



FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

INTITULE

Diagnostic vibratoire des engrenages
(Réducteur PominiR.P.455-HS Arcelor-mittal)

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : GENIE MECANIQUE

SPECIALITE :

MAINTENANCE INDUSTRIELLE ET FIABILITE MECANIQUE

PRESENTE PAR :

ABDOULAYE BOURMA OUSMANE

DIRECTEUR DU MEMOIRE : LAISSAOUI R. MAA

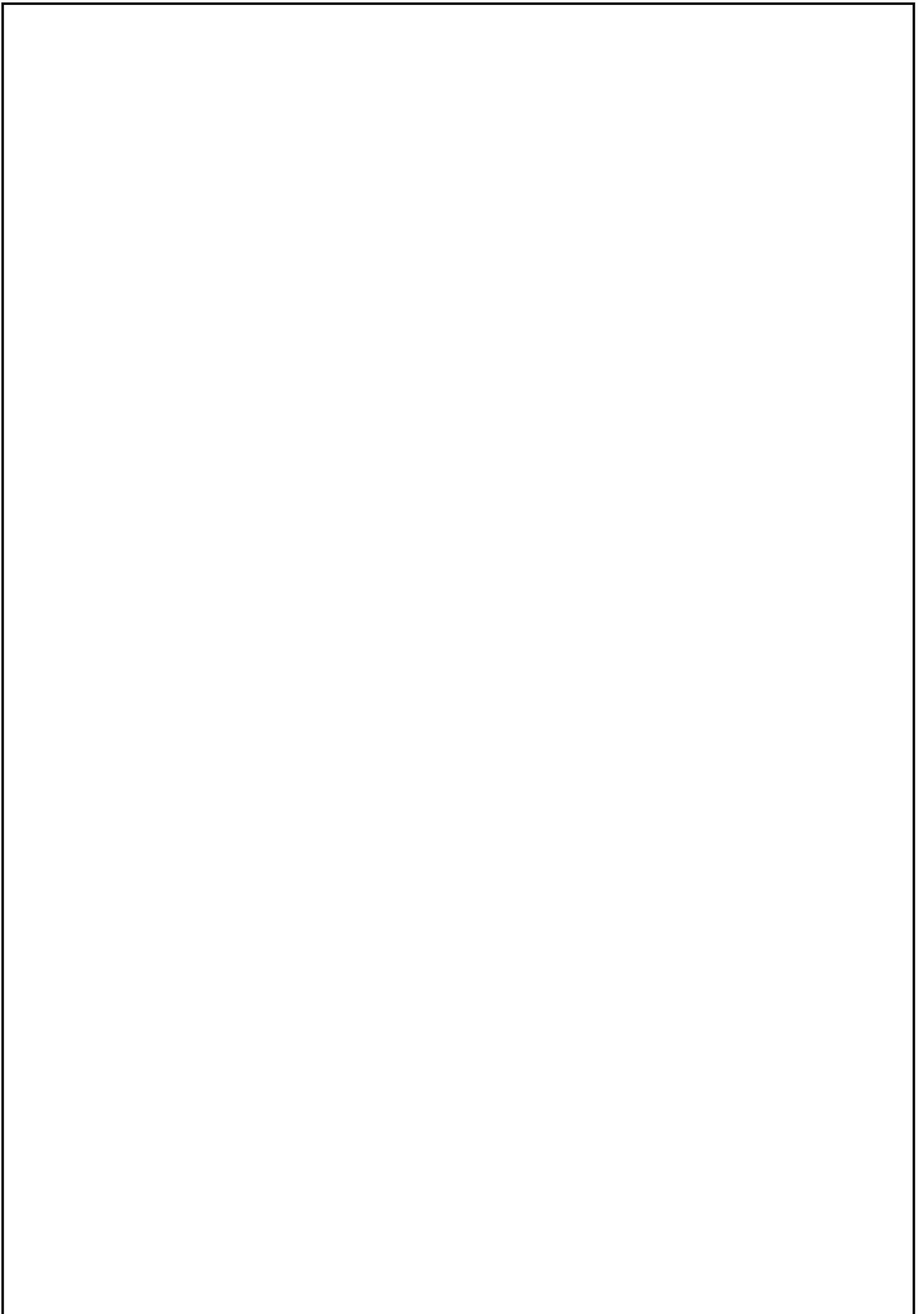
COENCADREUR : DAAS D. MCA

DEVANT LE JURY

PRESIDENT : KHELIF.R MCA

EXAMINATEURS :
BOUTECHICHE .S MCA
GOUASMLS MAA

Année: 2013/2014



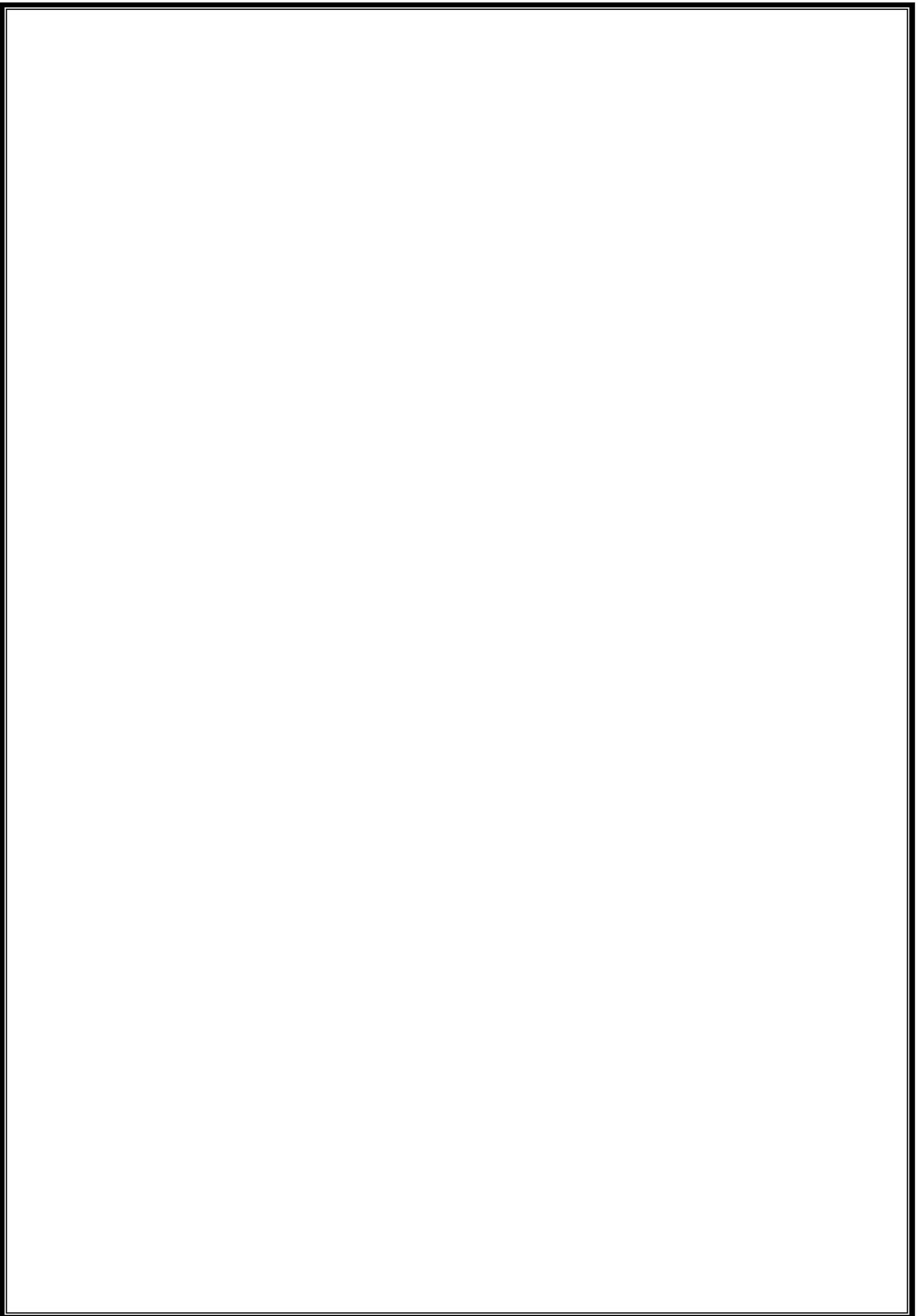
Remerciement

Nous remercions tout d'abord « ALLAH » qui nous a donné la force et la patience nécessaire pour réaliser ce modeste travail.

Nous remercions aussi, notre encadreur Mr. Laissaoui. R et Mme Daas. D pour leur support et leur patience.

Nous remercions également tous les Enseignants du Département de Génie Mécanique, et toute l'équipe de service maintenance de l'unité MRE ET TSS de Arcelor, mes collègues ainsi tous les étudiants de notre promotion.

Enfin Nous remercions tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à réaliser ce travail



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail avant tout aux deux personnes qui me sont les plus chères au monde, ma chère mère qui est une maman hors du commun par son amour et son soucis envers ses enfants de les voir réussir, et mon père.

A mes chers frères, mes cousins et tous les membres de ma famille spécialement ma grande mère.

A la mémoire de l'esprit de mes grand-pères et mes grand-mères.

A tous mes amis pour leurs soutiens

A mon encadreur et mon coencadreur.

A tous mes enseignants et mes collègues de ma promotion.

ABDOULAYE BOURMA OUSMANE

Sommaire

Remerciement.....	i
Dédicaces.....	ii
Introduction générale.....	iii
Chapitre 1 : Présentation de l'entreprise	
Introduction.....	1
1. Présentation de l'entreprise.....	1
1.1 Historique.....	1
1.2 Situation géographique du complexe.....	1
1.3 Activités du complexe.....	2
2 Présentation de l'unité.....	2
2.1 capacité.....	4
2.2 les principaux produits de l'unité.....	4
2.3 les ateliers de production composant l'AMPTA.....	4
3 Process de fabrication de tubes sans soudure.....	7
a) Procédé de fabrication.....	7
b) L'aciérie électrique (ACE).....	8
c) Description des installations de TSS.....	8
d) Description du laminoir à tubes.....	8
e) Finissage.....	10
f) Atelier de parachèvement.....	11
4 Présentation de la machine Tourbecker.....	13
4.1 Description de la machine.....	13
4.2 Les différentes parties constitutives de la machine.....	13
4.3 Les différentes parties du cylindre.....	14
Conclusion.....	15
Chapitre 2 : Généralités sur la maintenance	
Introduction.....	16
2.1. Types et organisation de la maintenance.....	16
2.1.1. La maintenance préventive.....	16
2.1.2. Maintenance préventive systématique.....	17
2.1.3. Maintenance préventive conditionnelle.....	17
2.1.4. Maintenance prévisionnelle.....	17
2.2. La maintenance corrective.....	17
2.2.1. Maintenance palliative.....	17
2.2.2. Maintenance curative.....	17
2.3. Les différents niveaux de la maintenance.....	18
2.4. Les missions de la maintenance.....	19
2.4.1. Conservation du potentielle fonctionnelle.....	19
2.4.2. Exploitation de l'infrastructure technique.....	19
2.4.3. Aspects commerciaux.....	19

2.4.4. Amélioration des conditions de travail	19
2.4.5. Optimisation des dépenses	19
2.5. Les opérations de la maintenance	20
2.5.1. Les opérations de maintenance préventive.....	20
2.5.2. Les opérations de maintenance corrective	20
2.5.3. Autres activités du service maintenance	20
2.6. Objectifs de la maintenance	21
2.7. Approche sur la maintenance conditionnelle	21
2.7.1. Généralités	21
2.7.2. Aperçu des technologies	21
2.8. Principales techniques utilisées en maintenance conditionnelle	22
2.9. Avantage de la maintenance conditionnelle.....	23
2.10. Inconvénient de la maintenance conditionnelle.....	24
2.11 Analyse vibratoire	24
2.11.1 Avantages et Inconvénients de l'analyse vibratoire	25
a. Avantage	25
b. Inconvénients	25
2.11.2. Principe de la méthode	25
2.11.3. Techniques de détection des défauts	25
a. Analyse spectrale	25
b. Analyse cepstral	26
c. Analyse d'enveloppe	26
2.12. Notions générales d'une vibration	26
2.12.1. Définition d'une vibration	26
2.12.2. Les différentes formes de vibration.....	27
a. Vibrations harmoniques	27
b. Vibrations périodiques	27
c. Vibration apériodique	28
2.13. Description d'un signal vibratoire.....	28
Conclusion.....	31
<u>Chapitre 3 : Les engrenages</u>	32
Introduction	32
3.1. Avantage des engrenages	32
3.2. Désavantage des engrenages	33
3.3. Chaîne cinématique d'une machine comportant des engrenages	33
3.4 Géométrie des engrenages.....	33
a) Cercle primitif	33
b) Profil des dents	34
c) Equation d'odontoïde.....	35

d) Dimension	36
e) Force et angle de pression	37
f) Déport de denture	39
3.5. Les différents types d'engrenages	43
a) Les engrenages cylindriques à denture droite.....	44
b) Les engrenages cylindriques à denture hélicoïdale.....	44
c) Les engrenages coniques.....	45
d) Les engrenages gauches : le système roue - vis sans fin.....	45
4. Réducteur.....	46
4.1. Définition.....	46
4.2. Fonction.....	47
4.3. Condition d'entraînement.....	47
4.4. Les types de réducteurs.....	47
4.4.1 Réducteur à étages	47
4.4.2. Réducteur planétaire ou épicycloïdal	48
4.4.3 Réducteurs trochoïdaux.....	49
Conclusion :.....	50
<u>Chapitre 4 : Défaut d'engrenage</u>	51
Introduction.....	51
III.1. Outils et appareils de mesure.....	51
a. Les Capteurs	51
a.1. Les Caractéristiques d'un capteur	52
a.2. Rôle de capteurs de vibration	52
b. Les différents types des capteurs	52
b.1 Accéléromètre	53
b.1.1 Constitution	53
b.1.2 Principe de fonctionnement	53
b.1.3. La Bande Passante	53
c. Les points de mesure	54
c.1. Localisation	54
c.2. Directions des points de mesure	55
d. Les paramètres de surveillance	55
d.1. Le type de capteur	56
d.2. La grandeur mesurée	56
d.3. Le type de détection	56
d.4 Le format de l'acquisition	57
e. Types de surveillance	57
f. Stratégie de surveillance	59
f.1. Mesure de niveau globale	59
f.1.1 Elaboration à partir du signal temporel.....	60
f.1.2. Elaboration à partir du spectre	60
f.1.3. Niveau d'énergie dans une bande de fréquences	61
f.1.4. Analyse fréquentielle	61
f.2. L'interprétation des mesures	62

f.2.1. L'analyse des tendances	62
f.2.2. La comparaison aux seuils	62
f.2.3. La détermination des seuils	62
f.2.3.1. La détermination des seuils à partir d'un état de référence	63
g. Défauts de fabrication.....	64
g.1 Défauts de taillage.....	64
g.1.1 Excentricité ou erreur de faux-rond.....	64
g.1.2 Les erreurs de pas.....	65
g.1.3 Erreurs de profil.....	66
g.1.4 Erreur de l'épaisseur des dents.....	66
g.1.5 Erreurs d'hélice.....	66
g.2 Défauts de montage.....	67
g.2.1 Défaut d'entraxe.....	67
g.2.2 Défauts d'inclinaison et de déviation.....	67
g.3 Défauts de rectification.....	68
g.4 Défauts de traitement thermique.....	69
g.4.1. Pelage.....	69
g.4.2. Dislocation de la couche traitée.....	69
g.5 Défauts de fonctionnement.....	69
g.5.1 Défauts de lubrification.....	69
g.5.2 L'usure.....	70
g.5.3 Le grippage.....	70
g.5.4 Les piqûres.....	71
g.6 Autres défaillances observées sur les dentures.....	72
g.6.1 Ecaillage.....	72
g.6.2 Fissuration.....	73
g.6.3 La rupture par fatigue.....	73
g.7 Corrosion.....	74
g.7.1 Corrosion chimique.....	74
g.7.2 Corrosion de contact.....	74
g.7.3 Surchauffe	74
g.7.4 Erosion par cavitation	75
g.7.5 Etincelage	75
h. Spectres de quelques défauts simulés	75
Conclusion.....	89
<u>Chapitre 5</u> : Etude de cas.....	90
Introduction.....	90
5.1 Consignes de sécurité	91
5.2 Le logiciel xms utilisé	92
5.2.1 les missions de <i>xms</i>	93
5.3 Réducteur	94
5.4 Rapport des mesures et des alarmes	95
Conclusion	99

Conclusion générale et recommandations
Bibliographie

Introduction :

La production industrielle est condamnée à la performance si elle veut survivre : elle évolue dans un contexte de plus en plus compétitif en ce qui concerne les coûts, les cadences, la qualité, la sécurité et les nuisances ; de ce fait, l'outil de production doit faire l'objet d'une maintenance efficace. C'est pourquoi la surveillance et le diagnostic des systèmes mécaniques sont passés au rang des préoccupations majeures des industriels. La tendance actuelle est de rechercher des outils capables de révéler de manière précoce l'apparition des défauts dans le but de remplacer progressivement la maintenance systématique par une maintenance conditionnelle. Parmi les différentes méthodes de diagnostic possibles (analyse d'huile, analyse de température,...), celles qui reposent sur l'analyse vibratoire occupent une place de plus en plus importante en raison des performances croissantes du traitement du signal. Elles comportent trois étapes : La première est l'acquisition de signaux délivrés par des accéléromètres piézo-électriques ou des microphones judicieusement placés. La seconde utilise les procédures de traitement du signal pour fournir des informations condensées mais pertinentes. A partir de ces informations, la troisième utilise l'analyse des données et l'intelligence artificielle pour détecter d'éventuelles anomalies et prendre les bonnes décisions. Les travaux qui sont présentés ici concernent les deux premières étapes du diagnostic des réducteurs à engrenages. Les réducteurs font souvent partie des éléments les plus sollicités des systèmes de production. Depuis longtemps déjà, les engrenages ont fait l'objet de nombreux travaux, on peut constater que la grande majorité de ceux-ci présente une particularité commune.

Nous nous intéressons principalement aux engrenages de réducteur du laminoir de cage V6 de l'unité LRB d'Arcelor mittal d'Elhadjar.

Afin de minimiser les temps d'immobilisation et de révision, le procédé de maintenance adopté est la maintenance conditionnelle : maintenance conditionnelle subordonnée à un type d'événement prédéterminé (niveau de signaux issus de capteur) révélateur d'un état de dégradation du bien. Ainsi, le système n'est arrêté que lorsqu'il existe une certaine probabilité de défaillance, définie par l'analyse vibratoire qui a permis de déterminer la signature de l'avarie.

Introduction

L'industrie mécanique est un facteur très important dans l'économie d'un pays c'est une des contraintes au progrès du développement. Elle représente le niveau d'évolution de la modernité d'un pays.

La fabrication mécanique à une grande importance dans le domaine économique, elle participe à l'amélioration et au développement d'un pays et au développement des moyens de production locaux.

La nouvelle stratégie industrielle mondiale est basée sur la haute technologie moderne acquise par des grands constructeurs internationaux.

Pour améliorer la qualité du produit, la productivité, le prix de revient et le temps d'exécution etc....

L'Algérie est comme les autres pays du monde, a essayé de construire une base industrielle suffisante pour rattraper le retard dans ce domaine qui compte chaque année des avancés extraordinaires.

1. Présentation de l'entreprise

1-1-Historique

L'entreprise nationale de sidérurgie(ENS) a été créée par la société bônoise sidérurgie (SBS) en 1959 suite à la mise en application du plan de construction d'un complexe sidérurgique à EL HADJAR. En exécution d'une politique définie et exprimée par le gouvernement.

Les minerais seront acheminés par les chemins de fer depuis les mines de l'OUENZA, à 150km, de la coke également sera cheminée depuis le port de Annaba. Issue de la restructuration de la société nationale de sidérurgie SNS, l'entreprise (SNS) par abréviation SIDER a été créée par décret (n°83-628) du 05 novembre 1983 et appret MITTAL STEEL Annaba le 25 juin 2005, et devenir ARCELOR MITTAL Annaba le 6 mars 2007.

1.2. Situation géographique du complexe

Le complexe sidérurgique d'EL HADJAR situé à 15km au sud de la ville d'Annaba, occupe une superficie de 800 hectares qui se repartie en trois zones :

- 1^{er} zone : l'atelier de production << 300 Hectares >>.
- 2^{ème} zone : Les superficies de stockage << 300 hectares >>.
- 3^{ème} zone : La surface de service << 200 Hectares >>.

Le complexe a pour mission de valoriser de minerai de fer national et de fabriquer des demi-produits sidérurgiques.

Nécessaire aux autres branches du secteur de l'industrie, en outre, le complexe pour ses besoins d'énergie et de fluide est équipé de dispositif tel que :

- Trois (3) centrales thermiques d'une capacité totale de 65mw/h.
- Quatre (4) centrales à oxygène d'une capacité totale de 3500m³/h.
- Trois (3) usines à eau d'une capacité de 28400m³ /h.

Le complexe dispose au niveau du périmètre du port d'Annaba les installations suivantes :

Un quai sidérurgique équipé de grue dont 5 de 25 tonnes et deux de 40 tonnes.

Pour arriver à cette configuration il faut intervenir près de vingt millions de dinar en trois phases distincts :

- ✓ Une phase allant du démarrage du premier déliner (HF N°1) jusqu'à 1974 années de mise en service des premiers installations du LAF (Laminoir réversible) de capacité de 400000 tonnes d'acier liquide.
- ✓ Une phase dite (Extension des Gammes) entre 1974 et 1977 il s'agit de la construction de la filière tube sans soudure pour une meilleure sécurité du complexe et structuré par organigramme de produit de l'approvisionnement en tube à pétrole pour SONATRACH et du laminoir à fils rond.
- ✓ Une phase dite 2.000.000 de tonnes entre 1978 et 1981 caractérisée par l'installation du haut fourneau de 120.000 tonnes de fonte, l'adjonction d'une cokerie, l'extension d'une filière produit plat à une capacité de 1.300.000 tonnes d'acier liquide et la création d'une filière produit long, d'une capacité de 540.000 tonnes suite à la construction d'une aciérie billette.

Dès 1966 la SNS a participé à la création de centre de formation d'ouvriers techniciens et agents de maîtrise.

1. Centre de formation ouvrière (4RSS).
2. Centre de formation des adultes des (lauriers rosses).
3. Centre entreprise de formation de techniciens et agents de maîtrise (CITAM).

L'ensemble de ces activités est regroupé en 1978 dans un seul centre (CEFOS), créé à 2 km de l'usine dans les localités de SDI AMAR pour la formation de 1200 ouvriers professionnels contre maîtres et techniciens.

1.3-Activités du complexe :

L'entreprise nationale sidérurgique (en SIDER) est chargée de :

- La recherche.
- Le développement.
- L'exploitation.
- La production.
- La distribution relevant de sidérurgie et de la métallurgie de base.
- Elaboration de l'acier et de produit ferreux tels que : les Zincs, l'aluminium, le cuivre...

2. Présentation de l'unité

L'AMPTA implantée sur le site du complexe arcelor mittal annaba, elle a pour mission principale la production des tubes sans soudure destinées principalement à l'industrie de pétrole et du gaz, son démarrage a eu lieu en 1974 .

Cette unité a démarré en **1976** pour les tubes de conduite (Line pipe) et en **1978** pour les tubes de coffrage et de production (Casing et tubing).

Ses principaux clients sont :

- SONATRACH
- SONELGAZ
- NAFTAL
- ALTUMET
- KHANAGAZ.

La tuberie fabrique tous ses tubes sans soudure selon les spécifications de l'API (American Petroleum Institute)

Depuis **1986**, la TSS a obtenu la reconnaissance de la qualité de ses produits par l'obtention du label < Monogramme API > délivrée par l'institut Américain du Pétrole.

