui permettent d'identifier de manière précoce l'apparition d'anomalies, sources potentielles de pannes à plus ou moins longtermes, et d'en suivre l'évolution.
- Les indicateurs secondaires ou tardifs pour lesquels une évolution significative traduit déjà des dégradations conséquentes et nécessite un arrêt à brève échéance, voire immédiat, de l'installation.

Dans la plupart des cas, cette forme de surveillance permet de détecter la présence de défauts potentiellement générateur d'incident graves à court terme oubliés par les autres techniques de surveillance (fuites de garniture...).ces oublis peuvent être la conséquence :

- De l'inadaptation des techniques de surveillance retenues à la détection de ce défaut
- De coût de sa détection,
- De la non –prise en compte, volontaire ou non, de l'éventualité de son apparition

I.5.2. La surveillance vibratoire

Turbines, pompes, moteurs, compresseurs, alternateurs, centrifugeuses, ventilateurs...

Toutes ces machines, que l'on dit tournantes, ont un point commun : elles comprennent des organes en rotation, suivant les cas, il peut s'agir de structures relativement simples, Constituées d'un seul arbre en rotation à travers un ou plusieurs roulements, ou de machines plus complexes composées de plusieurs arbres tournant à des vitesses de rotation différentes... Mais ce qui caractérise avant tout ces machines, c'est qu'elles sont composées. D'organes fragiles (roulements et engrenages, notamment) soumis à des contraintes Mécaniques importantes et à des environnements industriels difficiles. Les sources de Défaillance sont donc multiples : l'écaillage d'un roulement, la rupture

d'une dent d'un engrenage, le désalignement d'un des axes, etc., lorsque la machine joue un rôle vital dans la production (c'est le cas par exemple d'une presse dans le domaine de l'imprimerie, d'un broyeur de cimenterie ou encore d'une centrifugeuse dans un réacteur chimique...), ces défauts peuvent s'avérer lourds de conséquences. Pour éviter des arrêts de production imprévus et les pertes économiques qui en découlent, il faut surveiller en permanence ces équipements et traquer tous les signes précurseurs de défauts avant qu'il ne soit trop tard. [7]

I.5.3 Indicateurs vibratoire

a. définition

Un indicateur de surveillance est une 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 défaut ou d'un ensemble de défauts.

b. Choix des indicateurs

Les indicateurs de surveillances peuvent être classés en trois grandes familles :

- Les indicateurs scalaires qui permettent de suivre l'évolution d'une grandeur dérivant de la puissance et/ou de l'amplitude crête du signal vibratoire
- Les indicateurs spectraux de suivre à la fois l'évolution de la forme du signal, des amplitudes de chacune des composantes le constituant et de sa puissance ;
- Les indicateurs spécifiques qui permettent la détection précoce d'un défaut particulier ou d'un symptôme précis.

c. Les différents techniques de surveillances vibratoires

La surveillance d'une machine peut faire appel à une ou plusieurs de ces techniques. Le choix d'un mode de surveillance est fonction de la fiabilité recherchée et, par voie de conséquence, de la nature et de la complexité de chaque machine et des enjeux économiques.

- **Par indicateur scalaires « large bande »**

Comparaison à un seuil d'une valeur d'une grandeur caractéristique du signal vibratoire (valeur efficace, facteur de crête ...) préalablement défini, calculée ou mesurée dans les domaines temporels dans une bande fréquentielle étendue.

- **Par indicateurs scalaires « bande étroite »**

Comparaison à un seuil d'une valeur d'une grandeur caractéristique de signal vibratoire (valeur efficace, facteur de crête ...) préalablement définie, calculée ou mesurée dans le domaine temporel dans une bande fréquentielle étroite. De tels indicateurs peuvent être dédiés à la surveillance d'un défaut donné présentant des images vibratoires simples.

- **Par indicateurs spectraux**

Comparaison d'une image spectrale du signal à un gabarit à partir d'une image spectrale de référence représentative de la machine surveillée en bon état .On entend par image spectrale la transformée de Fourier discrète du signal direct (spectre de type [0-F] ou de type [F1-F2]) ou ayant fait l'objet d'un traitement préalable dans le domaine temporel (filtrage passe-bande de démodulation (HFRT et DAFP) ou fréquentiel (spectre)).