De plus la Tuberie Sans Soudure a été l'une des premières en Algérie à obtenir, en **1999**, la certification **ISO 9001**.

Les équipements de process et de contrôles sont remis périodiquement à jour selon les exigences des spécifications API 5L (pour les line pipe) et 5CT (pour les casing et tubing)

Les tubes interviennent pour une part très importante dans l'industrie en général et dans l'industrie pétrolière en particulier.

schéma d'un puits de pétrole :

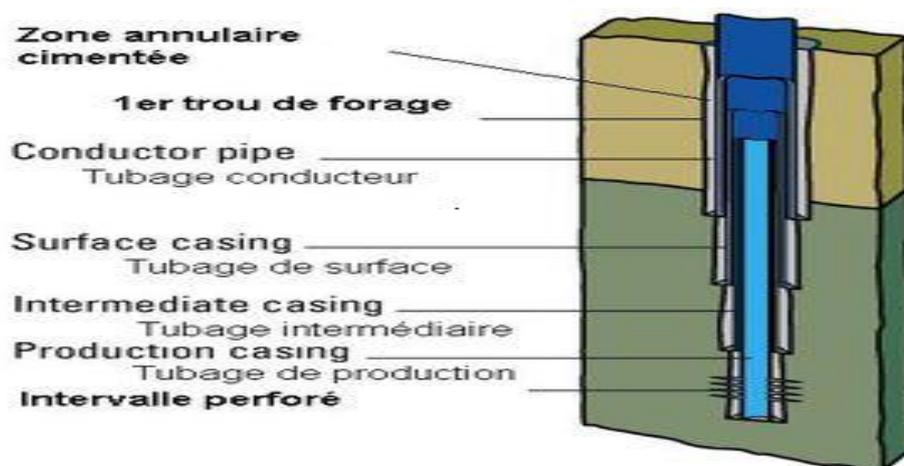


Figure 1.1 : image d'un puits du pétrole

GAMME DE PRODUITS :

Dimensions : Casing & Manchon : 7" à 13"3/8
Line pipe : 6" 5/8 à 14"

Nuance d'acier : :LINE PIPE : Grade B - X42 - X52 – X60
:CASING : J55- K55 - N80 - P110

Type de filetage : API (Rond, Buttress)- premium joint

Quantité : 70 000 à 115 000 Tonnes / an

Clients Potentiels : SONATRACH, SONELGAZ, ALTUMET...

2.1 Capacité

- **Capacité installée théorique :**

La capacité de production installée théorique est de 70 000 tonnes/an pour une exploitation des installations en 2*8.

Cette capacité théorique calculée par le constructeur n'a jamais été atteinte durant presque 30 années d'exploitation.

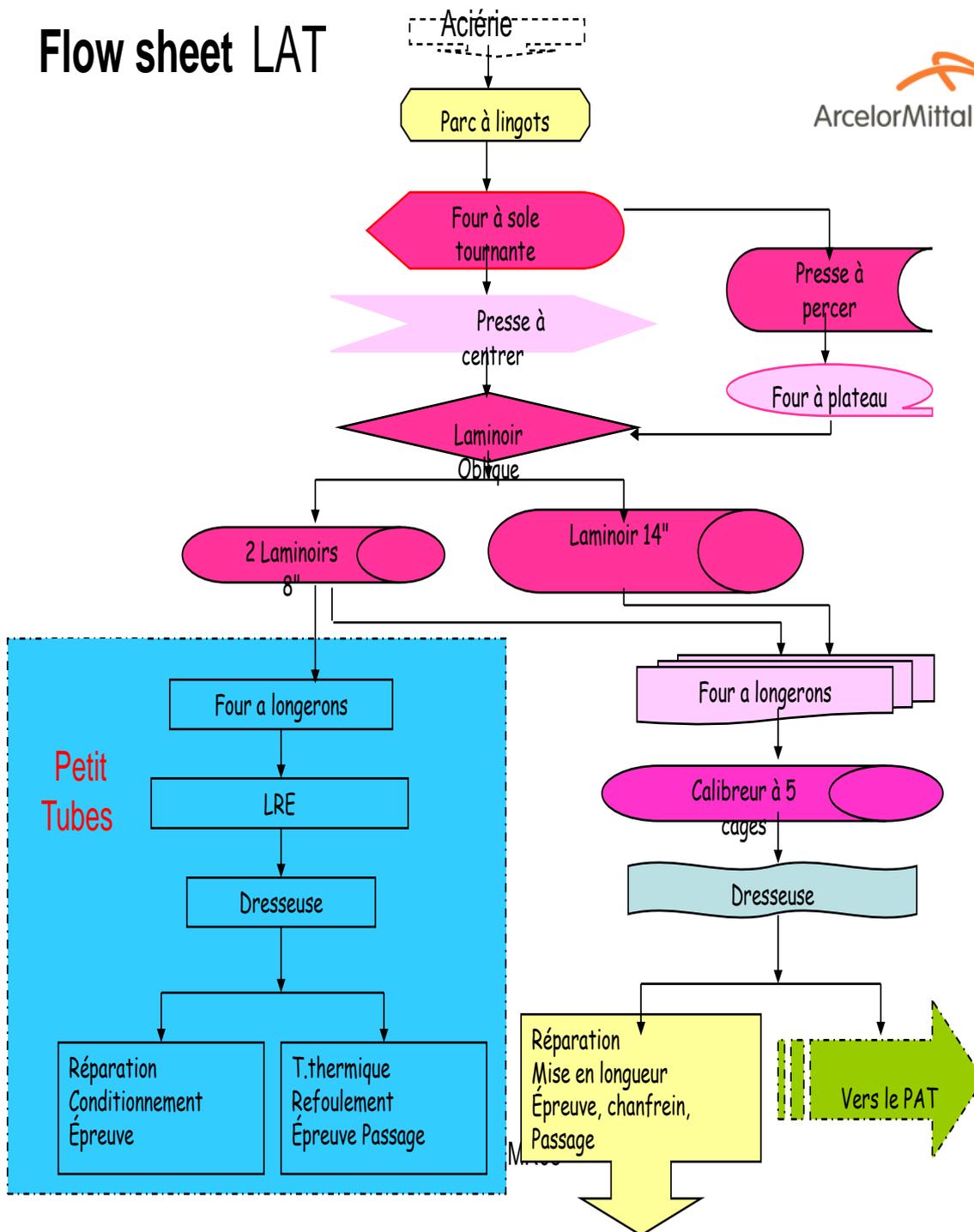
2.2 Les principaux produits de cette unité sont :

- Les tubes casings pour le coffrage des puits de pétrole
- Les tubes tubings pour la production.
- Les tubes line-pipe pour le transport des hydrocarbures liquides et gazeux.
- Les tubes pour usage hydraulique.
- Les tubes tarifs et divers.

2.3 Les ateliers de production composant l'AMPTA:

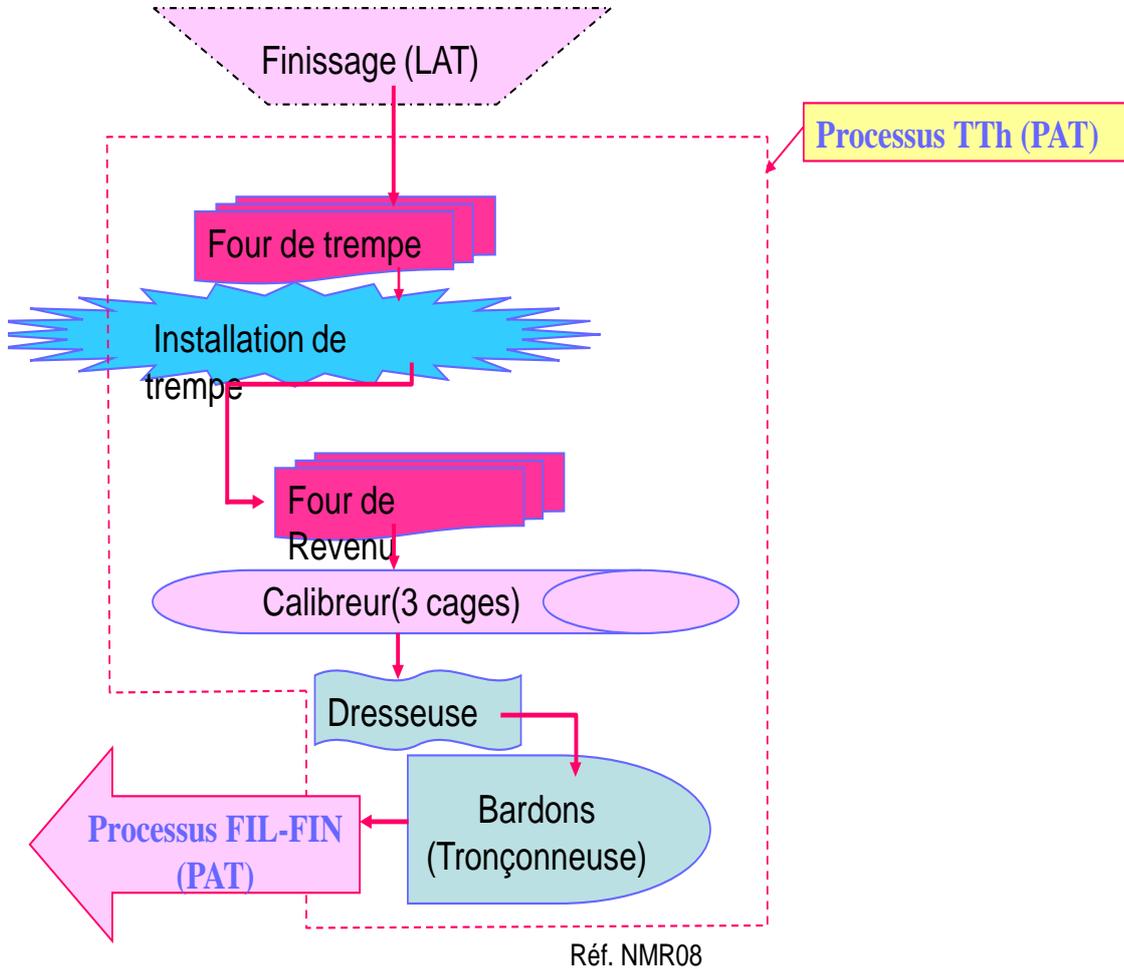
- **LAT :** le laminoir à tubes qui permet la fabrication de tubes avec un large éventail de diamètre et différent épaisseur.

Flow sheet LAT



- **PAT** : le parachèvement à tubes spécialisés dans les traitements thermiques des aciers et dans les filetages et la finition des extrémités des tubes et manchons.

Flow sheet PAT



Méthodologies utilisées et configuration des ateliers

Process :

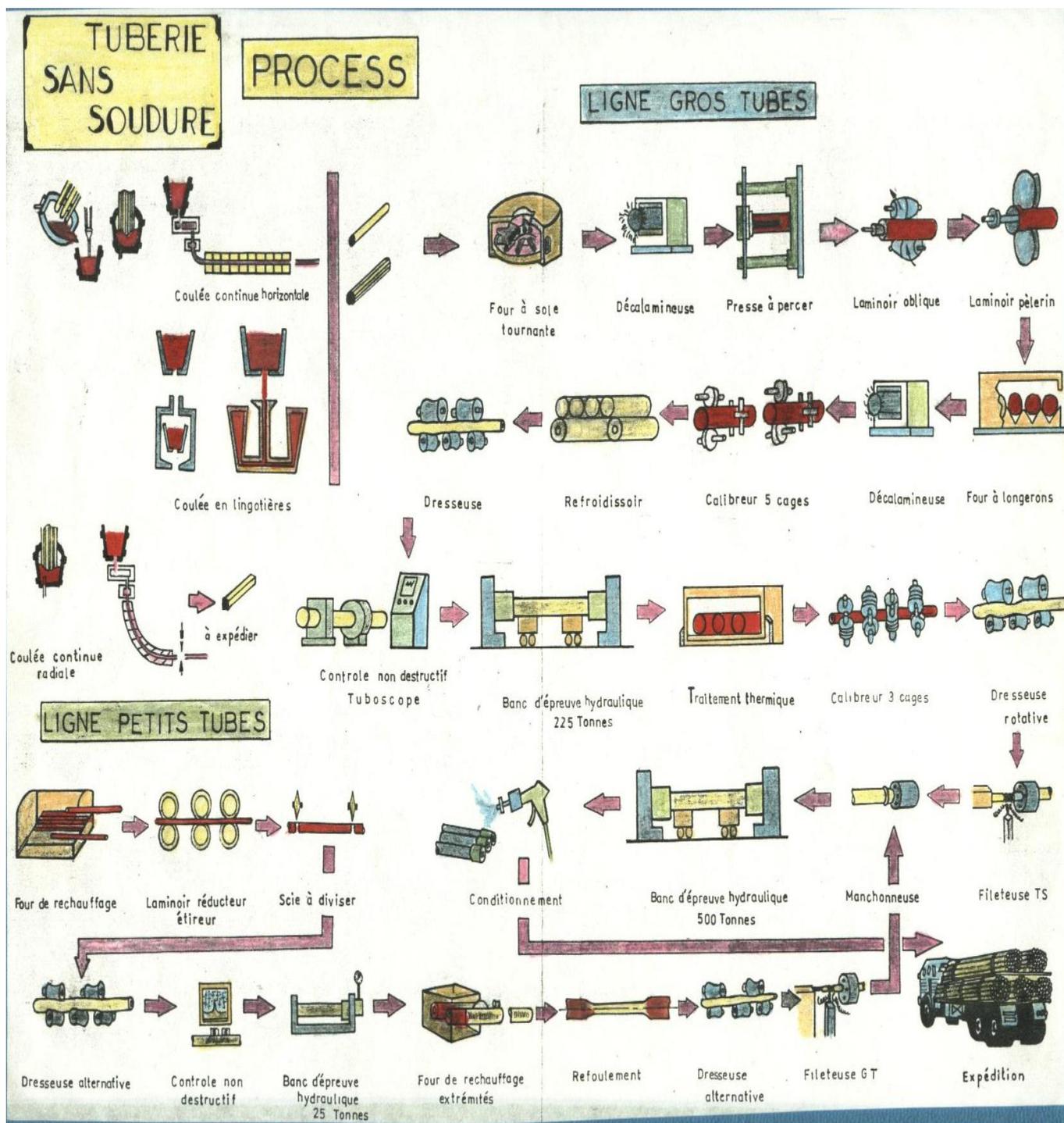


Figure 1.2 : étapes de fabrication

3.Process de fabrication des tubes sans soudure

a/ Procédé de fabrication

Les tubes sans soudures sont des produits tubulaires en acier forgé sans ligne de soudure. Ils seront obtenus à partir d'une ébauche cylindrique par un travail du métal à chaud (laminage) en vue de produire la forme, les dimensions et les propriétés requises.

b/ L'aciérie électrique (ACE)

L'aciérie électrique (ACE) alimente la TSS en matière (lingots), elle produit deux types de lingots :

- Lingots ronds : $\text{Ø } 190 \div 405 \text{ mm}$
- Lingots dodécagonaux : $\text{Ø } 300 \div 500 \text{ mm}$

Les aciers élaborés répondent aux exigences chimiques de l'API 5L

Les lingots conformes produit par l'ACE sont stockés au parc TSS

c / Description des installations de la TSS

Les équipements de production de la TSS sont répartis dans les ateliers suivants :

- Le laminoir à tubes
- Le parachèvement des tubes
- Atelier de fabrication de manchons
- Laboratoires des essais mécaniques (essais de traction et de résilience)
- Laboratoire de métrologie

Ces ateliers sont desservis par les principales installations annexes suivantes :

- Station de pompage
- Station de traitement des eaux
- Sous stations électriques

Les ateliers principaux comprennent :

d/ Description pour le laminoir à tubes :

- **Parc à lingot** : Où sont stockés les lingots conformes en provenance de l'aciérie.
- **Four à sole tournante** : capacité 45 T/H, pour chauffage des lingots à une température de 1300°C avec une homogénéisation de température.

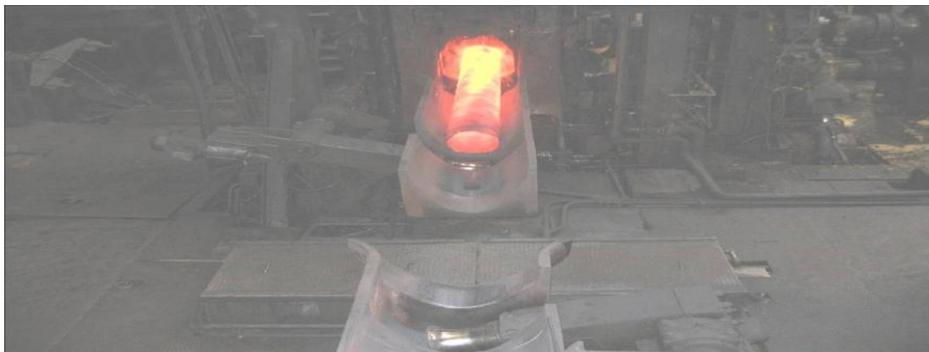


Figure1.3 : four à sole

- **Presse à percer de 1200 tonnes** : Perçage des lingots en doigts de gants. La presse est alimentée à partir d'une centrale hydraulique.



Figure 1.4 : presse à percer

- **Four à plateau** : Pour réchauffage des ébauches presse à une température de 1300°C
- **Laminoir oblique** : Transformation des lingots ronds ou ébauches creuses produites par la presse en ébauche percée.

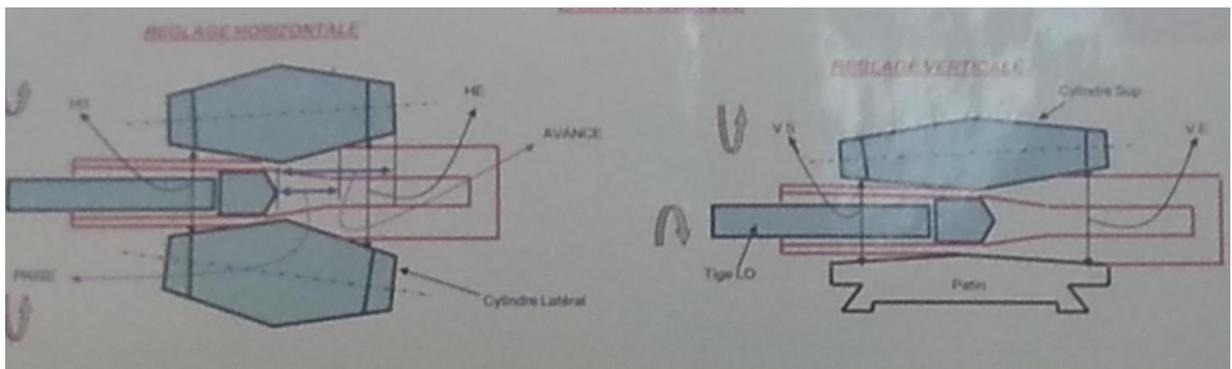


Figure I-5 : laminoir oblique

- **Laminoir pèlerins** :
Deux trains 8" et un train 14"
Chaque laminoir est composé de trois parties : la cage, l'appareil de présentation et son chariot ainsi que le circuit des mandrins.

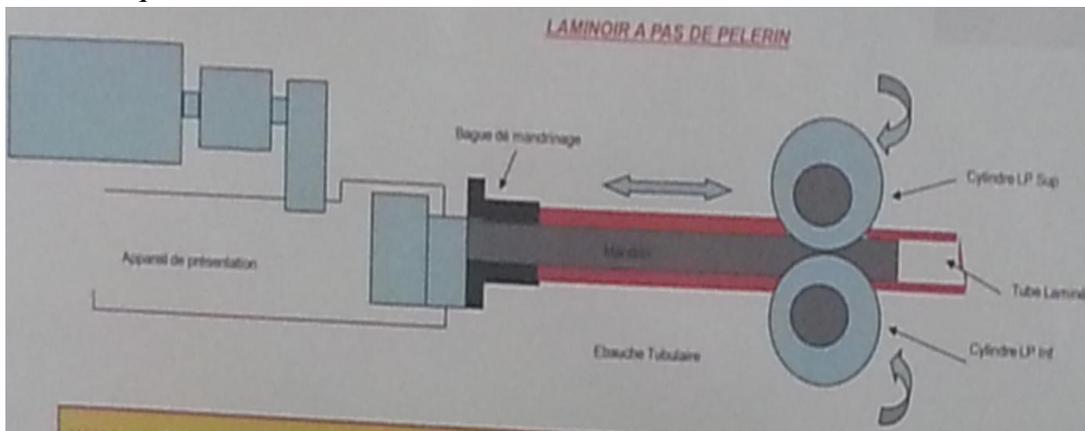


Figure 1.6: laminoir pèlerins

- **Four à longeron** : Réchauffage des tubes laminés de longueur maximale 15 m à (850°-875°) haute cadence de production (110 tubes / H)

Calibreur à 5 cages : Calibrage cylindrique de mise à dimension des tubes bruts produits par laminoir pèlerin 8" et 14".

e/ finissage :

- **Dresseuse rotative** : Dressage à froid des tubes venant du calibreur.



Figure1.7: dresseuse rotative :

Dresseuse alternative :



Figure 1.8: dresseuse alternative

- **Contrôle CND (Non Destructif) :**
 - 1)- Tuboscope (Détection des défauts par la méthode électromagnétique)
 - 2)- Magnapoudre
- **Tronçonneuse BARDONS :** Mise en longueur et coupe des viroles pour les essais mécaniques.



Figure1.9 : tronconneuse bardons

- **Laboratoire d'essais mécaniques** : Essais de traction et de résilience.
- **Chanfreineuse** : Réalisation du chanfrein
- **Banc d'épreuve hydraulique** : Tous les tubes sont éprouvés à la pression exigée par le règlement de sécurité et par les exigences API
- **Bascule** : Tous les tubes sont pesés et métrés.
- **Produit à la sortie du finissage** :
 - Tubes Casing et line pipe nécessitant un traitement thermique (Trempe + Revenu) sont expédiés vers le parachèvement à tubes.
 - Le reste des Tubes line pipe et divers (Lisse) ayant Obtenus leurs Propriétés Mécaniques sont expédiés vers le client.

Tous les tubes subissent un contrôle final (réception) récapitulant toutes les exigences clients et spécifications API.

F/ atelier parachèvement :

- **Four de trempe** :
Température d'austénisation **900 °C** environ
Trempe à l'eau
- **Four de revenu** :
Revenu à l'air libre
- **Calibreur à 03 cages** :
Calibrage et obtention, du diamètre exigé
- **Tronconneuse et prélèvement de viroles**

- **Contrôle visuel et non destructif**
- **Inspection CND**
 - Ultra – Sons
 - Magnapoudre (Magnétic particle inspection)
- **Chanfreineuse :**
Réalisation chanfrein
- **Epreuve hydraulique :** Banc d'épreuve 500 tonnes
Epreuve avec enregistrement de la Pression et du temps de maintien
- **Marquage et pesage**
- **Réception finale**
- **Fileteuses numériques PT 5 :**
- **Fileteuse semi-automatique TS430**



Figure 1.10 : fileteuse semi-automatique
.Manchonreuse : Manchonnage des manchons sur tubes suivants un couple exigé



Figure 1.11 : manchonneuse

4. Présentation de la machine (TourBECKER)



Figure 1.12 : Tour BECKER

4.1 Description de la machine

Le tour Becker est une machine de reproduction par copiage hydromécanique conçue pour l'usinage de formes de révolution quelconque telle que la forme du cylindre de laminoir à pas de pèlerins, dont le diamètre varie de 122 à 372 mm, cette machine est implantée à l'atelier OAC pour satisfaire les besoins en cylindres des laminoirs. Cette machine est stratégique et unique au sein du complexe d'EL HADJAR et même du territoire national.