- **Par indicateurs scalaires spécifiques**

Comparaison à un seuil d'une valeur d'un indicateur scalaire défini à partir d'un indicateur spectral et représentatif de l'image vibratoire d'un défaut donné (balourd, instabilité, frottement, désalignement, jeux, écaillages de roulement, dégradation des barres rotoriques, défauts d'engrènement,...) Dans la mesure où toutes les valeurs des indicateurs peuvent être définis à tout moment et leurs profils d'évolution sont immédiatement disponibles.

- **Par indicateurs vectoriels**

Suivi d'évolution de la forme (orbite, déformée) du mouvement des paliers, d'une ligne d'arbres dans ses paliers et/ou la position de l'arbre dans ces derniers.

Remarque

Choisir un indicateur ou un ensemble d'indicateurs et en suivre l'évolution dans le temps signifie donc implicitement que, de manière délibérée, on ne surveille que les défauts dont l'apparition ou l'aggravation a une incidence sur la valeur du ou des indicateurs retenus.

d. Seuil d'un indicateur

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

- De l'indicateur considéré et de la nature des défauts associés à ce dernier (déséquilibre, desserrage, désalignement, écaillage de roulement, instabilité de paliers ...)
- Du type de la machine surveillée et de ses conditions de fonctionnement (vitesse de rotation notamment).

Tout dépassement de seuil doit déclencher la mise en œuvre d'une procédure parfaitement définie comprenant un certain nombre d'opérations (validation de l'alarme, diagnostic plus élaboré, modification de la périodicité et du mode de surveillance, programmation d'une action corrective, arrêt immédiat de l'installation). Le concept de seuil à un indicateur est un des points clés de la surveillance et de la maintenance conditionnelle .Tant que la valeur d'un indicateur n'excède pas une valeur prédéfinie ou 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,

- Une valeur trop élevée rend la détection précoce d'un défaut impossible et une panne peut même se produire sans la moindre alarme préalable.

Dans ces deux situations, la surveillance se trouve discréditée. Les systèmes de surveillance offrent souvent la possibilité de définir au moins deux hiérarchisés : un premier seuil dit seuil d'alarme, un second seuil dit de danger. Le dépassement du seuil d'alarme doit systématiquement déclencher une procédure de diagnostic afin de localiser, voire de déterminer, l'origine exacte de l'anomalie qui a déclenché cette alarme. Selon la nature du défaut identifié et sa gravité, les modalités de surveillance seront modifiées pour mieux suivre son évolution ou un arrêt pour inspection ou remise en état sera programmé. Le dépassement du seuil de danger nécessite de procéder à un diagnostic immédiat de l'état de l'installation pour statuer sur l'urgence d'un arrêt et d'une action corrective. Il s'agit alors plus d'une action de sauvegarde et de mise en sécurité de l'installation que d'une action de surveillance effectuée dans le cadre d'une politique de maintenance préventive. Dans ce cas, le choix du seuil de danger ou plus exactement de sécurité est extrêmement important :

Un déclenchement intempestif se traduit par des pertes d'exploitation importantes consécutives à l'arrêt et à l'inspection de l'installation et au redémarrage du procédé de fabrication.

Un déclenchement après dégradation conduit à des coûts de réparation, à des temps d'immobilisation et à des pertes d'exploitation considérablement plus importantes.

Une alarme n'est pas forcément associée à un dépassement de seuil. Elle peut être également le résultat d'une variation relative de la valeur d'indicateur par rapport à sa valeur précédente ou à la moyenne d'un ensemble de valeurs antérieures choisies par l'utilisateur. Une alarme n'est pas uniquement associée à l'évolution d'un indicateur scalaire. Elle peut être également associée à l'évolution d'un indicateur sensible à la modification de la forme du signal (alarme sur dépassement de gabarit) dans le domaine spectral ou cepstral. Ces modifications de forme peuvent s'effectuer avec une augmentation faible, induisent des forces d'excitation dont l'amplitude ou la fréquence sont modulées (certains défauts électromagnétiques, d'engrènement, jeux d'accouplement, de clavette...).