4.2 Différentes parties constitutives de la machine :

Il est constitué principalement de :

- ✓ Une centrale hydraulique
- ✓ Un moteur frein électrique de commande de rotation broche
- ✓ Une poupée fixe comprenant une broche avec manchon d'entraînement cylindrique
- ✓ Une contre pointe tournante servant de butée et centrage du cylindre
- ✓ Deux paliers pour cylindre à usiner

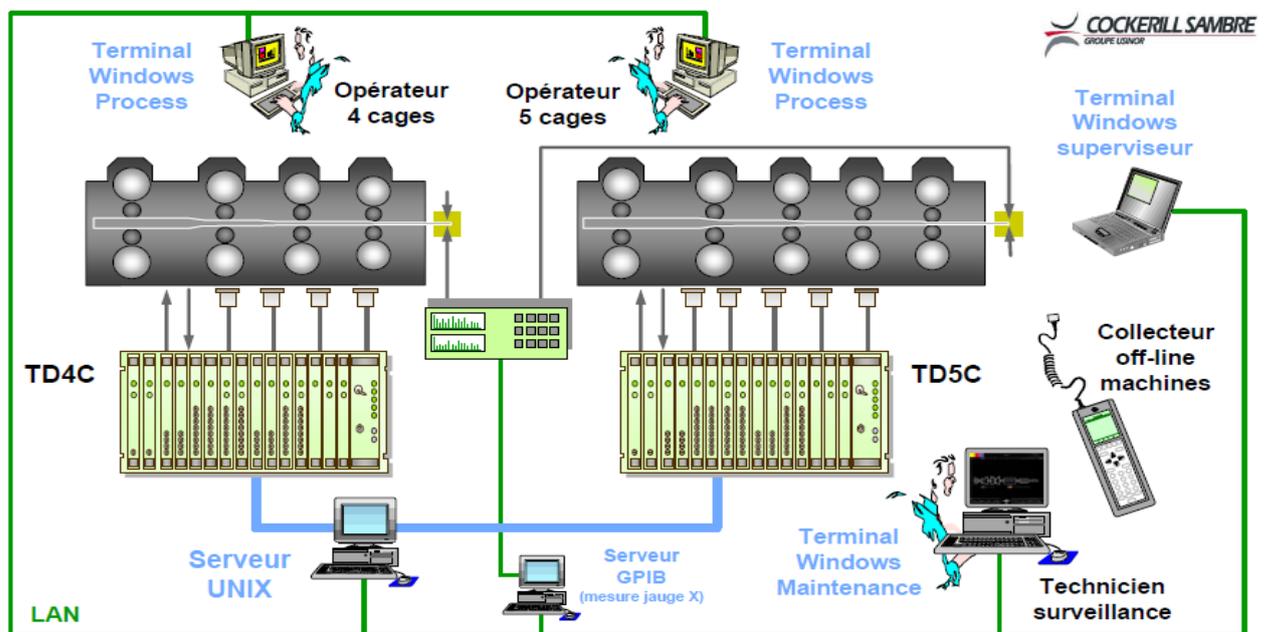
- ✓ une boîte de vitesses variables
- ✓ Une boîte de commande principale comprenant
 - came principale (profil du cylindre)
 - Came d'usinage flanc tangent
 - Deux cames de corrections et un compensateur
- ✓ Un ensemble des chariots
- ✓ Chariot circulaire pour l'avance de coupe
- ✓ Chariot transversal pour l'usinage curviligne (cannelure).
- ✓ Chariot longitudinal pour usinage le diamètre de table.

4.3 Différentes parties du cylindre :



Figure 1-13 : Cylindre

- Surveillance vibratoire du laminoir :



Conclusion :

Depuis son démarrage la Tuberie sans Soudure à produit plus d'un demi-million de tonnes de tubes sans soudure dont la moitié pour le transport des hydrocarbures (pétrole et gaz). les différentes phases de production et de contrôle sont réalisées conformément au programme d'assurance qualité décrit dans le plan d'assurance qualité.

Introduction :

Selon la norme AFNOR (Association Française de Normalisation) : la maintenance est définie comme étant :

(NF X60-010) « Ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié, ou en mesure d'assurer un service déterminé ».

La maintenance vise toutes les activités destinées à maintenir ou rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise. Ces activités sont une combinaison d'activité technique, administrative et de management.

2.1 Types et organisation de la maintenance :

Lorsqu'au cours d'une tâche préventive un composant interne du matériel est trouvé ou jugé défaillant, sa réparation ou son remplacement doit être considéré comme de la maintenance corrective. S'il est trouvé non défaillant mais dégradé, même au-dessous de la valeur de défaillance potentielle, sa réparation ou son remplacement est du domaine de la maintenance préventive.

2.1.1.La maintenance préventive :

AFNOR X60-010 « maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance ou de dégradation d'un bien ou d'un service rendu. Les activités correspondantes sont déclenchées selon un échéancier établi à partir d'un nombre prédéterminé d'unités d'usage (maintenance systématique) et/ou de critères prédéterminés significatifs de l'état de dégradation du bien ou du service (maintenance conditionnelle) »

La maintenance préventive a pour objectif :

- L'augmentation de la durée de vie du matériel ;
- La diminution de la probabilité des défaillances en service ;
- La prévention et la prévision des interventions de maintenance corrective coûteuses ;
- La prévision de bonnes conditions à la maintenance corrective ;
- Eviter la consommation anormale de l'énergie ;
- L'amélioration des conditions de travail du personnel de production ;
- La diminution des causes d'accidents graves.

Cependant nous pouvons distinguer deux sortes de maintenance préventive, l'une systématique et l'autre conditionnelle.

➤ **Maintenance préventive systématique :**

AFNOR X60-010 « activité déclenchée suivant un échéancier établi à partir d'un nombre prédéterminé d'unités d'usage, les remplacements des pièces et des fluides ont lieu quel que soit leur état de dégradation, et c'est de façon périodique ».

➤ **Maintenance préventive conditionnelle :**

AFNOR X60-010 « les activités de maintenance conditionnelle sont déclenchées suivant des critères prédéterminés significatifs de l'état de dégradation du bien ou du service. Les remplacements ou les mises en état des pièces, les remplacements ou les appoints des fluides ont lieu après une analyse de leur état de dégradation. Une décision volontaire est alors prise d'effectuer les remplacements ou les mises en état nécessaires ».

2.1.2. Maintenance prévisionnelle :

Maintenance préventive subordonnée à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs de la dégradation du bien, permettant de retarder et de planifier les interventions.

2.2 La maintenance corrective :

C'est l'ensemble des activités réalisées après la défaillance du bien ou la dégradation de sa fonction pour lui permettre d'accomplir une fonction requise au moins provisoirement. Ces activités sont :

- La localisation de la défaillance ;
- Le diagnostic ;
- La remise en état ;
- Le contrôle du bon fonctionnement.

2.2.1. Maintenance palliative :

Activités de la maintenance corrective destinées à permettre à un bien d'accomplir provisoirement tout ou une partie d'une fonction requise. Appelée couramment dépannage, cette maintenance palliative est principalement constituée d'actions à caractère provisoire qui devront être suivies d'actions curatives.

2.2.2. Maintenance curative :

Activités de maintenance corrective ayant pour objectif de rétablir un bien dans un état spécifié ou de lui permettre d'accomplir une fonction requise. Le résultat des activités réalisées doit présenter un caractère permanent. Ces activités peuvent être des réparations, des modifications ou aménagement ayant pour objet de supprimer les défaillances.

La maintenance s'organise de la manière suivante :

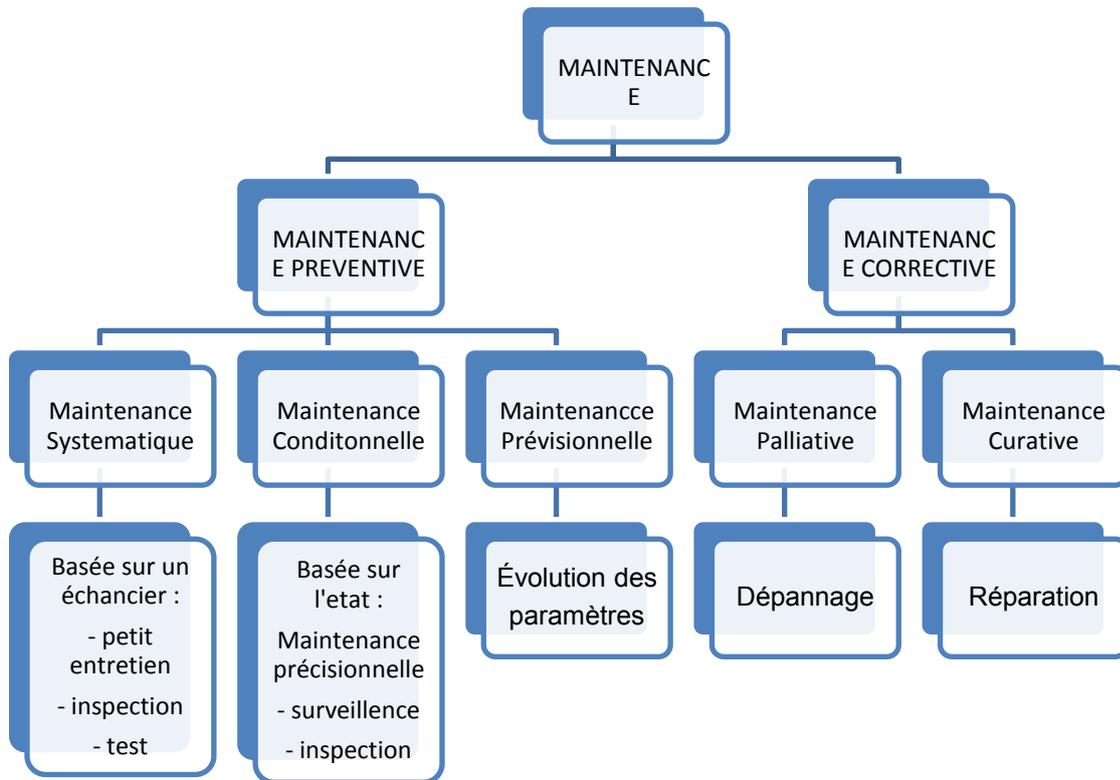


Figure 2.1 : organigramme de la maintenance

2.3. Les différents niveaux de la maintenance :

Niveaux	Types de travaux	Personnel d'intervention	Moyens
1 ^{er} niveau	réglages simples prévus par le constructeur au moyen d'organes accessibles sans aucun démontage d'équipement, ou échange d'éléments accessibles en toute sécurité.	pilote ou conducteur du système	outillage léger défini dans les instructions d'utilisation.
2 ^{ème} niveau	dépannage par échange standard d'éléments prévus à cet effet, ou d'opérations mineures de maintenance préventive (rondes)	technicien habilité	outillage léger défini dans les instructions d'utilisation et pièces de rechanges disponibles sans délai.
3 ^{ème} niveau	identification et diagnostic de pannes, réparation par échange de composants fonctionnels, réparations mécaniques mineures.	technicien spécialisé	outillage prévu et appareils de mesure, banc d'essai, contrôle...

4 ^{ème} niveau	travaux importants de maintenance corrective ou préventive	équipe encadrée par un technicien spécialisé	outillage général et spécialisé, matériels d'essais, de contrôle...
5 ^{ème} niveau	travaux de rénovation, de reconstruction ou réparation importantes confiées à un atelier central	équipe complète et polyvalente	moyens proches de la fabrication

Tableau 2.1 : Les cinq niveaux de la maintenance (Norme AFNOR X 60 011)

2.4. Les missions de la maintenance :

2.4.1. Conservation du potentielle fonctionnelle :

Les éléments maintenus constituent des outils pouvant assurer diverses fonctions (production, fabrication, activités commerciales, services, spectacle...).

Ces fonctions ne peuvent durer que grâce à une maintenance régulière, et dont le rendement doit être optimum. Dans ce cadre, la fonction maintenance est responsable :

- Du diagnostic permanent des équipements et installations en apportant les remèdes aux dégradations constatées ;
- De la réparation et de la remise en état de l'élément lorsque elles se révèlent nécessaires ;
- De la réalisation des travaux neufs d'installation ou d'aménagement jugés opportuns.

2.4.2. Exploitation de l'infrastructure technique :

La fourniture d'énergie et la distribution des fluides constituent généralement un domaine pris en charge par la fonction maintenance.

2.4.3. Aspects commerciaux :

La qualité de l'entretien des équipements d'une entreprise contribue activement à la bonne image de celle-ci.

2.4.4. Amélioration des conditions de travail :

La maintenance des équipements de confort et des outils de travail contribue pour une large part à l'ambiance sociale des entreprises.

2.4.5. Optimisation des dépenses :

Les coûts de maintenance représentent les points les plus importants pour une entreprise, difficile à gérer car entrant souvent dans la catégorie des frais généraux. Un suivi détaillé de ces coûts et de leurs causes s'avère nécessaire pour les maîtriser.

2.5. Les opérations de la maintenance :

2.5.1. Les opérations de maintenance préventive

Les opérations suivantes sont effectuées de manière continue ou à des intervalles prédéterminés calculés sur le temps ou le nombre d'unités d'usage.

- **Inspection** : activité de surveillance s'exerçant dans le cadre d'une mission définie. Elle peut être effectuée sous forme de « rondes » et a pour but la détection de défaillances mineures :
 - ✓ Défauts de lubrification (contrôles des niveaux) ;
 - ✓ Défauts de pression, de températures, de vibrations ;
 - ✓ Détection visuelles de fuites, détection d'odeurs, de bruits anormaux ;
 - ✓ Dépannages simples : réglage de tension de courroie, échanges de lampes.
- **Contrôle** : vérification de la conformité par rapport à des données préétablies, suivies d'un jugement (décision de non-conformité, d'acceptation, d'ajournement).
- **Visite** : activité consistant en un examen détaillé et prédéterminé de tout ou partie des éléments d'un bien. Elle peut entraîner certains démontages et déclencher des opérations correctives des anomalies constatées.

2.5.2. Les opérations de maintenance corrective :

- **Dépannage** : action sur un bien en panne en vue de le remettre en état de fonctionnement, provisoirement avant réparation.
- **Réparation** : intervention définitive et limitée de maintenance corrective.

2.5.3. Autres activités du service maintenance :

- **Les travaux d'amélioration** : ils consistent à modifier un équipement pour augmenter sa sécurité, sa fiabilité et sa maintenabilité.
- **Les travaux de modernisation** : ils consistent à remplacer des composants âgés ou à leurs adjoindre des composants d'une génération nouvelle.
- **La rénovation** : ces travaux comprennent l'inspection complète de tous les organes suivie de :
 - ✓ la réparation des éléments usés ;

- ✓ l'achat d'éléments neufs.

2.6. Objectifs de la maintenance :

Ses différentes actions doivent assurer la rentabilité des investissements matériels de l'unité de production ou de l'entreprise en maintenant le potentiel d'activité.

C'est un moyen de consolider la compétitivité de l'entreprise. C'est ainsi que le responsable de la maintenance doit aussi être un bon gestionnaire, afin qu'il puisse minimiser les coûts de maintenance et planifier ces opérations dans le temps.

2.7 Approche sur la maintenance conditionnelle :

2.7.1. Généralités :

La maintenance conditionnelle permet de déterminer la nature de l'action courante à effectuer sur le système et éventuellement la date de la prochaine intervention de maintenance en fonction du niveau de vieillissement du système.

La maintenance conditionnelle est un outil efficace pour le contrôle du compris entre maintenance préventive et maintenance corrective.

Cependant, sa mise en place dans un contexte industriel est souvent empirique et ne conduit pas à l'obtention des meilleurs gains.

2.7.2. Aperçu des technologies :

Selon la norme AFNOR X 60-010, la maintenance conditionnelle est définie comme une maintenance préventive subordonnée à un type d'évènement prédéterminé (auto diagnostic, information d'un capteur de mesure d'une usure révélatrice de l'état de dégradation du bien). Le choix des indicateurs dépend essentiellement de leur capacité à décrire l'installation surveillée, ils sont de deux ordres; les critères de consommation d'énergie, qualité du produit fini.....et les critères de comportement.

Parmi ces dernières, on peut citer de manière non exhaustive, les contrôles de bruit, l'analyse de la température, l'analyse d'huile, la mesure de vibrations.

Ce dernier critère est le plus souvent utilisé en raison de son efficacité, de sa réactivité, de sa facilité de mise en œuvre et de la richesse des résultats obtenus. Il est non seulement l'outil de base de maintenance mais aussi de contrôle qualité dans le cas d'une recette vibratoire d'une installation neuve ou après remise en état. Mais la corrélation de plusieurs critères permet d'affiner les diagnostics.

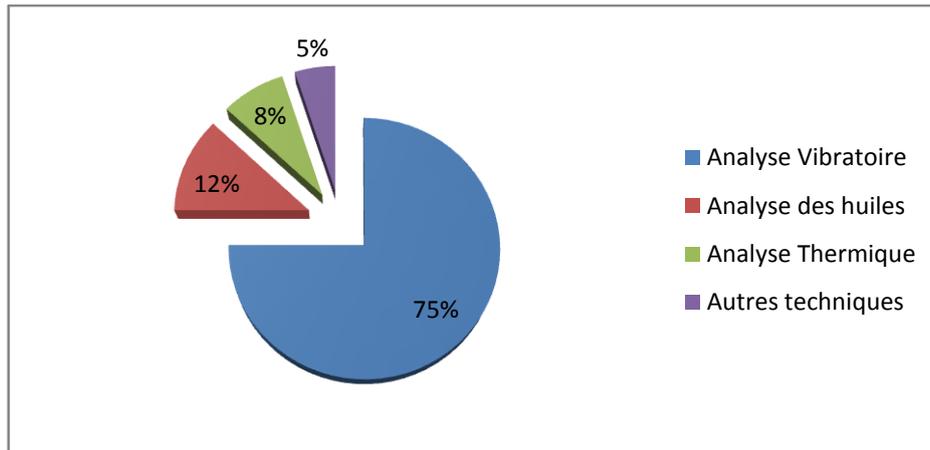


Figure 2.2: Pourcentage de différentes techniques de la maintenance conditionnelle.

2.8. Principales techniques utilisées en maintenance conditionnelle :

- **L'analyse vibratoire :** cette technique est principalement utilisée pour la surveillance des machines tournantes. Toute machine tournante vibre. Ces vibrations sont les conséquences de défauts de la machine. Plus la machine vibre, plus les défauts sont importants ;
- **L'analyse des huiles :** ces analyses peuvent avoir deux buts : soit déterminer le moment adéquat du renouvellement de l'huile soit pour détecter les premiers symptômes de l'usure anormale des organes. La principale technique utilisée est l'analyse physico-chimique (viscosité, teneur en eau, indice d'acidité) ;
- **La thermographie infrarouge :** cette technique permet de mesurer la température de composants sans contact. Tout défaut se traduisant souvent par une élévation de la température, on peut ainsi en mesurer les conséquences ;
- **L'analyse acoustique :** cette technique permet de détecter l'apparition de défauts audibles et autorise une surveillance continue des machines
- **Les examens visuels :** examen visuel direct.

Les principales techniques sont présentées dans le tableau suivant :

Principaux avantages	Principales limitations	Champ d'applications
----------------------	-------------------------	----------------------

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

Tableau 2.2 : Principales techniques utilisées en maintenance conditionnelle

Toutes ces techniques entrent dans le cadre de contrôle non destructif CND, définit comme suit : les méthodes qui permettent l'essai, l'examen ou la détection de défauts sur une machine ou une pièce, sans en altérer la nature, la structure, ou le fonctionnement.

2.9. Avantage de la maintenance conditionnelle :

- Réduction de coût 30% et de la durée de réparation par rapport à l'entretien préventif;
- L'accroissement de la durée de vie des pièces par rapport à une politique de changement systématique. Remplacement des pièces défectueuses uniquement;

Chapitre 2 : Généralité sur la maintenance

- La suppression des défauts de jeunesse lors de remise en route après un entretien systématique ;
- Coûts de maintenance réduits de 50-80% ;
- Nombre de pannes réduit de 50-60% ;
- Stocks de PDR réduits de 20-30% ;
- Temps d'arrêt réduit de 50-80% ;
- Coût des heures supplémentaires réduit de 20-50% ;
- Durée de vie des machines accrue de 20-40% ;
- Productivité accrue de 20-30% ;
- Profit accru de 25-60%.

2.10. Inconvénient de la maintenance conditionnelle :

Nécessite une équipe de maintenance formée en analyse vibratoire et en essais non-destructifs. Niveau technologique plus élevé.

2.11 Analyse vibratoire :

Une vibration est une oscillation ou la quantité est un paramètre définissant le mouvement d'un système mécanique.

Une oscillation est une variation, normalement dans le temps, de la magnitude d'une quantité en regard d'une référence spécifiée, lorsque cette magnitude est alternativement plus grande ou plus petite que la référence. En effet, un corps est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement oscillatoire autour d'une position d'équilibre ou de référence. Les différents éléments de la machine vibrent à des fréquences et des amplitudes différentes. C'est pourquoi une vibration se caractérise principalement par sa fréquence, son amplitude et sa nature. Toute machine possédant des composants en mouvement génère un certain niveau de vibration quel que soit le soin apporté à leur fabrication. Ces vibrations sont caractéristiques de l'état de l'équipement et constituent sa signature. Au fur et à mesure que l'état de la machine se détériore, le niveau vibratoire change, première manifestation physique d'une anomalie, cause potentielle de dégradation et de panne.

Aujourd'hui, l'emploi des technologies intégrant les méthodes avancées de traitement de signal occupe une place privilégiée pour faire un diagnostic d'un équipement mécanique. Ces caractéristiques font de la surveillance par analyse vibratoire, un outil indispensable pour une maintenance moderne, puisqu'elle permet d'améliorer la disponibilité et la sécurité par détection précoce et le suivi de la dégradation des éléments critiques, ainsi localiser l'organe défectueux sans démontage de la machine (Contrôle Non Destructif). Par conséquent, la

correction éventuelle et la programmation des opérations de maintenance seront limitées aux seuls maillons et organes défaillants.

2.11.1 Avantages et Inconvénients de l'analyse vibratoire :

a. Avantages :

- Détection à un stade précoce des défauts ;
- Possibilité de réaliser un diagnostic approfondi (connaître l'origine de défaut) ;
- Autoriser une surveillance continue (machines critiques) ;
- Augmenter la durée de vie des équipements ;
- Améliorer la disponibilité des équipements ;
- Eviter les arrêts de production non programmés ;
- Eviter la casse des machines ;
- Augmenter la sécurité dans les secteurs d'activités ;
- Assurer un contrôle qualité permanent des réparations, du montage et du graissage ;
- Eviter les erreurs humaines, lors des arrêts et de remise en état ;
- Permet de surveiller l'équipement à distance (télémaintenance)...etc.

b. Inconvénients :

- Spectre parfois difficile à interpréter ;
- Installation coûteuse dans le cas de surveillance continue.

2.11.2. Principe de la méthode :

L'analyse vibratoire est la plus connue et la plus largement employée. Il faut dire qu'elle permet à elle seule de détecter pratiquement tous les défauts susceptibles d'apparaître dans les machines tournantes. Un balourd, un jeu, un défaut d'alignement, un roulement usé ou endommagé... se traduisent par une variation des efforts internes que subit la machine, et donc à une modification de son comportement vibratoire.

En plaçant des accéléromètres aux endroits spécifiques (points de mesure) où se transmettent ces efforts (c'est-à-dire sur les paliers des machines), on peut alors suivre l'état de santé de l'équipement.

2.11.3. Techniques de détection des défauts :

a. Analyse spectrale :

Le diagnostic vibratoire se base sur l'identification du phénomène mécanique à la fréquence de la vibration qu'il génère. Pour cela il faut donc représenter la vibration dans l'espace de

fréquence. Cette opération se réalise mathématiquement en effectuant la transformée de FOURIER du signal temporel vibratoire. Le résultat est appelé spectre fréquentiel. L'analyse spectrale permet de fournir à nous, non seulement des informations sur le comportement vibratoire instantané, mais également des informations sur la tendance des phénomènes et de l'apparition du défaut.

b. Analyse cepstral :

Le cepstre est en quelque sorte le spectre d'un spectre logarithmique et il permet de trouver les périodicités dans le spectre original. Le cepstre est défini comme étant la transformée de Fourier inverse du logarithme du spectre de puissance.

$$C(\tau) = \mathbf{F}^{-1} \{ \log F(f) \}$$

Où $F(f)$ est la fréquence du spectre.

En fait cela signifie que le cepstre est une sorte de "spectre du spectre". MAIS, ce n'est pas la caractéristique distinctive de cette fonction.

C'est un outil de diagnostic utilisé pour distinguer des défauts qui donnent des images spectrales complexes dues à plusieurs modulations d'amplitude concomitantes. Les engrenages peuvent nécessiter ce type d'analyse.

c. Analyse d'enveloppe :

Cette technique est très utilisée pour la détection des défauts manifestant dans les hautes fréquences. Ces défauts sont forcément de faible énergie. Certains défauts d'organes mécaniques comme les roulements produisent des modulations de phase (ou fréquence) et d'amplitude. Le phénomène de modulation de phase provoque dans le spectre des bandes latérales autour des fréquences principales du système (fréquence d'engrènement et harmoniques par exemple).

2.12. Notions générales d'une vibration :

Les vibrations contiennent donc toute l'information concernant l'état des organes mécaniques de la machine. La difficulté réside dans l'analyse des signaux vibratoires et dans l'identification des composantes relatives aux éléments à surveiller, donc il est nécessaire de connaître les principales notions des vibrations pour comprendre comment lire et interpréter les signaux spectrales.

2.12.1. Définition d'une vibration :

On désigne par vibration la variation plus ou moins régulière d'une grandeur quelconque dans le temps. Il existe de nombreux exemples, qu'ils soient artificiels ou naturels, dans lesquels on observe un tel phénomène de va-et-vient autour d'une position de repos.

La norme ISO 2041 « Vibrations et chocs - Vocabulaire (Août 1990) » définit la notion de vibration :

« Variation avec le temps de l'intensité d'une grandeur caractéristique du mouvement ou de la position d'un système mécanique, lorsque l'intensité est alternativement plus grande et plus petite qu'une certaine valeur moyenne ou de référence ».

En fait, un corps est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement oscillatoire autour d'une position d'équilibre ou de référence.

2.12.2. Les différentes formes de vibrations :

On classe les vibrations d'après l'évolution de la variable considérée dans le temps (périodicité). On distingue ainsi les vibrations :

- Harmoniques ;
- Périodiques ;
- Apériodiques.

a. Vibrations harmoniques :

Une vibration harmonique est une vibration dont le diagramme amplitude-temps est représenté par une sinusoïde.

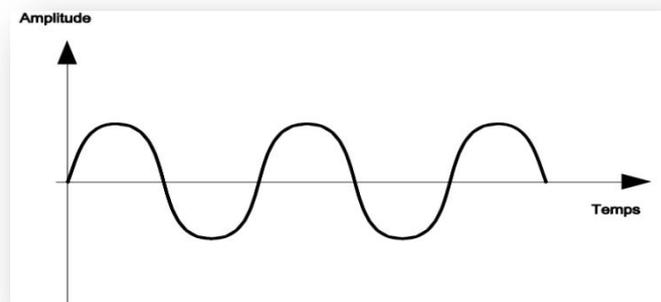


Figure 2.3 : Vibrations harmoniques

$$\mathbf{x(t) = X \cdot \sin(\omega t + \varphi)}$$

b. Vibrations périodiques :

Une vibration périodique est telle qu'elle se reproduit exactement après un certain temps appelé période. Une telle vibration est créée par une excitation elle-même périodique. C'est le cas le plus fréquent rencontré sur les machines. Une vibration périodique est la composée de plusieurs vibrations harmoniques.

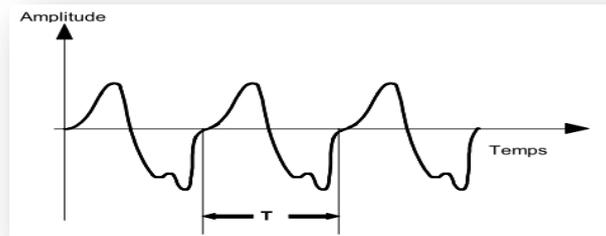


Figure 2.4 : Vibrations périodiques

$$x(t) = \sum_{i=1}^n [X_i \cdot \sin(\omega_i \cdot t + \varphi_i)]$$

c. Vibration aperiodique :

Une vibration aperiodique est telle que son comportement temporel est quelconque, c'est-à-dire que l'on n'observe jamais de reproductibilité dans le temps. C'est le cas des chocs que l'on enregistre sur un broyeur.

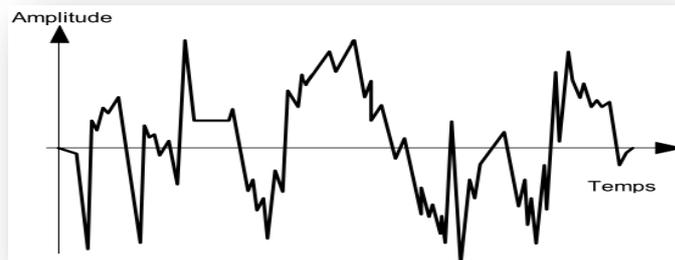
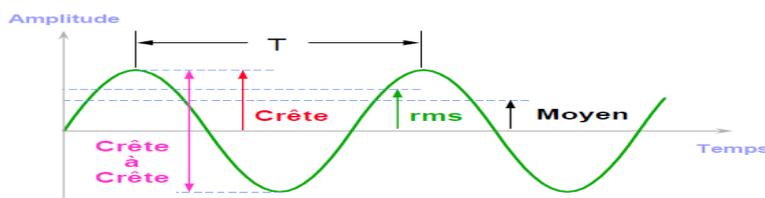


Figure 2.5 : Vibrations aperiodiques

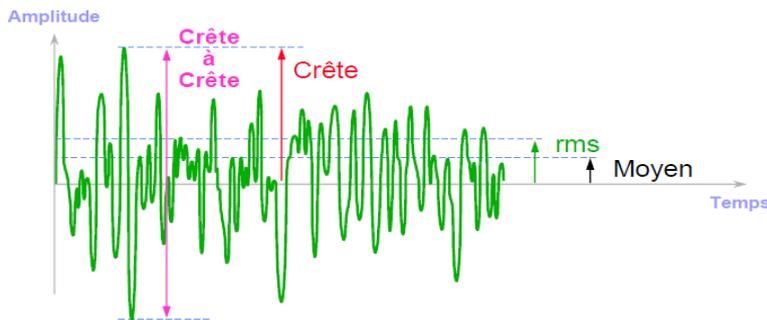
$$x(t) = \sum_{i=1}^{\infty} [X_i \cdot \sin(\omega_i \cdot t + \varphi_i)]$$

2.13. Description d'un signal vibratoire

Généralement, une vibration est caractérisée principalement par sa fréquence, son amplitude et sa nature,



Signal périodique



Signal temporel

$\text{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$	$\text{Moyen} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$	$\text{Facteur Crête} : \frac{\text{Crête}}{\text{RMS}}$
--	---	--

Figure 2.6 : Description du signal vibratoire

La valeur maximale **X_c** (crête) : c'est la plus grande valeur atteinte qui ne prend pas en compte l'évolution de la vibration en fonction du temps. Elle est rarement utilisée ;

La valeur crête à crête **X_{cc}** (crête à crête) : c'est la différence entre la plus grande valeur du signal et sa plus petite valeur ;

La valeur moyenne absolue **X_{moy}** : c'est la moyenne du signal redressé sur une période ; elle est peu utilisée car elle n'est pas reliée directement à une grandeur physique,

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

La valeur efficace RMS (RootMean Square) : c'est l'image de l'énergie contenue dans un signal. Elle est exprimée en unité physique (m/s², m/s, m ou g pour les vibrations par exemple). Elle est très bien adaptée pour les composantes déterministes du spectre (raies pures). La valeur efficace se détermine par la formule suivante :

$$\text{Valeur efficace(RMS)} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T X^2(t) dt} ;$$

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

$$F_c = X_c / \text{RMS}.$$

C'est un indicateur sans dimension.

Chapitre 2 : Généralité sur la maintenance

Il faut remarquer que l'amplitude nous renseigne sur l'importance du défaut surveillé, alors que la fréquence nous renseigne sur son origine.

$$X_{c(\text{calc})} = X_{\text{eff}} \cdot \sqrt{2}$$

$$X_{cc(\text{calc})} = X_{\text{eff}} \cdot 2\sqrt{2}$$

$$X_{\text{eff}} = \frac{X_c}{\sqrt{2}} = \frac{X_{cc}}{2\sqrt{2}}$$

$$X_c = X_{\text{eff}} \cdot \sqrt{2} = \frac{X_{cc}}{2}$$

$$X_{cc} = X_{\text{eff}} \cdot 2\sqrt{2} = 2 \cdot X_c$$

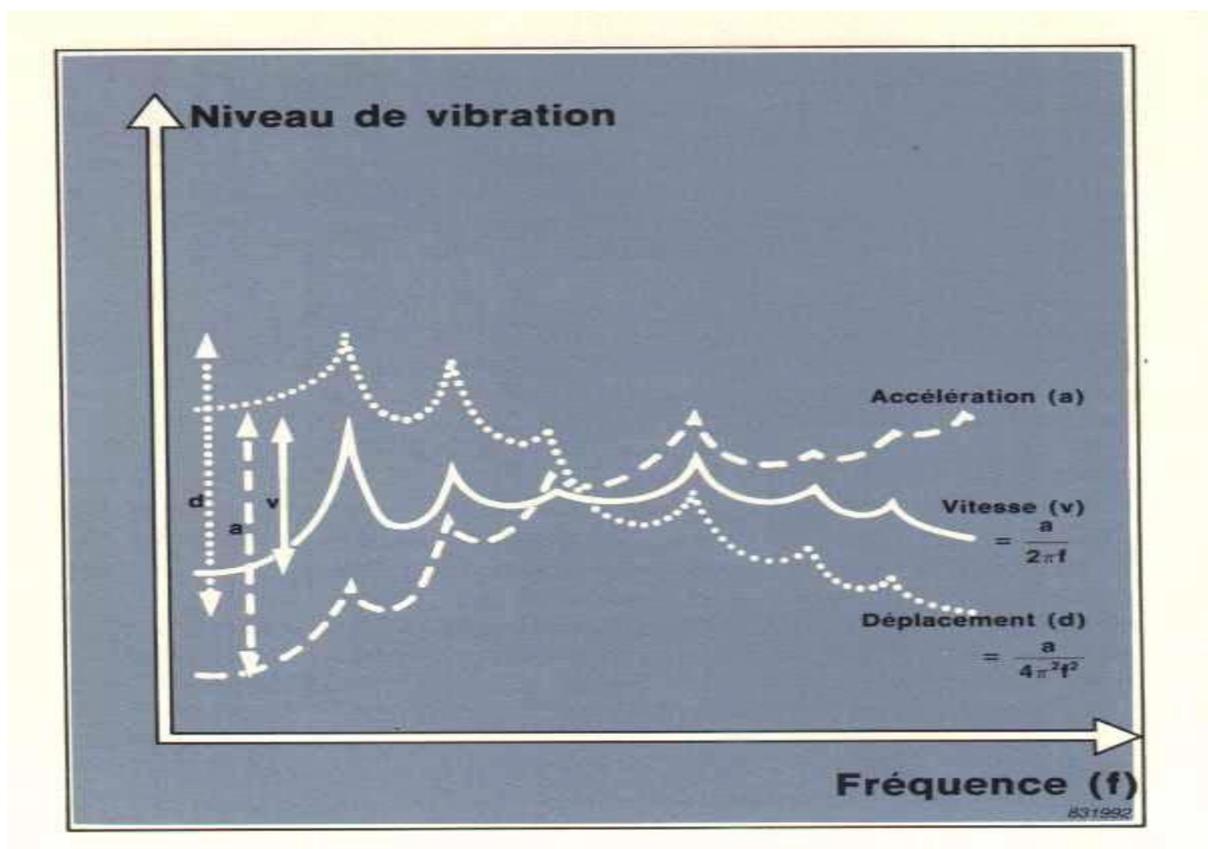


figure :2.7 spectres en accélération, vitesse et déplacement

$$a(t) = \frac{d(v)}{dt} = V.\omega. \cos\left(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right)$$

$$a(t) = A. \sin(\omega t + \varphi + \pi)$$

$$a(t) = -A. \sin(\omega t + \varphi)$$

$$|S| = \frac{|V|}{\omega} = \frac{|A|}{\omega^2}$$

$$|V| = |S|. \omega = \frac{|A|}{\omega}$$

$$|A| = |V|. \omega = |S|. \omega^2$$

Conclusion :

La maintenance est concernée par la maîtrise de qualité symbolisée par l'objectif des **cinq zéros** :

- **Zéro pannes** : objectives naturelles de la maintenance ;
- **Zéro défaut** : outil de production en parfait état (tout défaut entraîne un arrêt de production d'où augmentation des coûts et des délais) ;
- **Zéro stocks, zéro délai** : un outil de fabrication fiable permet une fabrication sans stock (flux tendu) et une livraison sans délai ;
- **Zéro papier** : il faut comprendre « zéro papier inutile », c'est à dire les papiers engendrés par les erreurs, les défauts, les défaillances, les retards qui viennent alourdir le travail et l'organisation.

Introduction :

Un engrenage est composé de l'ensemble de deux roues dentées engrenant l'une avec l'autre, permettant de transmettre de la puissance entre deux arbres rapprochés avec un rapport de vitesse constant.

On appelle roues dentées des corps de révolution pourvus de dents par le contact desquelles un mouvement de rotation peut être transmis d'un arbre moteur vers un arbre récepteur. L'engrènement d'une roue dentée avec une crémaillère transforme la rotation de la roue en un déplacement de translation de la crémaillère et vice-versa. La petite roue se nomme le pignon, la grande roue extérieure s'appelle la roue, la grande roue intérieure s'appelle la couronne. L'une des roues peut avoir un rayon infini, elle s'appelle alors une crémaillère.

Selon la position relative des deux arbres, on distingue trois classes d'engrenages :
Les engrenages parallèles (les 2 arbres sont parallèles)
Les engrenages concourants (les 2 arbres sont tels que leurs prolongements se coupent).
Les engrenages gauches (les 2 arbres occupent une position relative quelconque)



3.1- Avantage des engrenages :

- Transmission des plus petites aux plus grandes machines
- Rapport constant des vitesses quelle que soit la charge
- Disposition quelconque des axes des roues, même si les axes parallèles sont la meilleure solution.
- Sécurité de service et durée de vie élevée
- Entretien restreint (graissage)

Chapitre 3: Les engrenages

-Compacité et encombrement faible

3.2-Désavantage des engrenages :

-Prix de revient relativement élevé (par rapport à d'autres solutions)

-Niveau sonore parfois gênant (dépend du type d'engrenages)

-Transmission rigide entre les arbres

-Amortissement peu efficaces des à-coups et des vibrations

-Interchangeabilité limitées (même module nécessaire)

3.3-chaîne cinématique d'une machine comportant des engrenages :

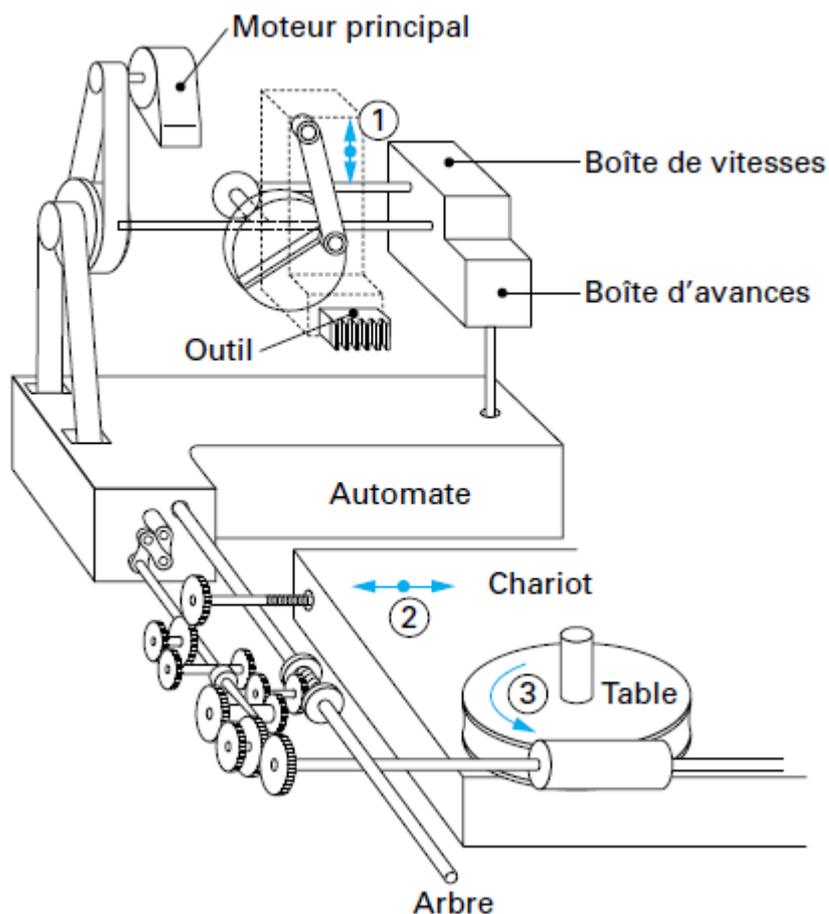


Figure3.1– Chaîne cinématique d'une machine à crémaillère

3.4 Géométrie des engrenages :

a) **Cercle primitif** : c'est un cercle imaginaire de même centre que l'axe de la roue dentée permettant d'appliquer aux engrenages les mêmes relations que pour les roues de friction :

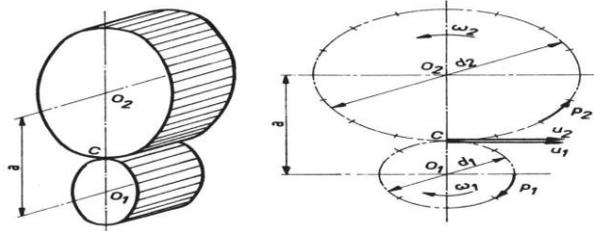
Chapitre 3: Les engrenages

$$i = \frac{\Gamma_a}{\Gamma_b} = \frac{D_a}{D_b} = \frac{\omega_b}{\omega_a}$$

Rapport de réduction :

- Deux roues dentées en prise se comportent comme si elles étaient constituées de deux cylindres de diamètres d_{01} et d_{02} roulant l'un sur l'autre
- Si il n'y a pas de glissement, on peut écrire :

$$v_1 = \frac{\omega_1 d_{01}}{2} = v_2 = \frac{\omega_2 d_{02}}{2}$$



Soit le rapport de réduction i :

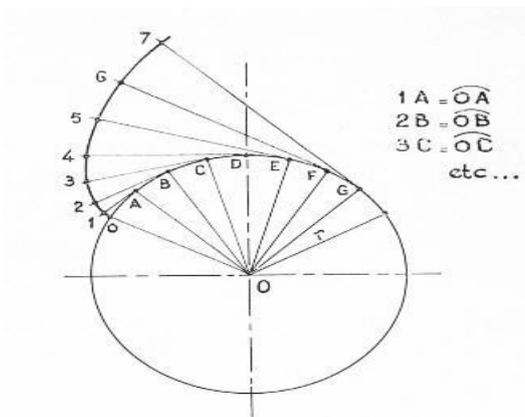
$$\frac{d_{02}}{d_{01}} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = i > 1$$

Et l'entre-axe:

$$a_0 = \frac{d_{01} \pm d_{02}}{2} = m \frac{Z_1 \pm Z_2}{2}$$

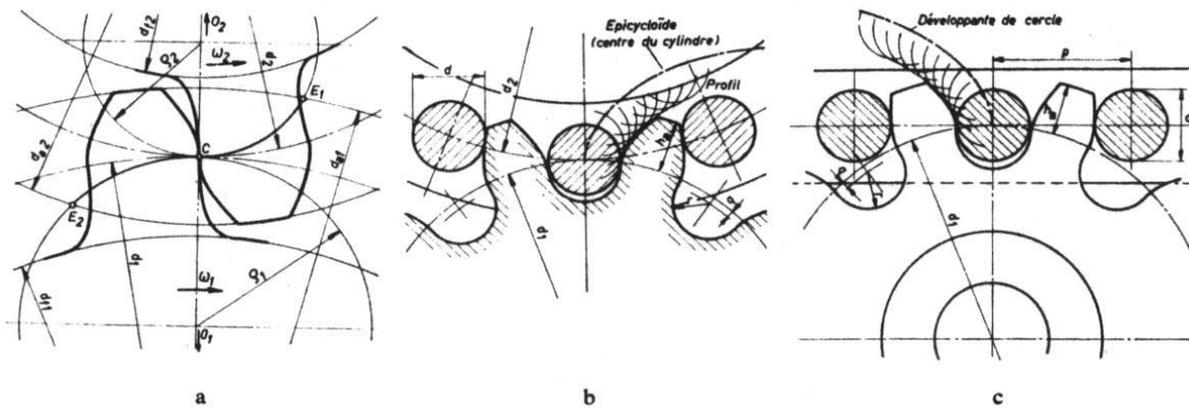
b) Profil des dents

- On appelle développante de cercle la courbe décrite par un point d'une droite (ou une corde) qui roule sans glisser sur la circonférence d'un cercle.
- La circonférence porte le nom de cercle de base.



Chapitre 3: Les engrenages

- Les dentures cycloïdales ne sont plus utilisées dans les machines car les difficultés de fabrication et de contrôle sont grandes.
- Le rendement mécanique et les conditions de contact sont meilleurs qu'entre les profils de dents en développante de cercle.
- Par contre les profils cycloïdaux imposent un entraxe et des cercles générateurs de rayons ρ_1 et ρ_2 égaux sur les deux roues.