I.5.4 Les types de surveillance

a) Surveillance périodique

La surveillance périodique des machines tournantes a pris un essor considérable avec l'arrivée d'une nouvelle génération d'appareils : les collecteurs de données informatisés. L'adjonction à un instrument de mesures d'un convertisseur analogique numérique, d'une mémoire de stockage et d'une interface permettant la communication avec un micro-ordinateur révolutionné la surveillance des machines. Cette nouvelle génération d'outils, en permettant une gestion rapide d'un volume

considérable d'informations, a rendu possible la surveillance d'un nombre important de machines à un coût non prohibitif. C'est l'outil, tout au moins dans ses principes, dédié à la surveillance périodique des machines tournantes. L'utilisateur définit au préalable pour chaque installation les emplacements des capteurs et pour chaque emplacement de capteur, un ensemble d'indicateurs adaptés à la machine à surveiller. Il décharge en suite sa collecte dans la mémoire d'un micro-ordinateur qui va procéder, par le biais d'un logiciel, à un traitement des données et à leur édition sous forme de rapport prédéfini (rapport d'alarme, courbe de tendance....).

b) Surveillance permanente

La surveillance permanente se différencie de la surveillance périodique par l'effet que les paliers de la machine sont équipés de capteurs à demeure et que les signaux délivrés par ces derniers sont traités en temps réel ou multiplexés. Le coût des capteurs des câblages jusqu'à l'unité de traitement du signal est le principal obstacle à l'extension de ce mode de surveillance, qui concerne les installations les plus stratégiques et notamment les installations à paliers fluides.

1.5.5 Fiabilité de la surveillance

La fiabilité de la surveillance par analyse de vibrations est son coût dépendent des critères suivants

a. Choix des couples indicateurs/seuils

Ils conditionnent les techniques de surveillance et de traitement des signaux à mettre en œuvre et, par voie de conséquence, les outils d'investigation et le niveau de qualification du personnel.

b. Type de vibrations à mesurer

Une mesure de vibration absolue de palier s'effectue avec un capteur de vibration absolu, le plus souvent avec accéléromètre, et ne nécessite pas obligatoirement la fixation à demeure du capteur. Une mesure de vibration relative d'arbre s'effectue à partir d'un capteur de proximité le plus souvent avec un capteur à courant de Foucault, et nécessite la fixation à demeure du capteur et un traitement spécifique de l'état de surface de l'arbre dans les zones de visées des capteurs.

La surveillance des installations dont les paliers sont équipés des roulements peut être assurée de manière fiable par le traitement des signaux délivrés par un capteur de vibration absolue. La surveillance des installations à paliers fluides de suivre l'évolution des vibrations relatives d'arbres et absolues de palier.

c. Type de capteur choisi

Du fait de la limitation de la bande passante d'un vélocimétrie à 2KHz environ, l'utilisation à des fins de surveillance et de diagnostic de ce type de capteurs réduit sensiblement le nombre de défaut susceptibles d'être détectés. Elle ne permet pas le traitement des informations véhiculées par la réponse de résonances en moyennes et hautes fréquences qui apportent souvent des éléments déterminants pour identifier la nature de défauts. L'utilisation de capteurs de déplacement absolu

(Sismomètre) ne peut se justifier que dans des cas très spécifiques tels que le suivi d'évolution du profil dynamique de presses tournantes en contact (machines à papiers, laminoirs...).

d. Mode de fixation du capteur

Plusieurs modes de fixation existent : par goujon vissé ou embase collée, par embase magnétique ou par simple fixation avec une pointe de touche. Le mode de fixation a une incidence considérable sur la bande passante de ce dernier et surtout sur la répétitivité de la mesure qui est le fondement même de la surveillance. Seule les modes de fixation par goujon vissé ou par embase collée offre une réelle garantie sur la répétitivité des prises de mesures et une bande passante maximale. Cependant, avec quelques précautions la fixation par embase magnétique donne des résultats acceptables tout en réduisant sensiblement le temps de collecte. Par contre, l'utilisation d'une pointe de touche offre une mauvaise répétitivité des mesures et une très mauvaise bande passante. Malgré sa facilité de mise en œuvre, cette technique de prise de mesures doit donc vivement être déconseillée.

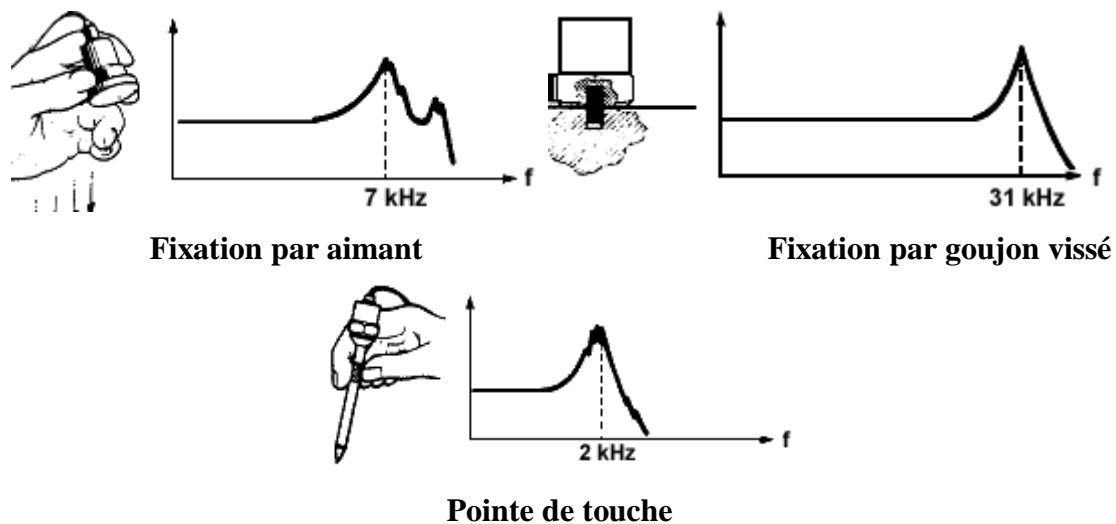


Figure I.3 : Mode de fixation du capteur

e. Nombre de points de mesures retenus pour représenter et suivre l'état de vibration de l'installation

Il est extrêmement important de ne pas oublier qu'une force est une grandeur vectorielle et qu'un capteur de vibration est un capteur directionnel. Certains défauts induisent des forces d'excitation directionnelles selon des directions bien définies (radial ou axial) et ne seront révélés que si le capteur est correctement positionné. A titre d'exemple, dans le cas d'une ligne d'arbres horizontale, l'anisotropie souvent très importante de la raideur radial d'un palier fait que l'apparition d'un déséquilibre, qui se manifeste par l'apparition d'une force dynamique radiale tournante, se traduira le plus souvent uniquement par une amplitude élevée de la composante d'ordre 1 de la fréquence de rotation en direction radiale horizontale. Par contre un desserrage, qui se traduit par l'apparition d'une force dynamique directionnelle, se traduira le plus souvent par une

amplitude élevée de cette même composante uniquement en direction radiale verticale. De même, certains défauts notamment de lignage ou d'engrènement se manifestent essentiellement par des efforts axiaux. Il n'est pas rare de rencontrer, suite à des déversements de bagues de roulement, des efforts dynamiques axiaux nettement plus élevés sur le palier « de guidage » que sur le palier « butée ».

f. Choix du mode de collecte

La collecte de données peut être automatique (continue en temps réel ou séquentielle par multiplexage) ou manuelle, et périodique. Dans ce dernier cas, la fiabilité et le coût de la surveillance dépendront aussi de la fréquence des collectes. Il est clair que, indépendamment des performances des indicateurs de surveillance retenus, seule la surveillance permanente est susceptible de détecter l'apparition brutale de défauts à évolution rapide (grippage d'un roulement fouettement ou frottement de l'arbre dans un palier) ou l'existence de défauts révélée seulement pour les conditions d'exploitation particulières ou dans des phases transitoires (défauts fugitifs ou intermittents).

I.6 LE DIAGNOSTIC

I.6.1. Introduction

La surveillance a pour finalité, tout au moins sous sa forme primaire de détecter, à un stade le plus précoce possible, l'existence d'une anomalie et d'en suivre l'évolution à partir d'indicateurs préalablement définis. Un indicateur de surveillance ne peut être sensible à l'ensemble des défauts susceptibles d'affecter une machine. La définition préalable des indicateurs de surveillance sous-entend donc que les indicateurs définis peuvent d'être insensible à l'apparition de défauts initialement non envisagés. Le diagnostic, au contraire, doit permettre de statuer sur l'existence d'anomalies, d'en identifier la nature et d'en préciser la gravité. Le diagnostic par analyse de vibration est non seulement l'outil de base de la maintenance prévisionnelle, mais aussi du contrôle qualité dans le cas d'une recette vibratoire d'une installation neuve ou après remise en état.