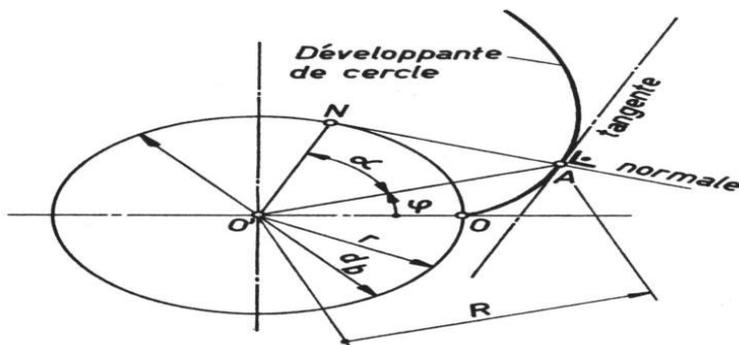
c) Equation de odontoïde:

- La corde roule sans glisser. La longueur de l'arc est celle de la corde

$$R(\alpha + \phi) = R \operatorname{tg}(\alpha) \quad \phi = \operatorname{tg} \alpha - \alpha = \operatorname{inv}(\alpha)$$

- En outre

$$r \cos \alpha = R \quad r = \frac{R}{\cos \alpha}$$



- Méthode numérique pour calculer la développante de cercle
- 1/ A un angle f correspond un angle a :

$$\phi = \operatorname{tg} \alpha - \alpha = \operatorname{inv}(\alpha)$$

Chapitre 3: Les engrenages

2/ A angle α correspond un rayon r :

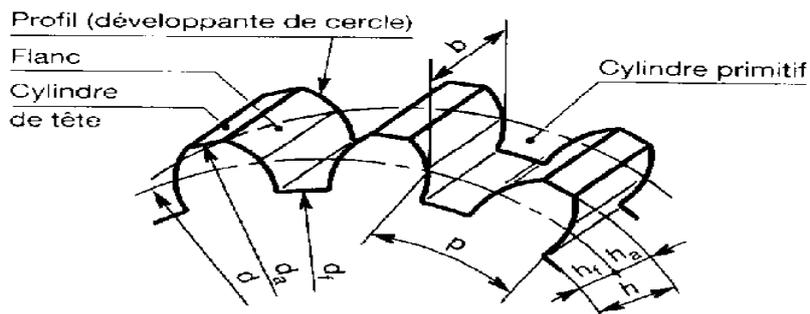
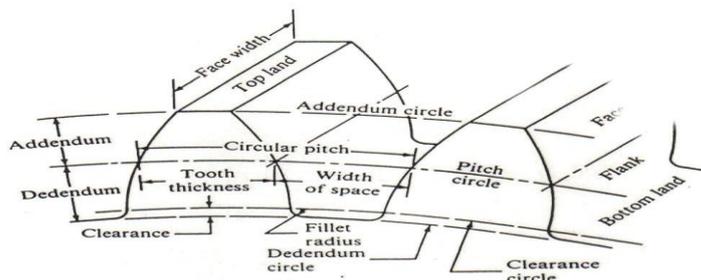
$$r = \frac{R}{\cos \alpha}$$

3/ La zone retenue sera limitée par le pied et la tête de dent

- La tangente à la développante ne coupe pas le profil de la dent
- La normale à la développante est toujours tangente au cercle de base
- Le rayon de courbure r en un point quelconque de la développante a son centre sur le cercle de base
- Deux développantes de cercle de base sont équidistantes en tout point (distance mesurée sur le cercle de base)
- L'angle α est appelé angle de pression ou angle d'incidence: il varie en tout point de la développante

d) Dimension :

-On exprime les dimensions de la dent en fonction du module m



- 's' l'épaisseur au niveau du diamètre primitif = 'e' largeur du creux correspondant entre deux dents (sinon l'engrènement n'est pas possible)

$$s = e = \frac{p}{2} = \frac{\pi d_0}{2Z} = \frac{\pi m}{2} = 1,5708 m$$

Chapitre 3: Les engrenages

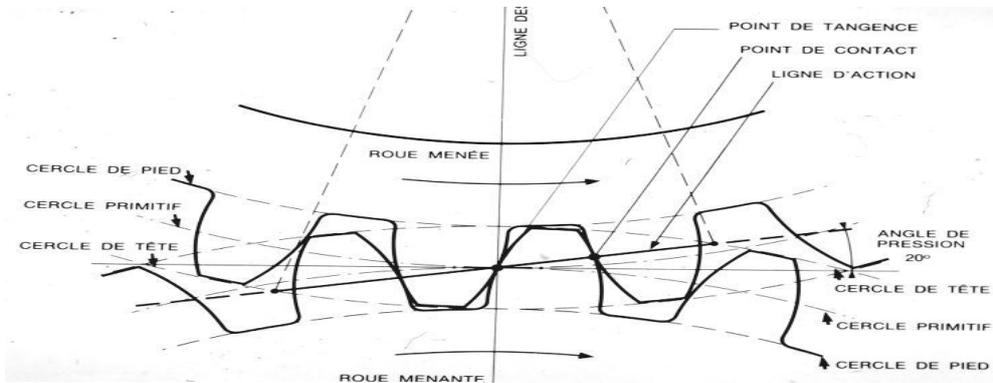
-Addendum ha hauteur de la dent normale mesurée par rapport au cercle primitif (saillie)

$$h_a = m w_{0a} \quad w_{0a} = 1,00 \text{ (ISO)}$$

-Dédendum hf : profondeur du creux entre dents normales, mesurées par rapport au cercle primitif

$$h_f = m w_{0f} \quad w_{0f} = 1,25 \text{ (ISO)}$$

primitif



Diamètre de tête :

$$d_a = d_0 + 2 h_a = d_0 + 2,00 m \quad r_{\max} = d_a/2$$

Diamètre de pied :

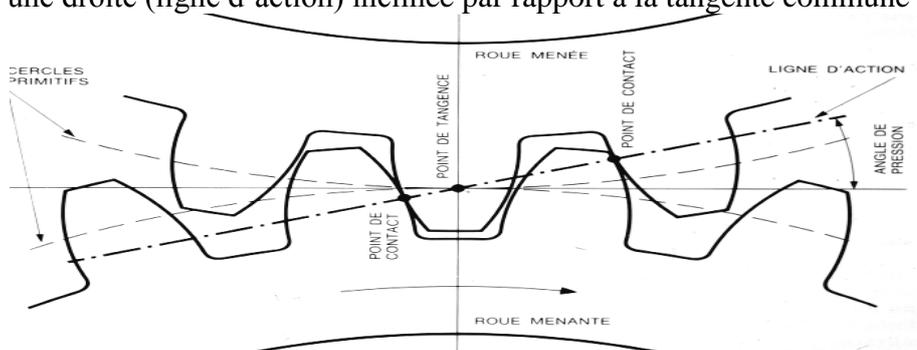
$$d_f = d_0 - 2 h_f = d_0 - 2,50 m \quad r_{\min} = d_f/2$$

$$r_{\min} > d_f/2 \quad d_f/2 < R_b$$

e) Force et angle de pression :

L'examen du profil de deux roues en contact montre que les points de contact sont toujours situés sur une droite (ligne d'action) inclinée par rapport à la tangente commune aux cylindres

primitifs.



Chapitre 3: Les engrenages

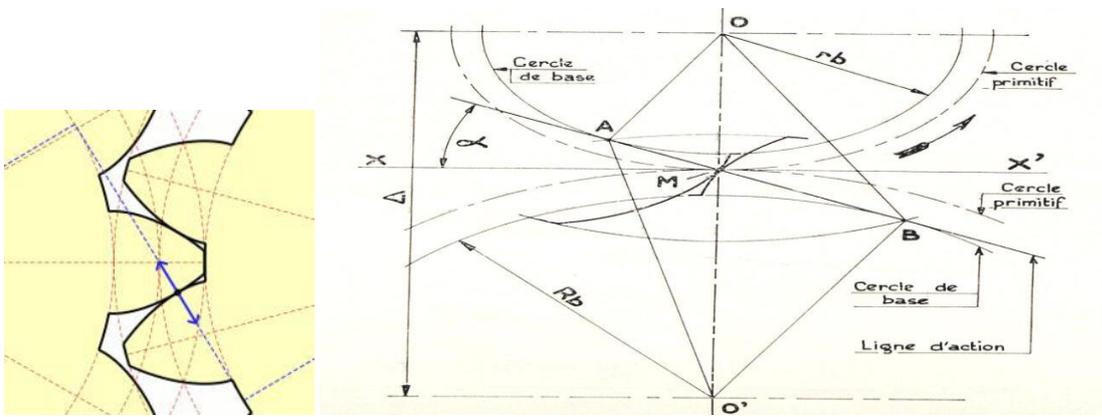
-Dans les dentures en développante de cercle, la normale commune aux deux cercles de base est aussi la tangente aux deux cercles de base.

-La normale commune est la ligne d'action de la force de contact.

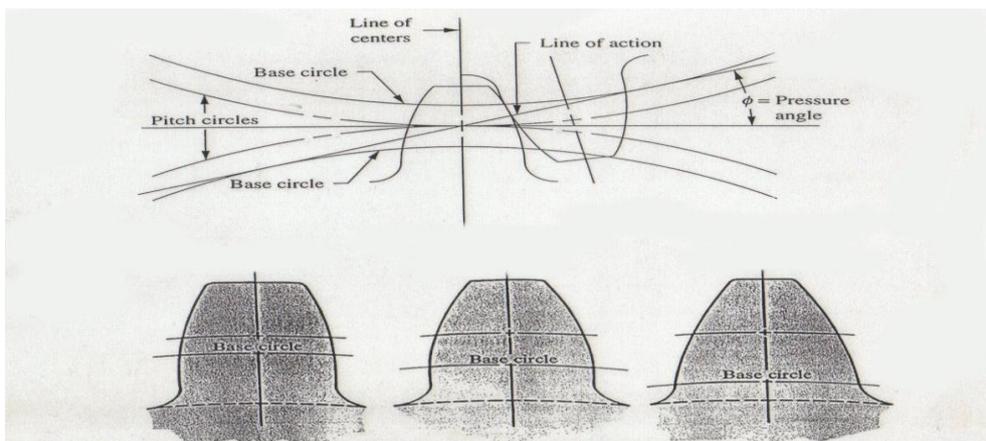
-La normale commune passe par le point de contact (pitch point) des deux cercles primitifs quel que soit le point où le contact physique a lieu.

-Au point de contact les deux pinions ont la même vitesse appelée vitesse au cercle primitif.

-L'angle entre la ligne d'action de la force de contact et le vecteur vitesse, tangent au cercle primitif est appelé angle de pression



-Les angles de pression α_0 sont normalisés et peuvent prendre un petit nombre de valeur: 14,5° (rare), 20° (le plus courant), 25°

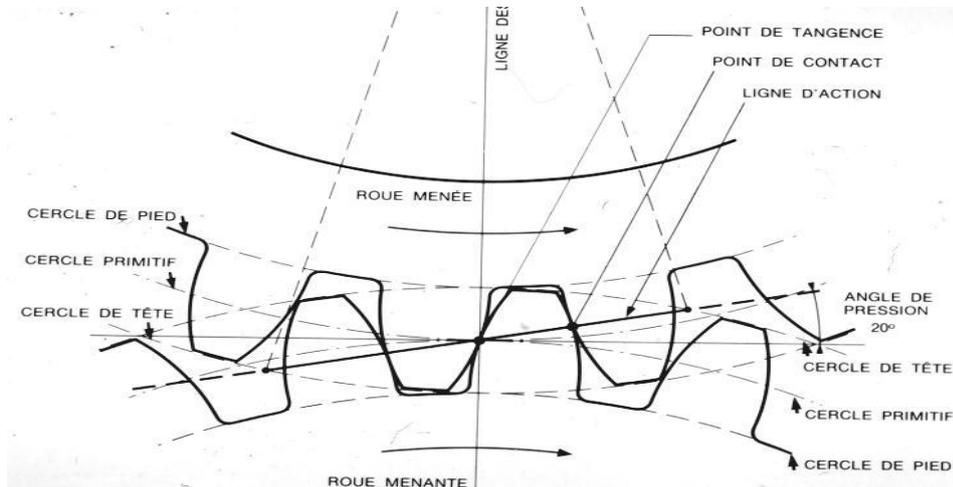


-L'angle de pression permet encore d'écrire la relation entre le rayon du cercle primitif et le rayon du cercle de base:

$$\frac{d_{0i}}{2} \cos \alpha_0 = R_i$$

Chapitre 3: Les engrenages

- L'existence de l'angle de pression α_0 entraîne l'apparition de forces radiales et tangentielles dont la composition vectorielle donne F_n réellement transmission de dent à dent.

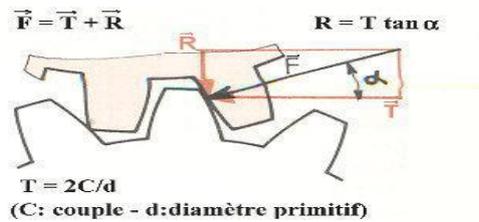


L'existence de l'angle de pression α_0 entraîne l'apparition de forces radiales F_r et tangentielles F_t dont la composition donne la force de pression transmise de dent à dent

$$F_t = F_n \cos \alpha_0$$

$$F_r = F_n \sin \alpha_0$$

$$F_r = F_t \operatorname{tg} \alpha_0$$



-En réalité on calcule la force tangentielle car elle est donnée par la puissance transmise

$$F_t \frac{d_{0i}}{2} \omega_i = \mathcal{P}$$

-Et puis on calcule la force radiale

$$F_r = F_t \operatorname{tg} \alpha_0$$

f) déport de denture

□ Le déport

de denture consiste à modifier l'entre axe en maintenant les cercles de base identiques

-Soit δ l'accroissement d'entre axe

Chapitre 3: Les engrenages

$$a' = a_0 + \delta$$

-Les diamètres primitifs et les angles de pression s'en trouvent modifiés.

-L'angle de pression est augmenté avec l'entre axe

$$\cos \alpha' = \frac{\cos \alpha_0}{1 + \frac{\delta}{a_0}}$$

Il existe un profil presque universel : la développante de cercle. Cela assure un rapport de vitesse constant (liaison homocinétique) et une transmission d'énergie optimum entre les engrenages. Au point de contact entre deux roues, la tangente au profil est commune aux deux dents. L'angle formé par cette tangente et la perpendiculaire au rayons des roues est appelé angle de pression. Parmi les autres propriétés remarquables des engrenages à développante, on peut citer les suivantes :

1. C'est une liaison homocinétique même quand on fait varier l'entraxe.
2. L'usure des surfaces actives est plus régulièrement répartie.
3. Les vibrations sont plus faibles qu'avec un autre profil.

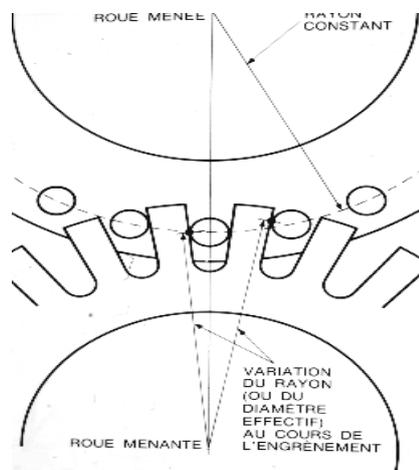
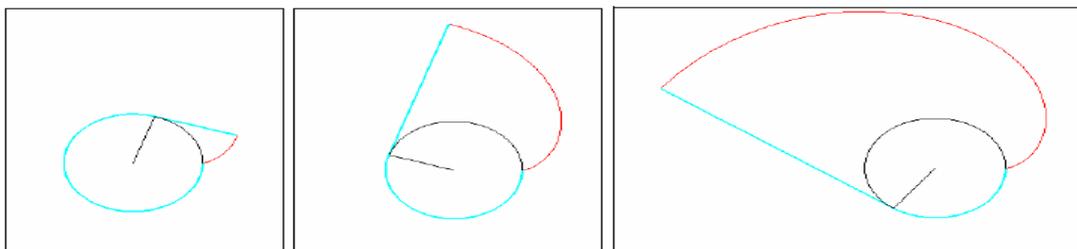
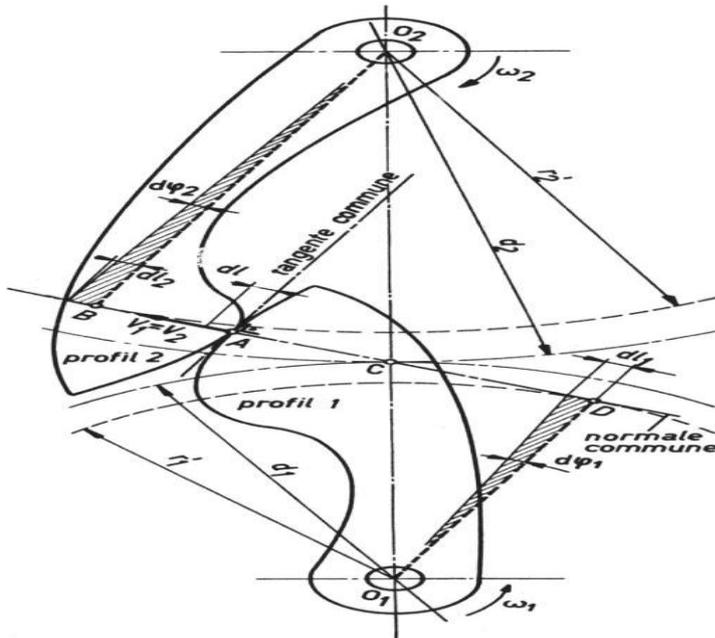


Figure3.2: création d'une développante de cercle

Pour que l'on ait une paire engrenage, il faut que la transformation soit homocinétique:
 1/ Il faut que le rapport des vitesses angulaires soit égal au rapport d'engrenage ou encore des diamètres

2/ le contact entre les dents successives ne subisse par d'interruption



Soient deux roues dentes de cercles primitifs d_{01} et d_{02} en contact au point C. Pour qu'il y ait transmission du mouvement du pignon 1 à la roue 2, les profils des dents doivent rester constamment en contact. Supposons pour simplifier que les toues 1 et 2 soient remplacées par les deux leviers centrées en O_1 et O_2 .

Dans une position quelconque, par exemple au point de contact A, les vitesses de la normale commune doivent être identiques. $\vec{v}_1 = \vec{v}_2$

Si le profil 1 est déplacé de la distance dl_1 dans la direction de la normale, le profil 2 se déplace de la même valeur: $dl_1 = dl_2 = dl$

Pendant l'intervalle de temps dt les deux roues doivent tourner chacune des angles élémentaires $d\phi_1$ et $d\phi_2$. □ On peut écrire :

$$dl_1 = r'_1 d\phi_1 \quad dl_2 = r'_2 d\phi_2$$

$$r'_1 d\phi_1 = dl_2 = r'_2 d\phi_2$$

Il vient

$$\frac{r'_2}{r'_1} = \frac{d\phi_1}{d\phi_2} = \frac{d\phi_1/dt}{d\phi_2/dt} = \frac{\omega_1}{\omega_2}$$

Chapitre 3: Les engrenages

Pour que le rapport des vitesses angulaires ω_1/ω_2 reste constant quelle que soit la position du point de contact, il faut que le rapport r'_2/r'_1 le reste aussi.

On La similitude entre les triangles O_1CD et O_2BC permet d'écrire

$$\frac{\overline{O_2B}}{\overline{O_1D}} = \frac{\overline{O_2C}}{\overline{O_1C}} = \frac{\overline{CB}}{\overline{CD}}$$

Etant donné que

$$\overline{O_2B} = r'_2, \overline{O_1D} = r'_1, \overline{O_2C} = d_{02}/2, \overline{O_1C} = d_{01}/2, :$$

Il vient :

$$\frac{r'_2}{r'_1} = \frac{d_{02}}{d_{01}} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = i$$

La normale commune en tout point de contact de deux profils quelconques doit passer par le même point central commun aux deux profils de fonctionnement.

Loi des engrenages: La normale commune en tout point de contact de deux profils quelconques doit passer par le même point central commun aux deux profils de fonctionnement.

Si l'un des profils des dents est fixé, le profil de l'autre roue dentée est déterminé par la loi. Ce deuxième profil se nomme le profil conjugué.

Loi des engrenages: La normale commune en tout point de contact de deux profils quelconques doit passer par le même point central commun aux deux profils de fonctionnement.

Si l'un des profils des dents est fixé, le profil de l'autre roue dentée est déterminé par la loi. Ce deuxième profil se nomme le profil conjugué.

Il existe une infinité de profils conjugués qui conviennent et vérifient la loi.

Il y a un nombre infini de profils conjugués de dents, mais seuls un petit nombre a donné lieu à des applications pratiques. Les plus connues sont les profils en forme de cycloïde utilisés en

horlogerie et les profils en développante de cercle (odontoïde) qui sont utilisés en transmission de puissance.

3.5 Les différents types d'engrenages :

a. Les engrenages cylindriques à denture droite C'est le type de denture le plus courant. Il est utilisé dans toutes les applications de mécanique générale. C'est ce système qui permet de transmettre le maximum d'effort, mais son principal défaut est d'être bruyant.

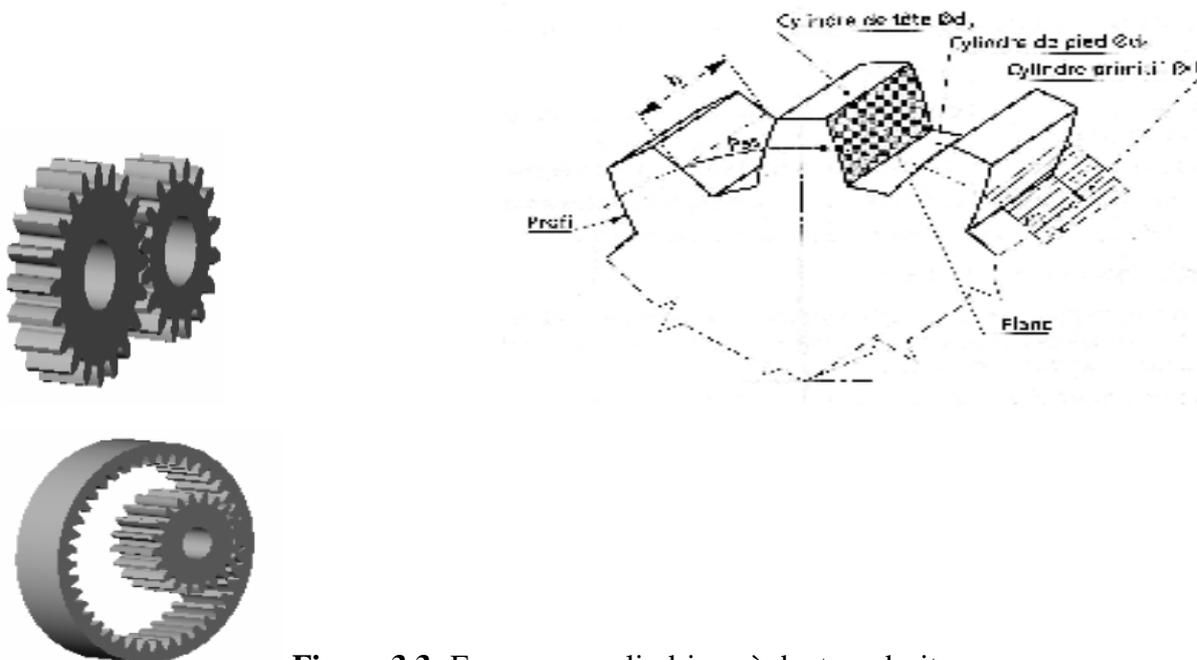


Figure 3.3: Engrenage cylindrique à denture droite

Désignation	Symbole	Formule
Module	m	Par un calcul de RDM
Nombre de dents	Z	Par un rapport de vitesse
Diamètre primitif	d	$d = mZ$
Diamètre de tête	d_a	$d_a = d + 2m$
Diamètre de pied	d_f	$d_f = d - 2.5m$
Saillie	h_a	$h_a = m$
Creux	h_f	$h_f = 1.25m$
Hauteur de dent	h	$h = 2.25m$
Pas	P	$P = \pi m$
Largeur de denture	b	$b = km \ (5 \leq k \leq 16)$
Entraxe	a	$a = (d_1 + d_2) / 2$

b. Les engrenages cylindriques à denture hélicoïdale

Les engrenages à denture hélicoïdale permettent une transmission plus souple, plus progressive et moins bruyante que les engrenages à dentures droite, La transmission des efforts est plus importante (nombres de dents en contacts plus élevés), y compris aux vitesses élevées, ils sont notamment utilisés dans les boites de vitesses d'automobiles, les réducteurs et les multiplicateurs de vitesses. Les inconvénients de ce type d'engrenage sont :

- Des efforts supplémentaires dus à l'angle d'hélice (force axiale sur les paliers et augmentation des efforts de flexion).
- Rendement un peu moins bon.
- Utilisation impossible en montage "baladeur" (ces engrenages doivent rester en contact permanent).