I.6.2. Définition et principes

Pour mieux cerner le concept de diagnostic, il est important de se reporter au sens premier de ce mot couramment utilisé dans le monde médical :

Diagnostic (du grec diagnostic, connaissance) : action d'identifier une maladie (un défaut, une anomalie) à partir d'une analyse méthodique des symptômes présentés par le malade (la machine). Formuler un diagnostic, c'est identifier des symptômes caractériser par des indicateurs qualitatifs et les relier à des causes. Un diagnostic est en général engagé lorsque des signes jugés anormaux se

manifestent. La finalité première de la surveillance est la détection la plus précoce possible de se signe anormaux.

Mais un diagnostic peut être également demandé :

Pour confirmer un comportement normal pour justifier, par exemple, le report d'une révision systématique ou d'un échange standard d'un organe, ou pour s'assurer du bon état vibratoire d'un équipement neuf ou venant d'être révisé (recette vibratoire).

Pour connaître le comportement vibratoire d'une machine pour des conditions d'exploitation nouvelles (augmentation des vitesses de rotation...).

Remarque

La définition du mot « diagnostic » entraîne un certain nombre de remarques :

Pour qu'un défaut affectant une machine puisse être qualifié de « maladie » il faut qu'il soit susceptible d'induire des défaillances ou des dégradations qui vont conduire à une altération ou la cessation de l'aptitude de la machine à accomplir sa fonction.

Un diagnostic est impossible sans la connaissance :

- Des caractéristiques mécaniques statiques et dynamiques de la machine, de ses modes de fonctionnement et de ses condition d'exploitation,
- De tous les défauts ou pathologies susceptibles d'induire des défaillances ou des dégradations,
- Des symptômes ou images vibratoires associés à chaque pathologie.

A titre d'exemple, il faut rechercher au moins quatre symptômes pour pouvoir identifier sans ambiguïté possible l'existence d'un desserrage d'un palier :

- Augmentation brutale de l'amplitude de la composante d'ordre 1 de la fréquence de rotation selon une direction radiale ;
- Apparition d'un peigne de raies très marqué dans le spectre « basses et moyennes fréquences » dont le pas correspond à l'ordre 1 de la fréquence de rotation. Cette évolution peuvent être quantifiée par l'augmentation significative de l'amplitude de la composante cepstrale dont la fréquence correspondant à la rotation de l'arbre ;
- Evolution brutale du déphasage relatif entre deux directions radiales orthogonales de la composante d'ordre 1 de la fréquence de rotation d'une valeur voisine de 90 à une valeur très proche de 0 ou 180 ;
- Excitation de résonances moyennes et hautes fréquences par chocs dont la fréquence de répétition correspond à la fréquence de rotation.
- Les symptômes de certains défauts et la totalité des symptômes associés à chaque défaut ne sont pas, à ce jour, tous identifiés à causer de la jeunesse de cette technique.

- Le diagnostic peut donc être entaché d'incertitude. Sa fiabilisation repose sur l'enrichissement des connaissances sur le comportement des machines, leurs modes de défaillances et leurs vitesses de dégradation.

I.6.3. Formulation du diagnostic

Un diagnostic n'est pas toujours, en l'état actuel des connaissances, une certitude mais plutôt un faisceau de présomptions convergentes. La formulation d'un diagnostic nécessite

- De connaître les fréquences caractéristiques de l'installation, le principe de fonctionnement et /ou le procédé de fabrication et les conditions exactes d'exploitation,
- De connaître les symptômes ou images vibratoires de tous les défauts potentiels susceptibles d'affecter une machine, ses modes de défaillances et les vitesses de dégradation,
- De rechercher de manière systématique l'existence éventuelle de ces symptômes dans les signaux délivrés par les capteurs,
- D'analyser les évolutions des indicateurs dits secondaires (concentration et spectre dimensionnelles particules véhiculées par le lubrifiant, température ou thermographie d'un palier, perte de rendement...),
- D'émettre un certain nombre d'hypothèse et de ne retenir par déduction que celle ou celles compatibles avec tous les symptômes (vibratoires et autres) identifiés .Le diagnostic est d'autant plus fiable que le nombre de symptômes identifiés est élevé.