Figure 3.4 : Engrenage cylindrique à denture hélicoïdale

Désignation	Symbole	Formule
Module réel	m_n	Par un calcul de RDM
Nombre de dents	Z	Par un rapport de vitesse
Angle d'hélice	β	Entre 20° et 30°
Module apparent	m_t	$m_t = \frac{m_n}{\cos \beta}$
Pas apparent	p_t	$p_t = \frac{p_n}{\cos \beta}$
Pas réel	p_n	$p_n = \pi m_n$
Diamètre primitif	d	$d = m_t Z$
Diamètre de tête	d_a	$d_a = d + 2m_n$
Diamètre de pied	d_f	$d_f = d - 2.5m_n$
Saillie	h_a	$h_a = m_n$
Creux	h_f	$h_f = 1.25m_n$
Hauteur de dent	h	$h = 2.25m_n$
Largeur de denture	b	$b \geq \pi m_n / \sin \beta$
Entraxe	a	$a = (d_1 + d_2) / 2$

c. Les engrenages coniques

Les roues de ces engrenages ne sont pas des cylindres, mais des cônes. Il existe des roues dentées coniques à denture droite et des roues dentées coniques à dents obliques et à dents spirales. Tous ces engrenages servent à transmettre la rotation entre des arbres dont les axes sont concourants, avec un rapport de vitesse rigoureux. Ceux à dents spirales, c'est-à-dire dont les dents ont la forme d'un arc de cercle, sont les plus utilisés, car ils sont plus silencieux.

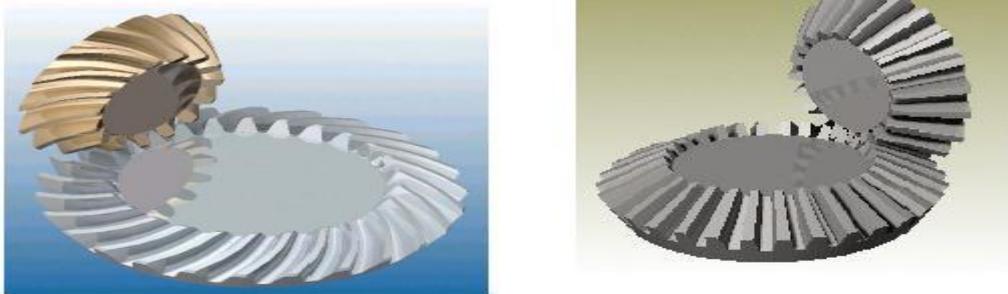


Figure3.5 : Engrenage conique

Désignation	Symbole	Formule
Module	M	Par un calcul de RDM
Nombre de dents	Z	Par un rapport de vitesse
Angle primitif	δ	$\text{tag} \delta_1 = \frac{Z_1}{Z_2}$
Diamètre primitif	D	$d_1 = mZ_1$ et $d_2 = mZ_2$
Largeur de denture	B	$b = km$ ($5 \leq k \leq 16$)
Diamètre de tête	d_a	$d_{a1} = d_1 + 2m \cos \delta_1$
Diamètre de pied	d_f	$d_{f1} = d_1 - 2.5m \cos \delta_1$
Saillie	h_a	$h_a = m$
Creux	h_f	$h_f = 1.25m$
Hauteur de dent	H	$h = 2.25m$
Angle de saillie	θ_a	$\theta_a = \frac{m}{L}$
Angle de creux	θ_f	$\theta_f = \frac{1.25m}{L}$
Angle de tête	δ_a	$\delta_{a1} = \delta_1 + \theta_a$
Angle de pied	δ_f	$\delta_{f1} = \delta_1 - \theta_f$

d. Les engrenages gauches : le système roue - vis sans fin

La vis sans fin est constituée d'un long cylindre étroit, présentant une denture hélicoïdale continue, analogue au filetage d'une vis cylindrique, se mettant en prise avec une roue à denture hélicoïdale. Les engrenages à vis sans fin diffèrent des engrenages à roues à denture hélicoïdale.

Chapitre 3: Les engrenages

En effet, les dents de la vis sans fin s'engagent continûment en glissant sur celles de la roue menée, mais ne leur appliquent pas directement un effort de rotation. Les vis sans fin servent principalement à transmettre une rotation, avec une forte réduction de vitesse, entre deux arbres orthogonaux.



Figure 3.6 : Engrenage gauches

Désignation	Symbole	Formule
Module réel	m_n	Par un calcul de RDM
Nombre de filets	Z	Déterminé par le rapport de vitesse
Angle d'hélice	β	Déterminé pour l'irréversibilité $\gamma < 5^\circ, \beta + \gamma = 90^\circ$
Module axial	m_x	$m_x = \frac{m_n}{\cos \gamma}$
Pas axial	p_x	$p_x = \frac{p_n}{\cos \gamma}$
Pas réel	p_n	$p_n = \pi \cdot m_n$
Pas de l'hélice	p_z	$p_z = p_x \cdot Z$
Diamètre primitif	D	$d = \frac{p_z}{\pi \tan \gamma}$
Diamètre extérieur	d_a	$d_a = d + 2m_n$
Diamètre intérieur	d_f	$d_f = d - 2.5m_n$
Longueur de la vis	L	$4p_x < L < 6p_x$

4) Réducteur :

4-1 Définition :

Le nom de réducteur est réservé à un mécanisme séparé s'intercalant entre un moteur et un récepteur.

Lorsque le moteur est fixe sur le carter du réducteur, l'ensemble porte le nom de motoréducteur.

4-2 Fonction :

Un réducteur sert à **réduire la vitesse** d'un moteur (hydraulique, pneumatique, thermique, électrique) avec transmission de la puissance motrice vers une machine réceptrice en absorbant le moins d'énergie. Il permet d'**augmenter le couple** moteur afin d'entraîner en rotation un organe récepteur sous l'effet d'un nouveau couple.

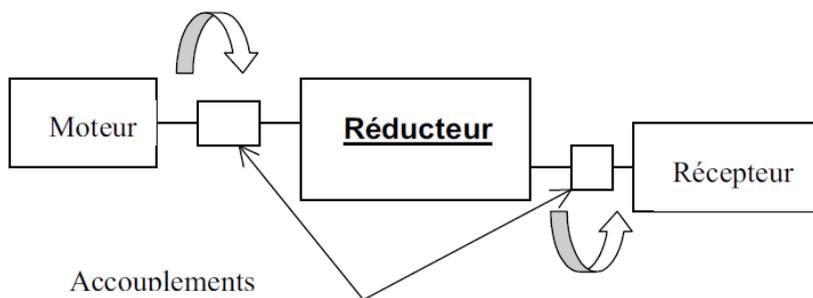
Remarques :

La fréquence de rotation du moteur électrique généralement utilisée est : $N_m = 1500$ tr/min

La transmission de puissance se fait par engrenages

Les réducteurs réversibles peuvent être utilisés comme multiplicateur.

4-3 Condition d'entraînements :



Rapport de réduction

$$k = \frac{N_r}{N_m}$$

$$k = 1 \Rightarrow N_r = N_m$$

$$k < 1 \Rightarrow N_r < N_m \Rightarrow \text{réducteur}$$

$$k > 1 \Rightarrow N_r > N_m \Rightarrow \text{multiplicateur}$$

Raison d'un réducteur

$$r = (-1)^n \frac{\prod Z_{menantes}}{\prod Z_{menées}}$$

n: nombre de contacts extérieurs

Si r est positif, même sens de rotation entre l'entrée et la sortie.

Si r est négatif, sens contraire de rotation entre l'entrée et la sortie.

L'équation (1) ne s'applique que pour les engrenages ou trains d'engrenages cylindriques.

4-4 Les types des réducteurs :

4-4-1 Réducteur à étages

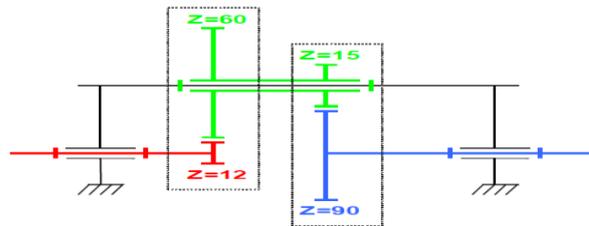
Chapitre 3: Les engrenages

Les réducteurs à étages sont constitués de plusieurs trains d'engrenages (droit ou hélicoïdaux) placés en cascade. Dans un réducteur, la roue du train de l'étage n est solidaire du pignon de l'étage n+1.



Figure 3.7: réducteur à étage.

Soit le schéma cinématique du réducteur à étage suivant :



L'arbre d'entrée est nécessairement constitué d'un pignon, il s'agit donc de l'arbre rouge. Le premier étage possède un rapport de 5:1 et le second étage 6 :1. Le réducteur présente donc un rapport de 30 :1. Pour 30 tours de l'arbre d'entrée, l'arbre de sortie fait un tour.

De manière générale le rapport de réduction d'un réducteur à étage est donné par :

$$\frac{\omega_s}{\omega_e} = (-1)^n \frac{\prod Z_{menantes}}{\prod Z_{menées}}$$

avec n nombre de contacts extérieurs.

Pour diminuer les coûts de fabrication, les premiers étages (supportant des couples moins importants) sont parfois proposés avec une pignonerie en plastique.

4-4-2 Réducteur planétaire ou épicycloïdal :

A encombrement équivalent, les réducteurs planétaires peuvent supporter des couples et des rapports de réductions plus élevés que les réducteurs à étage.

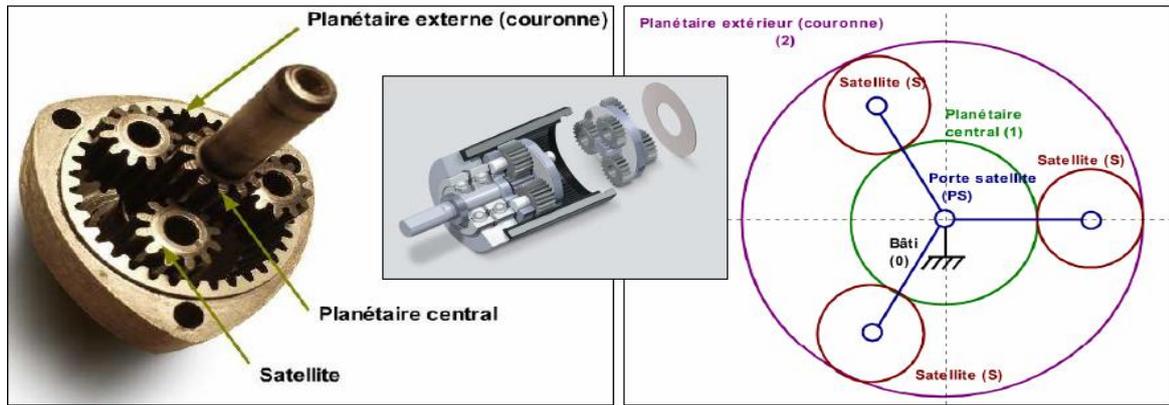


Figure 3.8 : réducteurs planétaires

4.4.3 Réducteurs trochoïdaux

Ce sont des réducteurs constitués d'une couronne et d'une roue dentée comportant une dent de moins que la couronne. La roue tourne autour d'un palier excentré par rapport à l'arbre d'entrée. A chaque tour de l'arbre d'entrée, la roue se décale d'une dent par rapport à la couronne. Le rapport de réduction est donné par la formule :

$$\frac{\omega_s}{\omega_e} = \frac{1}{Z_c}$$

L'arbre d'entrée est l'arbre central, l'arbre de sortie est lié avec la roue dentée.

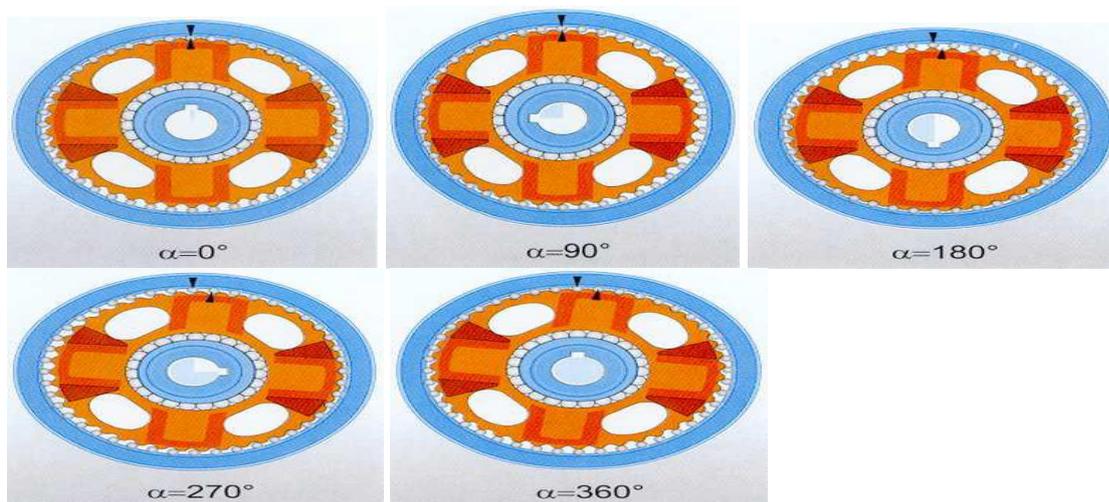


Figure 3.9 : principe d'un réducteur trochoïdal

Conclusion :

Les dentures d'engrenage peuvent être droites, hélicoïdales ou à chevrons. Les amplitudes vibratoires générées par les engrenages à denture hélicoïdale sont généralement plus faibles que celles générées par les autres types de dentures. Les engrenages sont une vaste famille d'éléments de machines utilisées en transmission de puissance.

Ils sont utilisés pour transmettre et convertir le couple et la vitesse dans une grande variété d'applications.

Les matériaux utilisés pour fabriquer les engrenages :

- Fonte à graphite sphéroïdal FGS :
- Roues de grandes dimensions.
- Aciers ordinaires type XC :
- Engrenages peu chargés :
- Aciers au nickel-chrome (10 NC12)
- Engrenages fortement chargés.
- Matières plastiques : Nylon, Téflon.
- Roues de grandes dimensions.

Introduction :

La plupart des techniques modernes pour la détection des dommages des engrenages sont basées sur l'analyse des signaux vibratoires acquises à partir de la boîte de vitesse. L'objectif commun est de détecter la présence d'une faute, rarement le type de défaut à un stade précoce de développement et de suivre son évolution, afin d'estimer la durée résiduelle de la machine. Il est bien connu que les éléments les plus importants dans les spectres de vibration sont **la fréquence d'engrènement** et leurs harmoniques, ainsi que **les bandes latérales de modulation**.

Les engrenages permettent la transmission d'un couple avec ou sans réduction de vitesse.

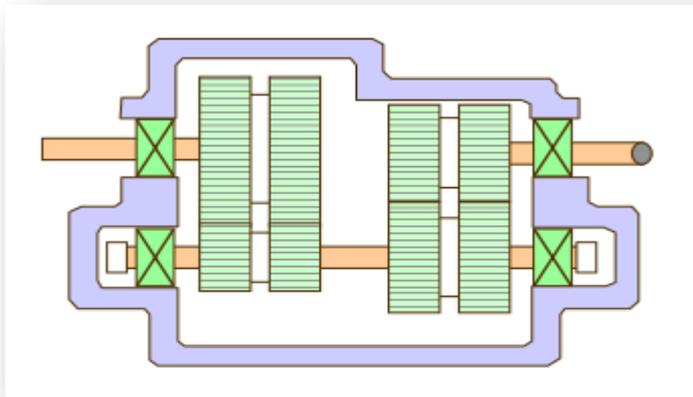


Figure4.1 : Exemple des engrenages d'un réducteur de vitesse

4.1.Outils et appareils de mesure :

Pour collecter les données nécessaires à la mesure et l'analyse, on fait appel aux capteurs dont le rôle est de transformer l'énergie mécanique dispensée par la machine en un signal électrique proportionnel mesurable de manière reproductible.

a. Les Capteurs :

Chapitre 4 : Défauts d'engrenages

Pour collecter les données nécessaires à la mesure et l'analyse, on fait appel aux capteurs dont le rôle est de transformer l'énergie mécanique dispensée par la machine en un signal électrique proportionnel mesurable de manière reproductible.

Il existe plusieurs types de capteurs pour apprécier les mouvements vibratoires. La sensibilité des capteurs représente la proportionnalité de la sortie électrique exploitable (tension, charge, courant) par rapport au paramètre de vibration (accélération, vitesse, déplacement). Elle s'exprime en terme de : sortie électrique / paramètre de vibration.

a.1. Les Caractéristiques d'un capteur :

Un capteur de vibration est caractérisé principalement par :

- **La bande passante** (plage d'utilisation) : plage de fréquences à l'intérieur de laquelle l'amplitude mesurée par le capteur ne dépasse pas une marge d'erreur fixée par le constructeur.
- **La gamme dynamique** (gamme de mesure d'amplitude) : gamme comprise entre la plus petite et la plus grande amplitude acceptée par le capteur.
- **La sensibilité** : relation entre la grandeur électrique délivrée à la sortie du capteur et l'amplitude du mouvement mécanique qui lui donne naissance. Elle est donnée par le constructeur du capteur, généralement sous forme de courbe d'étalonnage qui devra faire l'objet d'une vérification périodique.

a.2. Rôle de capteurs de vibration :

Le rôle des capteurs est de transformer l'énergie mécanique dispensée par la machine en un signal électrique proportionnel mesurable de manière reproductible. Selon le type mesure de vibration Il existe deux grandes familles de capteurs :

- Les absolus : accéléromètre, vélocimétries (capteur de vitesse).
- Les relatifs : proximètres ou sonde de déplacement ou de proximité.

b. Les différents types des capteurs :

Les capteurs les plus couramment utilisés sont :

- L'accéléromètre : mesure d'accélération ;
- Vélocimètre : mesure de vitesse ;

proximètres (la sonde de déplacement): mesure de déplacement.

b.1 Accéléromètre :

b.1.1 Constitution :

Il est constitué principalement d'un matériau piézo-électrique (habituellement une céramique ferroélectrique artificiellement polarisée). Lorsque ce matériau subit une contrainte mécanique, en extension, compression ou cisaillement, il engendre une charge électrique proportionnelle à la force appliquée.

Ces capteurs sont les plus utilisés en raison de leur large gamme de fréquence d'utilisation. Les différents types d'accéléromètres sont destinés :

- Aux mesures axiales ;
- À la surveillance continue ;
- À l'utilisation à haute température ;
- À la mesure des chocs de fortes intensités.

b.1.2 Principe de fonctionnement :

L'élément piézo-électrique délivre une charge électrique, convertie en tension, proportionnelle aux contraintes qu'il subit, et donc à l'accélération locale au point de mesure.

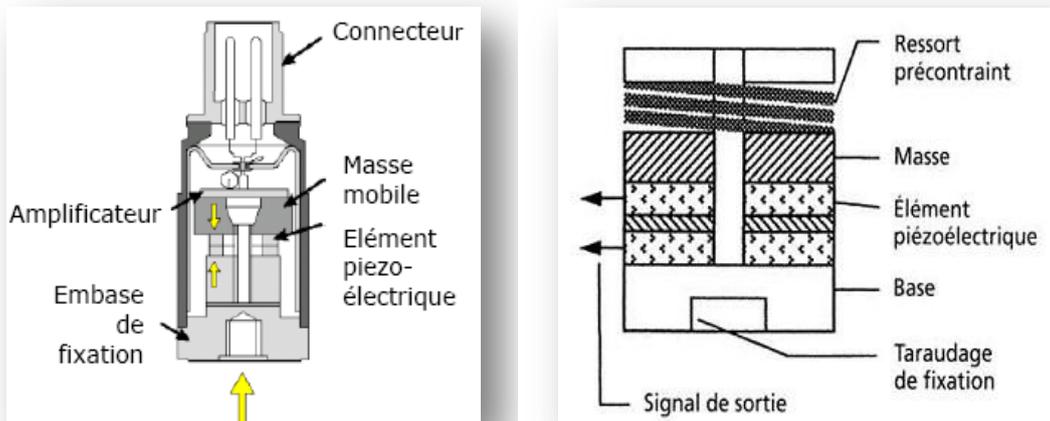


Figure 4.2 : Accéléromètre (capteur piézo-électrique)

b.1.3. La Bande Passante :

Chapitre 4 : Défaits d'engrenages

La bande passante correspond au domaine de fréquences pour lequel la sensibilité du capteur demeure pratiquement constante. Elle est souvent définie à 10% ou à 3dB.

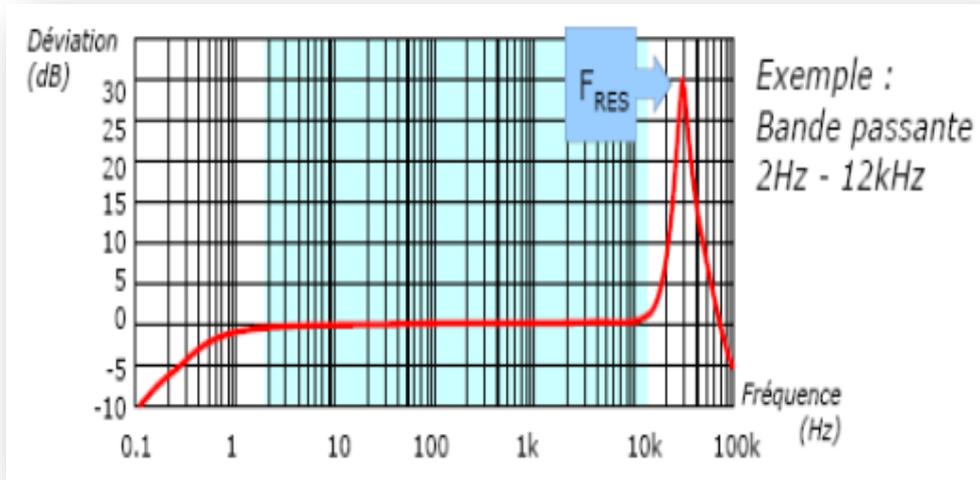


Figure 4.3: La bande passante d'accéléromètre

c. Les points de mesure :

c.1. Localisation :

Les interférences entre vibrations d'origines différentes rendent l'exploitation des relevés très délicate. L'accéléromètre devrait être monté de telle façon que la direction de mesure désirée coïncide avec l'axe de sensibilité principale. Les accéléromètres sont légèrement sensibles aux variations transversales mais ce point peut être négligé puisque la sensibilité transversale est inférieure à 1% de celle de l'axe principale. Si la machine le permet, les mesures se font suivant les trois (03) axes : axial, horizontal et vertical. Les mesures de vibrations sont réalisées au droit des paliers de la machine

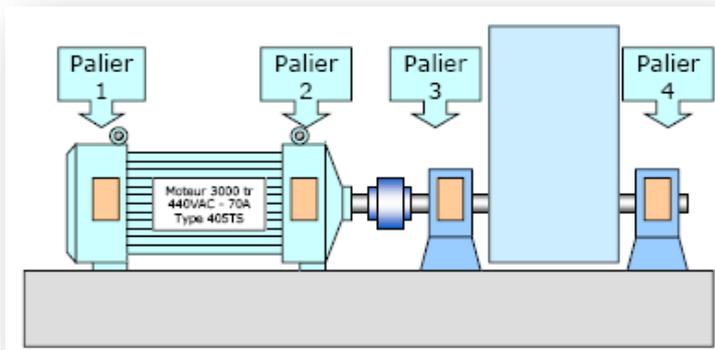


Figure 4.4 : Localisation des points de mesure

Remarque : la numérotation des paliers : la machine entrainante vers la machine entrainée

c.2. Directions des points de mesure :

Les capteurs utilisés mesurent les vibrations selon une direction, généralement confondue avec leur axe de symétrie.