I.6.4. Fiabilité du diagnostic

Le diagnostic sera souvent grandement facilité si l'expert dispose :

- De la fiche cinématique de la machine, d'un historique des pannes et des modifications apportées à la machine depuis sa mise en service,
- De l'ensemble des valeurs des indicateurs et spectres de base constituant la signature vibratoire initiale de l'installation considérée en bon état et de leurs profils d'évolution. La signature initiale apporte dans ce cas à l'expert les éléments de référence qui lui permettront de statuer sur l'importance et la gravité des évolutions. L'établissement de la signature initiale d'une installation doit donc faire l'objet du plus grand soin et faire appel aux mêmes techniques et méthodologies d'investigation que le diagnostic.

Ces éléments apportent une aide appréciable dans la formulation d'un diagnostic mais sont rarement disponibles – tout au moins sous une forme facile à exploiter (historique inexistant ou incomplet, résolution insuffisante des spectres constituant (la signature de base, indicateurs de surveillance mal définis...). Comme la fiabilité du diagnostic repose avant tout sur l'identification de toutes les images vibratoires contenues dans les signaux délivrés par des capteurs, le traitement du signal joue

un rôle essentiel. La fiabilisation de la phase d'identification systématique de toutes les images vibratoires nécessite de suivre une démarche rigoureuse et éligible en méthodologie.

I.6.5. Recherche des images vibratoires

Cette méthodologie doit présenter les étapes suivantes :

a) Étude préalable du fonctionnement de l'installation

Une bonne compréhension du fonctionnement de la machine et de ses organes annexes (ventilateur de refroidissement, pompe de lubrification, tour, fraiseuse ...), des incidences des conditions d'exploitation sur son comportement vibratoire et la connaissance des défauts susceptibles de l'affecter constituent une aide précieuse pour la recherche des symptômes et images vibratoires. L'établissement de la fiche cinématique (calcul des fréquences de rotation des toutes les lignes d'arbre, des fréquences d'accouplement, des fréquences de défauts de roulements, des fréquences de passage d'encoches, d'aubes...) permet :

- De connaître les fréquences des composantes cinématiques de base autour desquelles des traitements spécifiques (zoom, démodulation...) seront effectués,
- De déterminer les plages fréquentielles dans lesquelles se situent les images vibratoires des défauts à rechercher,
- De déterminer des résolutions fréquentielles Δf nécessaire à la mise en évidence de l'ensemble des phénomènes vibratoires susceptibles d'affecter chaque ligne d'arbre de l'installation considérée et les temps d'acquisition des signaux nécessaires à ces analyses.

Cette étude conditionne les phases de prise de mesures et de traitement de signal.

b) Prise de mesures

La prise des mesures est une phase essentielle qui conditionne la fiabilité du diagnostic. Une erreur à ce stade dans le choix des emplacements de capteurs, du type de capteurs, du type de capteurs ou des bandes passantes, peut se traduire par des pertes d'information préjudiciables à la formulation d'un diagnostic fiable. Les règles suivantes doivent être impérativement respectées :

- La mesure des vibrations absolues de paliers s'effectuera à partir de signaux délivrés par des accéléromètres.
- La bande passante de la chaîne d'acquisition (capteur et conditionneurs), sa dynamique d'acquisition, la fréquence de résonance des capteurs utilisés et leur mode de fixation seront en accord avec la cinématique de l'installation et les plages fréquentielles dans lesquelles se situent les images vibratoires des défauts à identifier
- La prise de mesure sera effectuée, en fonction des possibilités de mise en place des capteurs sur chaque palier selon trois directions orthogonales (deux radiales et une axiale)

- La durée de prise de mesures sera compatible avec la cinématique de l'installation et les traitements des signaux envisagés. Les conditions d'exploitation seront notés avec précision .Si ces dernières risquent de fluctuer dans le temps et ont une incidence notable sur le comportement des lignes d'arbres (installations à paliers fluides notamment), l'enseignement synchrone sur support magnétique des signaux délivrées par tous les capteurs de tous les paliers est indispensable, sinon toute corrélation entre signaux issus des différents capteurs est impossible.

c) Les facteurs d'influence sur la prise de mesure

L'humidité, variation de température, les radiations nucléaires, température ambiante, boucle de masse, contrainte à la base, bruit acoustique, matière corrosive, interface électromagnétique, vibrations transversales, bruit triboélectrique

d) Traitement de signal

La grandeur physique choisie pour représenter les signaux à traiter représentant une vibration absolue de palier sera l'accélération ; et une échelle logarithmique sera systématiquement adoptée pour représenter l'amplitude du signal dans le domaine spectral .Le traitement des signaux présente les étapes suivantes :

- 1) Détermination pour chaque palier et direction de mesures de la valeur crête et efficace de l'amplitude du signal dans différentes plages de fréquences et des amplitudes des composants dont les fréquences correspondent aux trois premiers ordres de la fréquence de rotation de chaque ligne d'arbres avec report de l'ensemble de ces valeurs dans des tableaux
- 2) Détermination, si l'importance des amplitudes le justifie, des déphasages relatifs entre composantes d'ordre 1 de la fréquence de rotation issues, pour chaque palier, de deux directions radiales orthogonales et, pour une même direction, des différents paliers constituant la ligne d'arbres. Cette détermination sera systématique dans le cas d'une signature initiale ou après une remise en état
- 3) Visualisation du mouvement radial de chaque palier, du mouvement de l'arbre et de sa position dans chaque palier si ces derniers sont équipés de capteurs de proximité
- 4) Visualisation de la déformée radiale et axiale de la ligne d'arbres et de ses paliers à la fréquence de rotation et à d'autres fréquences si l'amplitude de ces composants le justifie
- 5) Recherche systématique des composants sous-harmoniques de la fréquence de rotation
- 6) Recherche de l'existence de phénomènes de modulation autour de chaque composants cinématique de base (fréquence de rotation, d'engrènement, d'encoches, d'ailettes ...) à l'aide de techniques de traitement du signal appropriées (zoom, spectre, démodulation amplitude/fréquence/phase par transformée de Hilbert bande étroite...)

- 7) Détermination des fréquences de répétition de chocs par démodulation des résonances de structure " moyennes et hautes fréquences"(HFRT) et des pas de peignes de raies par transformée de Fourier inverse (cepstre) des spectres " basses et moyennes fréquences"
- 8) Locations de l'origine des chocs et des phénomènes de modulation à partir du fichier cinématique et identification des images vibratoires
- 9) Recherche d'informations dans les signaux temporels directs ou traités et analyse des formes des fonctions de modulation (enveloppe, phase et fréquence).L'écoute des signaux directs et traités dans le domaine temporel apporte souvent une aide précieuse
- 10) Recherche, si nécessaire, des événements particuliers non stationnaires ou cyclo-stationnaires dans le domaine temporel par mise en œuvre de techniques de filtrage élaborées (filtrage temporel synchrone et analyse du signal non synchrone ...) ou dans le domaine fréquentiel par analyse" temps fréquence.

I.7 CONCLUSION

La maintenance prédictive est principalement une maintenance préventive conditionnelle. Elle surveille les conditions mécaniques, l'efficacité de l'équipement et bien d'autres paramètres et tente d'en tirer le temps approximatif de l'apparition d'une défaillance. Elle utilise des techniques variées, tel que l'analyse vibratoire, l'analyse des huiles, les ultrasons, la thermographie, évaluation des performances et bien d'autres techniques pour évaluer l'état et les conditions de l'équipement. A la base de ces données collectées, des plans de maintenance sont sélectionnés. Dans ce cas, la durée de vie moyenne de l'installation industrielle n'est pas utilisée pour planifier les activités de maintenance. Les techniques de la maintenance prédictive ont une étroite analogie avec les techniques du diagnostic médical (chaque fois que le corps humain souffre d'un problème il présente des symptômes).tel que :

- Le système nerveux fournit des informations. C'est le stade de la détection.
- De plus, si nécessaire, des tests pathologiques sont effectués pour diagnostiquer le problème.
- Sur cette base, un traitement convenable est recommandé ou prescrit

Par analogie au domaine médical, les défauts qui surviennent au niveau d'un équipement présentent toujours des symptômes sous forme anomalies (balourds, désalignement, défaut de roulements, défauts d'engrenages, échauffements, fuites de fluides, particules métalliques dans les huiles).