On distingue trois (03) directions de mesure pour un même point de mesure physique : (axiale , verticale, horizontale)

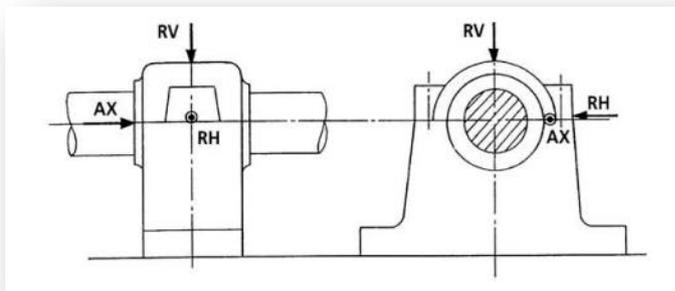


Figure 4.5: Directions des points de mesure

d. Les paramètres de surveillance :

Les paramètres de surveillance sont définis au niveau de la base de données. Ils fixent :

- Les caractéristiques du signal à mesurer : Capteur, grandeur mesurée, type de détection ;
- Le format de l'acquisition : Temporel, spectre, ordre, enveloppe ;
- Les caractéristiques de l'acquisition : Fréquence, taille du bloc, fenêtrage ;

- La nature et les caractéristiques des informations extraites des acquisitions: Amplitudes maxi, moyenne ou RMS, énergie, amplitude à une fréquence donnée, traitement du signal spécifique.

d.1. Le type de capteur :

Le type de capteur utilisé dépend du type de paliers de la machine, l'accéléromètre pour les paliers à roulement et la sonde de déplacement pour les paliers lisses.

d.2. La grandeur mesurée :

Selon le type de capteur utilisé, le signal utile peut être exprimé en :

- Accélération (g) ;
- Vitesse (mm/s) ;
- Déplacement (μm).

d.3. Le type de détection :

Le type de détection doit être clairement identifié parmi :

- L'amplitude crête A_{0-p} : La valeur crête d'une vibration est la valeur maximale prise par la variable $x(t)$ dans l'un des sens positif ou négatif.
- L'amplitude crête à crête A_{p-p} (peak to peak): La valeur crête à crête d'une vibration est la somme des deux valeurs crêtes pour les sens positif et négatif.
- La valeur moyenne A_{moy} ;
- La valeur efficace A_{eff} ou A_{rms} (root mean square) : La détection RMS consiste à calculer la valeur efficace à partir du signal temporel sur une durée T . Elle s'exprime par :

$$A_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) \cdot dt}$$

T = constante de temps, supérieure à la période maximale des principales composantes du signal $a(t)$.

En pratique, on utilise souvent :

- L'amplitude crête à crête A_{p-p} pour les mesures issues de son de déplacement (en déplacement) ;
- La valeur efficace A_{rms} pour les mesures issues d'accéléromètres (en accélération, vitesse ou déplacement).

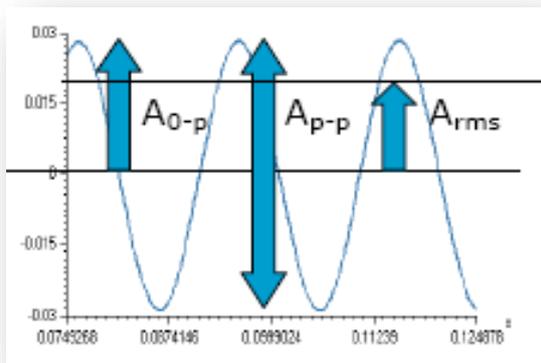


Figure 4.6 : Les types de détection

d.4 Le format de l'acquisition :

Les mesures vibratoires sont stockées dans la base sous forme de fichiers(numériques) horodatés et associés à un point de mesure. Les signaux peuvent être sous deux formes :

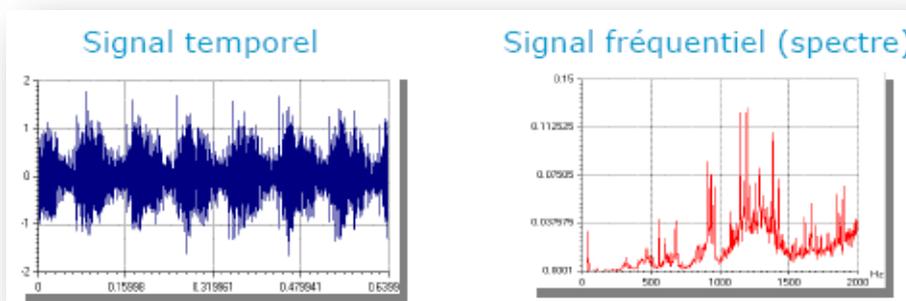


Figure 4.7 :Les formats de l'acquisition

e. Types de surveillance :

On distingue fondamentalement deux types de surveillance :

- Surveillance on-line (**continue**) ;

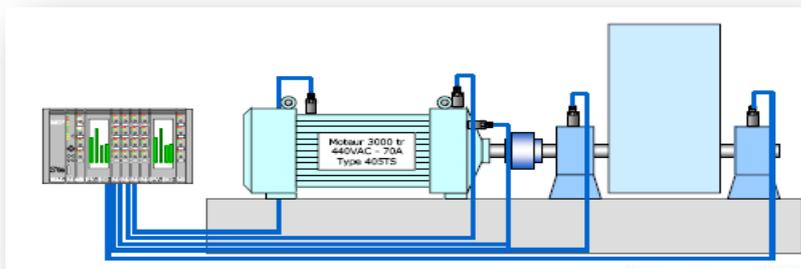


Figure 4. 8 : La surveillance on-line (continue)

- Surveillance off-line (périodique).

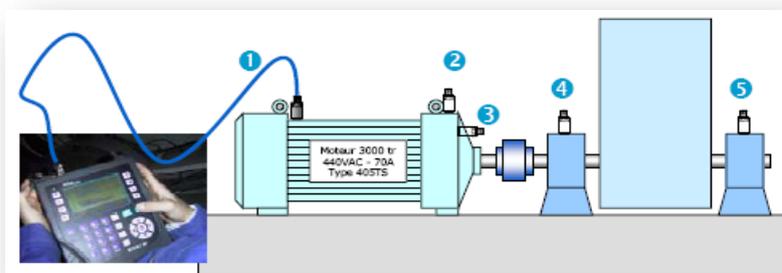


Figure 4.9: La surveillance off-line (périodique) IV.7.1.Dépistage :

Le type de surveillance à appliquer à une machine dépend de plusieurs critères parmi lesquels :

- La criticité de la machine dans le processus ;
- La maintenabilité de la machine ;
- Les conséquences d'une panne en termes de sécurité ;
- La stratégie de l'entreprise.

Selon la complexité de la machine surveillée, selon son caractère stratégique pour la production, selon les défauts que l'on veut suivre et selon la fiabilité désirée, on choisira de :

- suivre les indicateurs de déplacement, vitesse et accélération ;
- suivre la forme spectrale des indicateurs par comparaison avec un gabarit ;
- suivre uniquement les indicateurs spécifiques aux roulements.

f. Stratégie de surveillance :

f.1.Mesure de niveau globale :

Cette stratégie de surveillance consiste à mesurer, à l'aide de capteurs, le niveau global d'un ou de plusieurs indicateurs (déplacements, vitesse ou accélération), à suivre son évolution dans le temps et à le comparer à des normes ou des mesures précédentes. Certes, toute évolution est due à une dégradation de la machine. Cela permet de mettre en évidence l'existence d'une anomalie à un stade précoce et de faire une première idée des types de défauts qui affectent la machine, mais ne permet pas d'établir un diagnostic précis.

La mesure des niveaux globaux des vibrations en termes des indicateurs déplacement, vitesse et accélérations est constatée en :

- **Basse fréquence [0 - 200HZ]** : la mesure de déplacement, les défauts qui peuvent être décelés (balourd, frottement, desserrage,...) ;
- **Moyenne fréquence [0 - 5000HZ]** : la mesure de vitesse, les défauts qui peuvent être décelés (balourd, délignage, choc ...) ;
- **Haute fréquence [0 – 20KHZ]** : généralement pour les défauts qui peuvent être détectés en hautes fréquence, (roulement, engrènement, turbulence ...) la gamme d'analyse accessible exprimée l'accélération de ces défauts.

Niveau global	Domaine de surveillance
Déplacement ($\mu\text{m c/c}$)	Phénomènes lents basses fréquences (balourd, lignage, instabilités de paliers...)
Vitesse (mm/s eff)	Moyennes fréquences (balourd, lignage, instabilités de paliers, cavitation...) Tous types de machines
Accélération (g eff)	Phénomènes très rapides Hautes fréquences (engrenages, roulements, passages d'ailettes, cavitation...)

Tableau 4.1 : Utilisation de niveau global

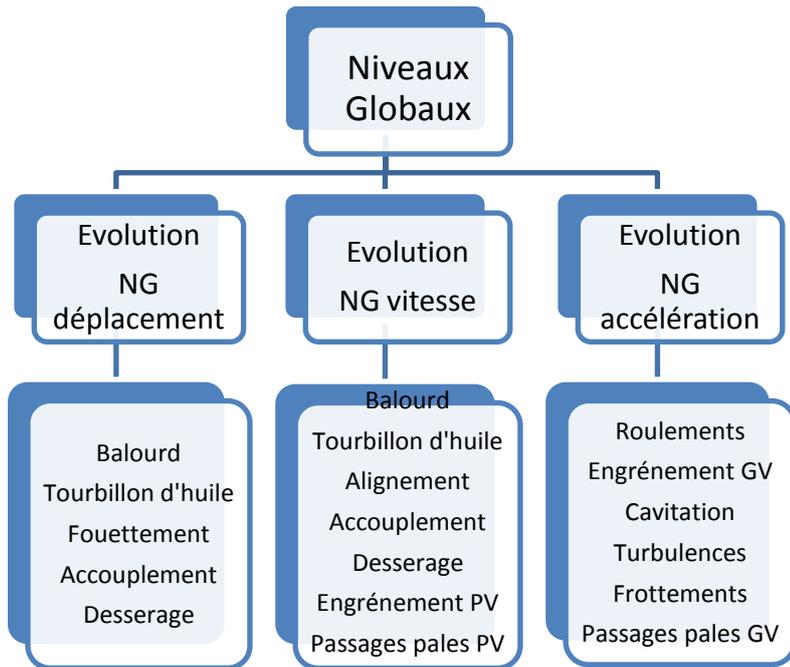


Figure4. 10 : Organigramme d'utilisation de niveaux globaux

f.1.1 Elaboration à partir du signal temporel:

Le résultat de ce traitement est une valeur numérique unique.

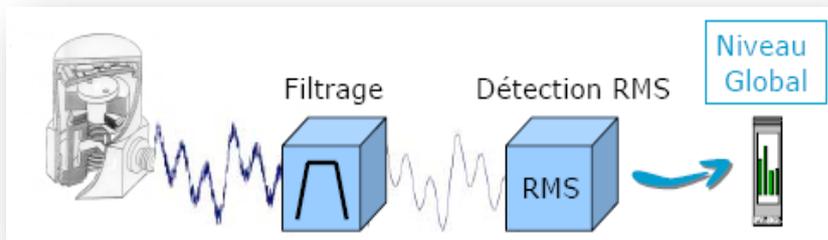


Figure 4. 11 : Elaboration du signal temporel

f.1.2.Elaboration à partir du spectre :

Le niveau global peut aussi être calculé à partir du spectre en fréquence :

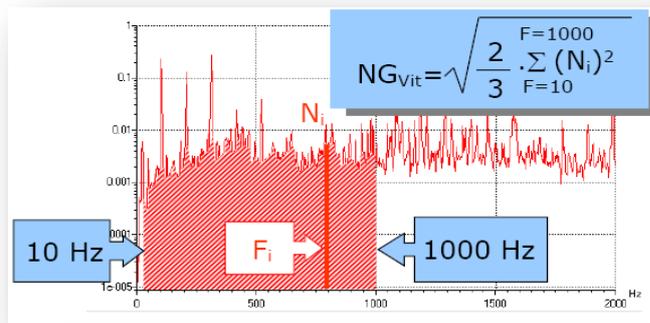


Figure 4.12. : Elaboration du signal en fréquence

Il correspond alors au calcul d'une énergie sur une plage de fréquences correspondant à la grandeur mesurée (ex. : [10-1000] Hz pour le Niveau Global Vitesse).

f.1.3.Niveau d'énergie dans une bande de fréquences :

Il est utilisé pour le suivi des phénomènes aléatoires : Roulements, Cavitation ...

Le niveau d'énergie dans la bande [F_{min},F_{Max}] est donné par :

$$E = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{F_{Max}}{F_{Min}} \cdot \sum (N_i)^2}$$

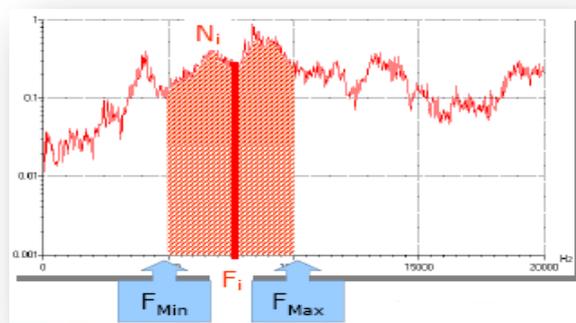


Figure 4. 13 : Niveau d'énergie dans une bande de fréquences

f.1.4.Analyse fréquentielle :

Chaque point de mesure aura donc un certain nombre de paramètres associés selon les défauts recherchés :

- Des raies pour les phénomènes périodiques : Balourd, désalignement, engrènement.
- Des niveaux d'énergie pour les phénomènes aléatoires; Roulements, Cavitation.

f.2. L'interprétation des mesures :

La surveillance consiste à :

- Collecter périodiquement les mesures permettant l'extraction des paramètres ;
- Comparer les valeurs à des seuils prédéfinis ;
- Suivre l'évolution dans le temps des valeurs atteintes pour chacun d'eux (historiques d'évolution) ;
- Interpréter les évolutions et dépassements de seuils (élaboration du diagnostic) ;
- Analyser les spectres et signaux temporels acquis pour affiner ou confirmer le diagnostic.

f.2.1. L'analyse des tendances :

L'analyse dans le temps des courbes d'évolution des paramètres de surveillance fournit des indications précieuses pour le diagnostic.

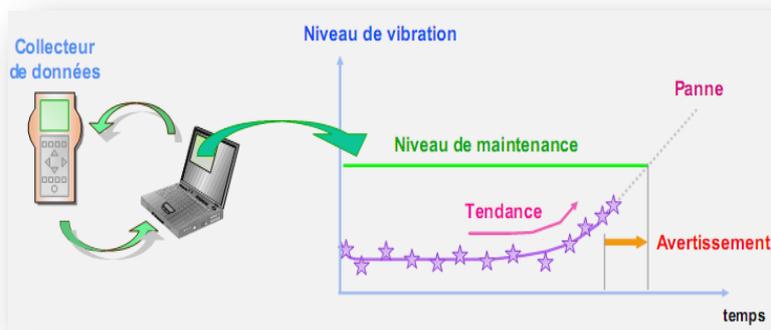


Figure 4.14. l'analyse des tendances

f.2.2. La comparaison aux seuils :

Les seuils prédéfinis sont généralement au nombre de deux :

- Seuil Alarme : indique qu'un changement significatif est intervenu. La machine peut généralement continuer de fonctionner durant la phase d'analyse du problème ;
- Seuil Danger (ou Déclenchement) : niveau au-delà duquel la poursuite du fonctionnement de la machine peut provoquer une avarie. Une intervention pour réduire les vibrations ou arrêter la machine est requise.

f.2.3. La détermination des seuils :

Ils peuvent provenir :

- De normes: ISO -API
- De préconisations du constructeur ;

- D'un état de référence: les valeurs des seuils sont extrapolées des valeurs des paramètres prélevées à un moment où l'état de l'installation était jugé satisfaisant. La méthode d'extrapolation dépend du type de machine et fait grandement appel à l'expérience de l'utilisateur.

f.2.3.1. La détermination des seuils à partir d'un état de référence :

Sur une machine en bon état, fonctionnant en régime stabilisé à sa charge nominale Il faut :

- Faire un relevé I_0 du paramètre dans les conditions de mesure qui seront celles de la surveillance direction, fixation du capteur ;
- Positionner la valeur du seuil Alarme S_{AL} à la valeur la plus faible entre $2 \cdot I_0$ et la valeur « Non Acceptable » donnée par la norme ;
- Positionner la valeur du seuil Danger S_{DG} à la valeur $2,5 \times S_{AL}$.

$$S_{AL} = \text{Min} (2 \cdot I_0 ; \text{la valeur non acceptable de la norme})$$

$$S_{DG} = 2.5 \times S_{AL}$$

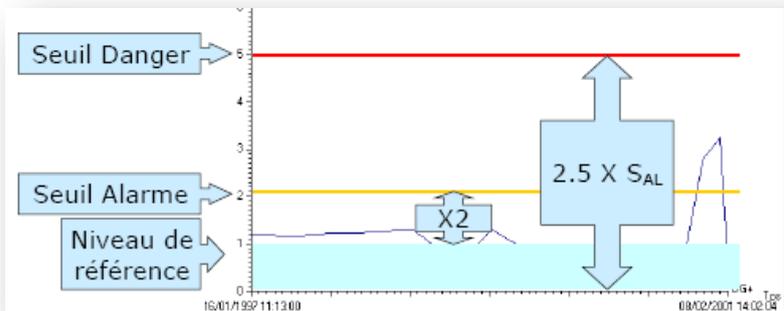


Figure 4.15: détermination des seuils à partir d'un état de référence

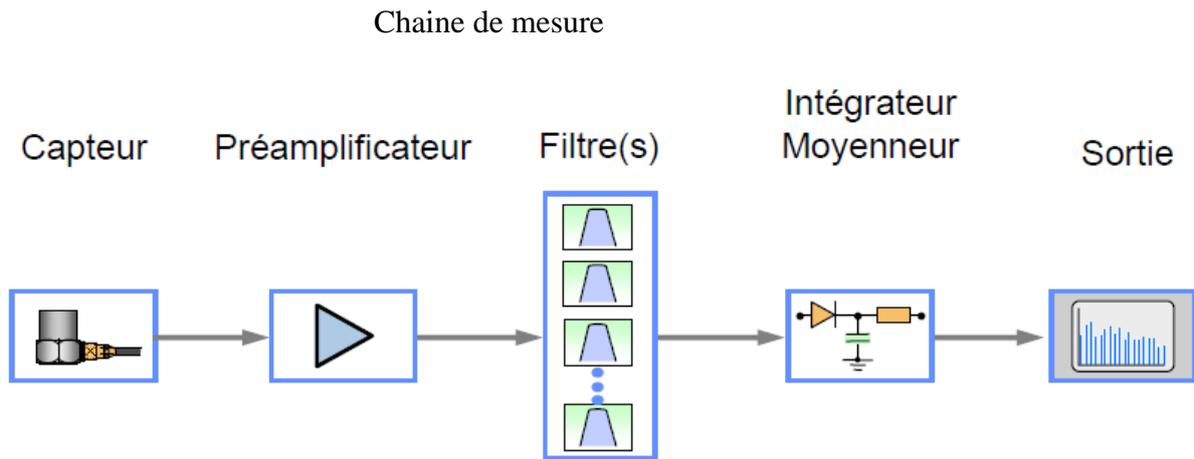


Figure 4.16 : chaîne de mesure

g. Défaits de fabrication

g.1 Défaits de taillage

g.1.1 Excentricité ou erreur de faux-rond

Ce défaut traduit la non-concentricité entre l'axe du cylindre primitif de denture et l'axe de rotation de l'arbre auquel la denture est liée.

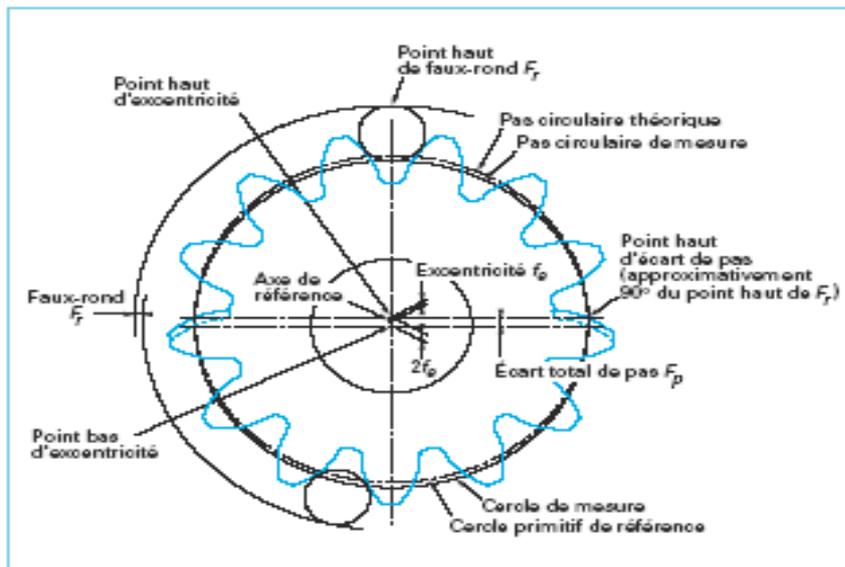


Figure 4.17 : Faux-rond

Il se traduit par l'introduction d'une modulation d'amplitude harmonique à la rotation des arbres sur les signaux d'erreur de transmission et de bruit d'engrènement.

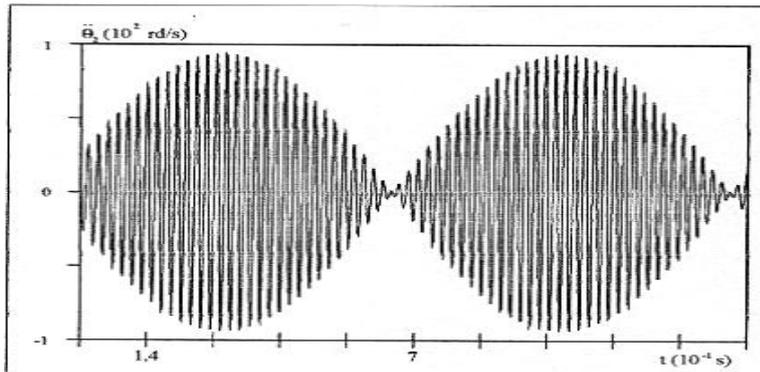


Figure 4.18 : Modulation d'amplitude caractéristique d'un défaut de faux-rond

g.1.2 Les erreurs de pas

L'erreur de pas caractérise le défaut de localisation angulaire d'une dent par rapport à sa position théorique. Deux grandeurs représentatives de la qualité de réalisation d'un engrenage sont associées à cette erreur. Ces grandeurs sont l'erreur de **pas individuelle** et l'erreur de **pas cumulée**.

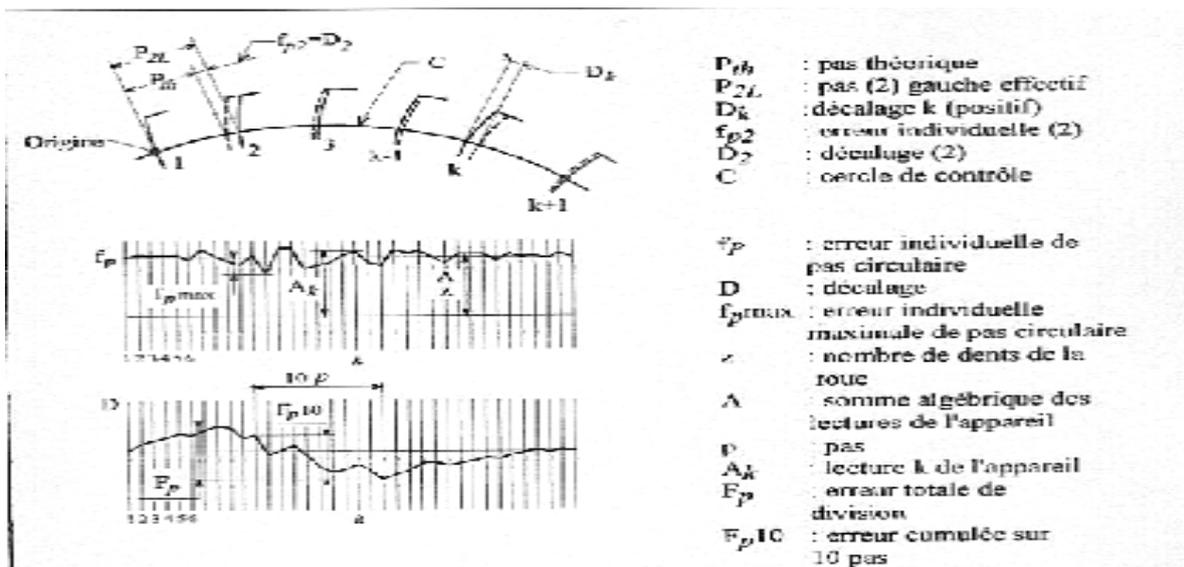


Figure 4.19 : Définition de l'erreur de pas individuelle et de l'erreur de pas cumulée (norme ISO 1328)

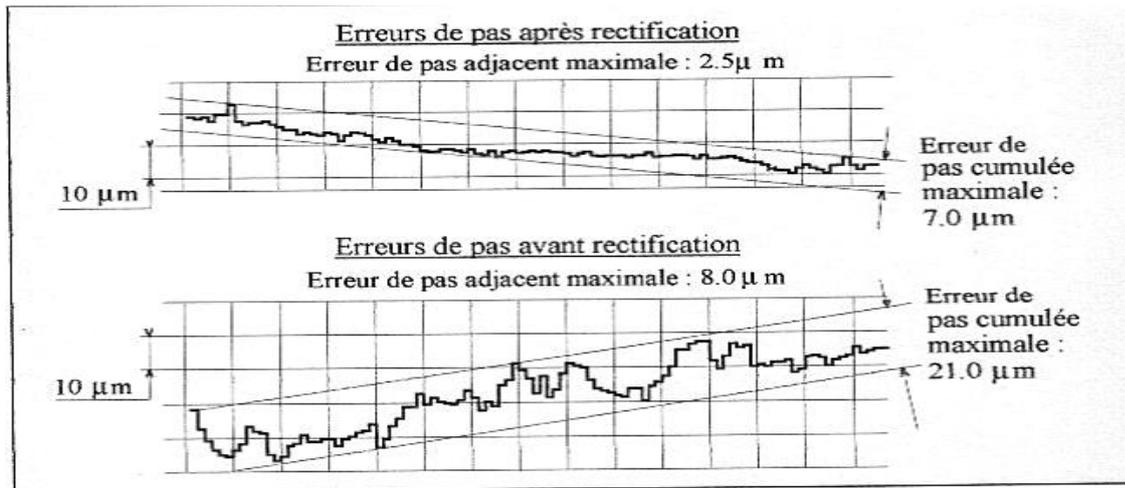


Figure 4.20 : Exemple de mesure de l'erreur de pas cumulée.

g.1.3 Erreurs de profil

Les erreurs de profil sont représentatives des écarts existant entre le profil théorique de la denture et le profil réel. Le profil théorique en développante de cercle, de forme parabolique ou présenter une dépouille s'il a subi une correction volontaire (fig II.5). Ces erreurs peuvent être générées lors de la fabrication ou au cours du fonctionnement par l'usure et la détérioration des profils.

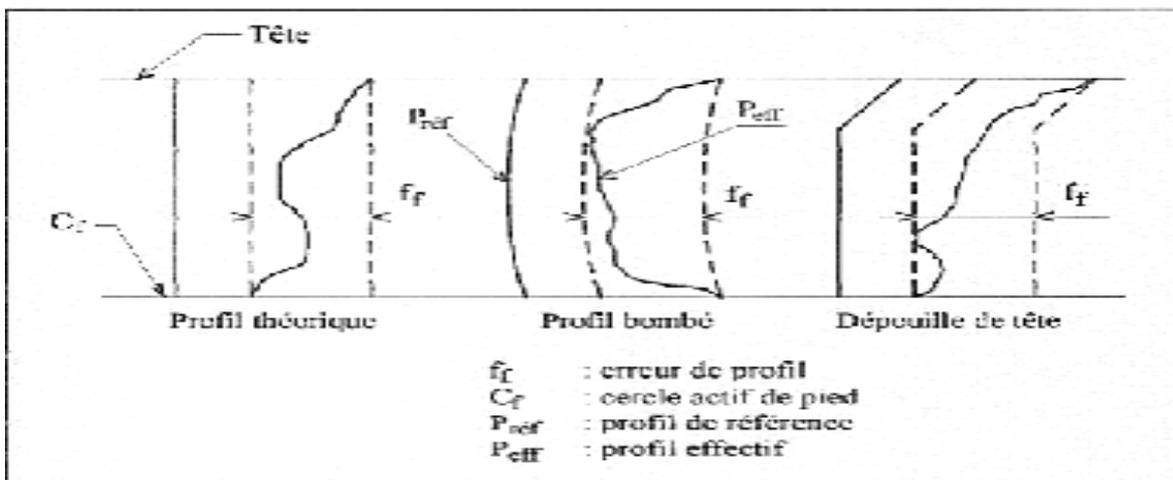


Figure 4.21 : Erreurs de profil, définition tirée de la norme ISO 1328

g.1.4 Erreur de l'épaisseur des dents

g.1.5 Erreurs d'hélice

Les écarts d'hélice sont les quantités dont les hélices effectives s'écartent des hélices de conception. Elles sont mesurées dans la direction des tangentes au cylindre de base, dans le plan apparent [18].

L'hélice de conception est celle qui correspond aux spécifications du dessin. Dans un diagramme, l'hélice non modifiée apparaît comme une ligne droite.

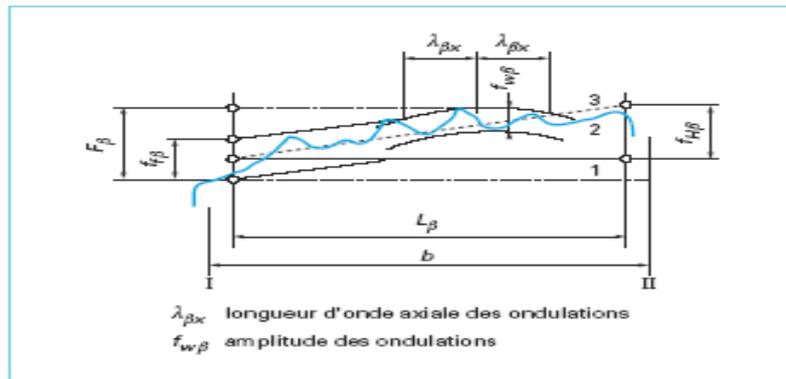


Figure 4.22 : Diagramme de contrôle de l'hélice.

g.2 Défaits de montage

Ces défauts sont généralement sous-estimés alors qu'ils peuvent expliquer les différences de niveau sonore observées sur des transmissions d'architecture absolument identique (série de boîte de vitesse par exemple). L'ensemble de ces défauts caractérise le positionnement relatif des deux roues dentées résultant du montage ou de la déformation de la structure (arbre, palier et carter) lors de l'application de chargement. Ils sont représentés par le défaut d'entraxe et les défauts de parallélisme entre les axes des roues.

g.2.1 Défaut d'entraxe

Différence, positive ou négative, entre la distance des deux axes et l'entraxe théorique de fonctionnement, mesuré dans le plan perpendiculaire à l'axe de la plus grande roue, passant par le milieu de la largeur de denture.

L'entraxe est un paramètre particulièrement important. Il agit directement sur le jeu de fonctionnement et modifie la géométrie du contact (localisation des points de contact).

g.2.2 Défaits d'inclinaison et de déviation

La norme caractérise les défauts d'alignement par deux angles appelés **angle d'inclinaison** et **angle de déviation**. L'angle d'inclinaison est associé à une rotation dans le plan des axes, et l'angle de déviation conduit à une délocalisation latérale des portées de denture.

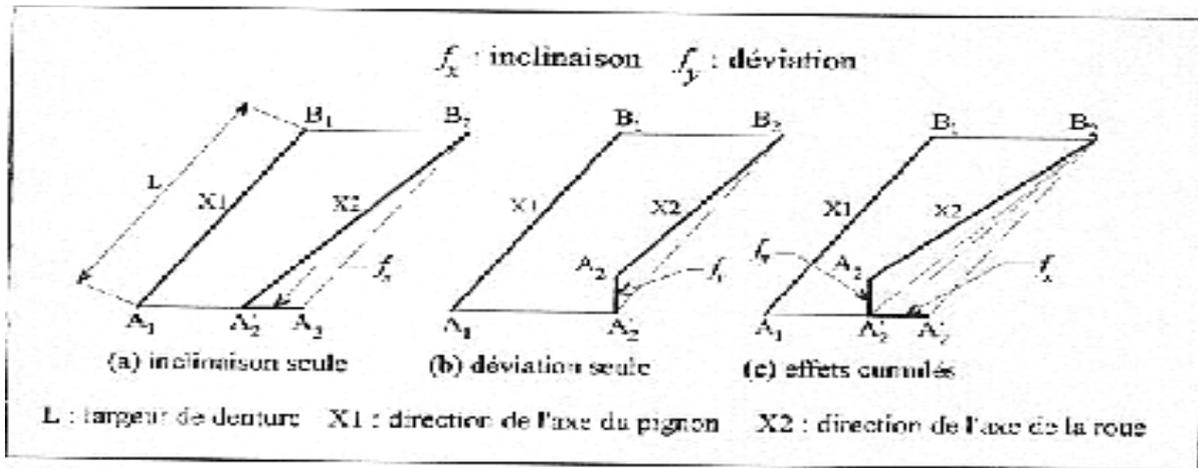


Figure 4.23 : Définition des défauts d'inclinaison et de déviation selon la norme ISO 1328

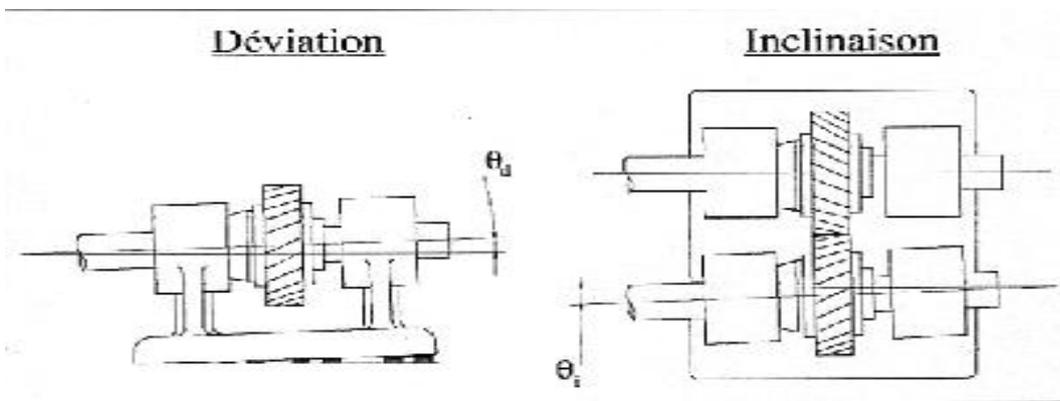


Figure 4.24 : Caractérisation des défauts de déviation et d'inclinaison.

g.3 Défauts de rectification

La figure g.3 indique le décrochement qui se produirait inévitablement au pied des dents si un outil de taillage à protubérance n'est pas utilisé.

L'outil à protubérance a comme avantage complémentaire de permettre l'utilisation du fond des dents brut de cémentation : ce traitement introduit une pré compression superficielle très bénéfique pour la tenue des dents à la fatigue de flexion. Une rectification du fond des dents serait néfaste, car elle introduirait une contrainte de tension superficielle défavorable sur la tenue des dents à la fatigue de flexion.

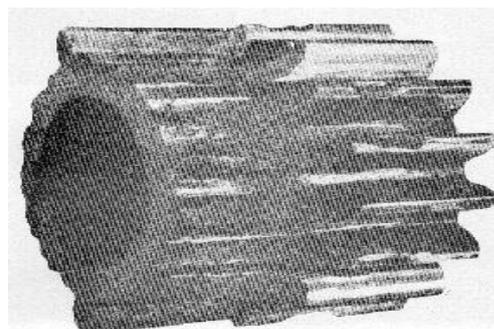


Figure 4.25 : Rupture par fatigue

g.4 Défauts de traitement thermique

Le traitement thermique peut occasionner des criques qu'il faut absolument bannir car elles constituent des amorces de fissures. Dans la trempe superficielle à la flamme ou par induction, il faut éviter la trempe des flancs seuls (c'est-à-dire sans traitement du fond des dents) : il résulterait une discontinuité de structure dans la zone du pied des dents soumises aux contraintes maximum de flexion.

g.4.1. Pelage

Il est dû à une oxydation lors du traitement thermique. Il apparaît après fonctionnement une surface inégale comportant des zones en léger relief, très irrégulières, qui supportent les charges et prennent vite un aspect brillant. La portée des dentures est alors mauvaise.

g.4.2. Dislocation de la couche traitée

C'est une avarie très grave typique des engrenages traités en surface qu'elle met immédiatement hors service. Comme pour l'écaillage, les fissures naissent en sous-couche, avant que des fragments de métal soient éliminés sous forme de grosses écailles. C'est en fait toute la couche traitée qui se trouve rapidement décollée d'un substrat de résistance insuffisante.

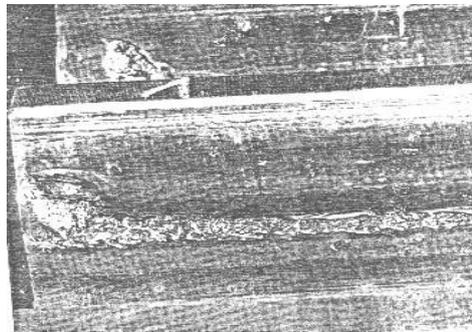


Figure 4.26 : Cassures par écaillage

g.5 Défauts de fonctionnement

g.5.1 Défauts de lubrification

La lubrification est l'un des problèmes le plus important et le plus délicats qui puissent se poser pour le bon fonctionnement des engrenages.

La lubrification à un triple but :

1. Eviter le contact métal sur métal qui pourrait provoquer, au bout d'un temps très court, une sorte de soudage des dentures conjuguées. Nous savons en effet que les conditions de glissement et de pression superficielle sont souvent très sévères dans les engrenages. Il est donc nécessaire d'interposer un film d'huile résistant entre les dentures conjuguées. Il ne faut pas perdre de vue que le soudage peut se produire à des températures bien au dessous

du point de fusion du métal si la pression de contact est élevée.

2. la lubrification s'impose également pour la question du rendement de l'engrenage. Un frottement métal sur métal entraînerait un coefficient de frottement beaucoup plus élevé.

3. Une autre fonction importante du lubrifiant consiste à absorber la chaleur dégagée durant l'engrènement (la perte de rendement est en effet matérialisée par un dégagement de chaleur). Un volume d'huile souvent important est nécessaire pour éviter un échauffement anormal de l'engrenage.

La lubrification est une source des différentes détériorations superficielles des dentures :

g.5.2 L'usure

L'usure est un ensemble complexe de phénomènes difficiles à interpréter, amenant une émission de débris avec perte de masse, de cote, de forme, et s'accompagnant de transformations physiques et chimiques des surfaces. C'est un phénomène local caractérisé par un enlèvement de matière dû au glissement de deux surfaces l'une sur l'autre (fig II.22).

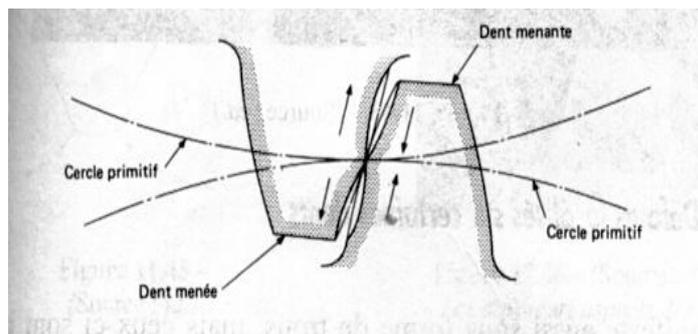


Figure 4.27 : Usure des dentures après fonctionnement

Selon la valeur de la charge et de la vitesse de glissement en chaque point de contact des surfaces actives, l'usure se développe plus ou moins rapidement.

g.5.3 Le grippage

Grippage localisé (arrachements)

Il correspond à des arrachements ou des adhérences qui modifient soudain l'état d'une petite partie de la surface des dents, 5 % par exemple. Il concerne souvent les dentures neuves ou dans l'état de poli-miroir et il peut disparaître à la longue.

Les causes de ce phénomène sont multiples : imperfection d'usinage, défaut d'alignement des dentures, déformation en charge, passage d'une particule étrangère dans la denture, surcharge brutale, défaut temporaire de lubrification. Dans tous les cas il y a surcharge locale, rupture du film d'huile et formation d'une microsoudure immédiatement cisailée.

Il est parfois possible de « réparer » les dentures pas trop sévèrement grippées en les faisant fonctionner quelque temps avec une graisse de rodage appropriée.

Grippage généralisé

C'est une avarie très brutale attribuée à une rupture du film lubrifiant par suite de températures de surface trop élevées. Sa gravité a accéléré le développement des additifs extrême pression. Il est reconnaissable au fait que le cisaillement des microsoudures amène des transferts de métal d'une denture sur l'autre, ou l'émission de débris.

Le grippage généralisé est une usure catastrophique qui détruit typiquement les dentures non traitées, de gros module, fonctionnant à des vitesses faibles. Il produit une modification soudaine de la surface de toutes les dents: sur des engrenages durcis, on note un changement de coloration et de fines rayures, à ne pas confondre avec une usure abrasive, car il y a peu de perte de cote.

On distingue en fait deux sortes de phénomènes :

Le **grippage à chaud** est lié à une rupture de film d'huile par échauffement excessif. Les traces sont généralement plus importantes dans les zones à forte vitesse de glissement. Tant que ces traces restent fines et peu profondes, elles peuvent être tolérées car elles finiront par s'amenuiser avec le temps. Si elles sont au contraire grossières, elles évolueront vers des arrachements et généralement, à court terme, vers la rupture des dents. Ces dernières prennent des teintes caractéristiques brunes, bleues ou violacées.

Le **grippage à froid** résulte de pressions de contact très élevées accompagnées de vitesses de glissement extrêmement faibles. Le désastre commence par quelques arrachements plus ou moins localisés qui ne tardent pas à se propager de proche en proche à toute la périphérie de la denture. La destruction totale peut se produire en quelques minutes. Le grippage à froid est très souvent associé à un manque de lubrifiant et se produit le plus souvent sur des dentures lubrifiées à la graisse. Il est favorisé aussi par un état de surface médiocre, qui facilite la formation des microsoudures et le développement du grippage en profondeur.

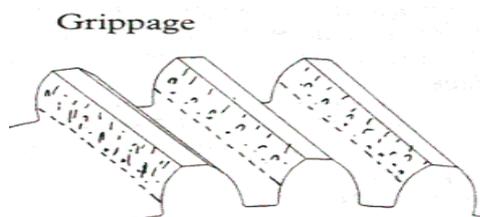


Figure 4.28 : Grippage

g.5.4 Les piqûres

Ce phénomène est caractérisé par l'apparition sur toute la surface active des dents de petits trous peu profonds en forme d'éventail dont la pointe est tournée vers le pied des dents

motrices ou vers le sommet des dents menées. La taille de ces trous est de 0.3 à 2 mm tandis que la profondeur est de l'ordre de 0.1 mm. C'est une avarie qui se produit surtout dans les engrenages en acier de construction relativement peu dur.

On peut y remédier en utilisant un lubrifiant à viscosité élevée. Le profil de la dent se perturbe, la surface active devient irrégulière, les charges dynamiques augmentent, la transmission s'échauffe et le bruit s'amplifie.

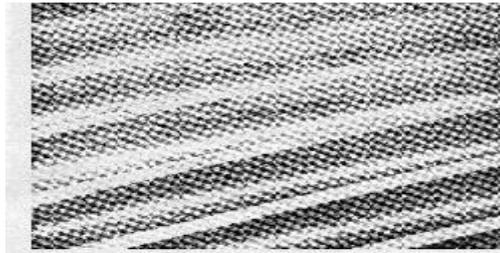


Figure 4.29 : Piqûres des dents

g.6 Autres défaillances observées sur les dentures

g.6.1 Ecaillage

Contrairement aux piqûres, l'écaillage se manifeste par l'apparition de trous beaucoup moins nombreux, plus profonds et plus étendus. L'écaillage affecte les surfaces actives cémentées. La couche de cémentation confère à l'engrenage une dureté superficielle accrue et élimine ainsi le phénomène d'usure. L'écaillage résulte de l'action des forces de frottement sur les dents en acier très chargées.

On peut y remédier en limitant la pression superficielle.

Cette avarie est beaucoup plus fréquente sur des dentures traitées superficiellement par cémentation ou par trempe superficielle que sur celles qui sont traitées à cœur. On distingue facilement les piqûres des trous provoqués par l'écaillage : les premières ont des parois en pente plus ou moins douce, les seconds sont limités par des « falaises » à angle vifs, sur toute leur périphérie.

La cause la plus fréquente de l'écaillage est une surcharge de longue durée et/ou une profondeur de traitement insuffisante : on sait que la couche traitée devrait avoir une épaisseur telle qu'elle dépasse de 50 à 100 % la profondeur à laquelle se produisent les contraintes maximales de cisaillement.

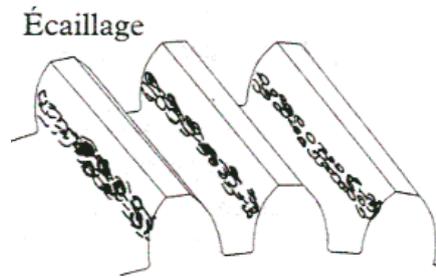


Figure 4.30 : Ecaillage

g.6.2 Fissuration

Ce défaut apparaît dans les dentures en aciers fins durcis par traitement thermique et qui sont sensibles aux concentrations de contraintes.

L'apparition des fissures est la conséquence d'une contrainte au pied de la dent qui dépasse la limite de fatigue du matériau et généralement elle se trouve du côté de la dent sollicitée à l'extension. Elle progresse à chaque mise en charge de la dent.



Figure 4.31 : Fissuration au pied de la dent

g.6.3 La rupture par fatigue

Comme tous les phénomènes de fatigue, c'est une dégradation progressive. Contrairement aux autres formes d'usure, celle-ci concerne les engrenages bien lubrifiés.

Les endommagements peuvent rester longtemps cachés avant de se manifester brutalement, ou bien se révéler de façon spectaculaire et précoce.

Il y a donc diverses formes possibles, que nous allons passer en revue et on distingue :

La fatigue superficielle par écrouissage qui est due aux contraintes maximales de traction ou de compression, le premier signe visible est une apparence brunie, un éclat lustré du métal et la disparition des marques d'usinage.

La fatigue profonde après un long temps de vieillissement se produit une émission brutale de particule dans la surface atteint quelques mm², la profondeur quelques dixième de mm, et dont la taille est sans rapport avec la structure du métal. L'usure s'étend par le bord des zones écaillées, découvrant progressivement les sous-couches dont l'aspect est poli. La rupture des

dents est due essentiellement à la fatigue car chaque amorçage de l'engrènement produit à la racine de la dent des contraintes de flexion alternatives à allure périodique (fig II.27).

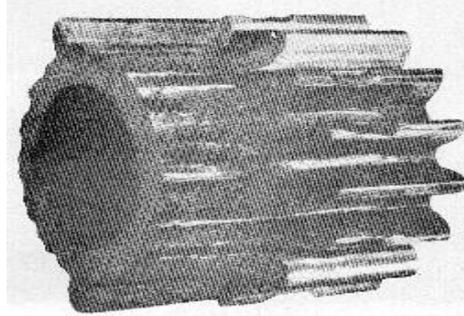


Figure 4.32 : Rupture par fatigue

g.7 Corrosion

g.7.1 Corrosion chimique

Elles provoquent des taches de couleur brune rouge, des irrégularités de surface, des piqûres souvent foisonnantes, plus ou moins bien réparties sur tout ou partie des zones exposées. Il s'agit évidemment d'attaques chimiques ou électrochimiques.

Souvent, cette attaque résulte de produits contaminants introduits dans le carter, mais très fréquemment elle est due à la présence d'eau amenée par des fuites ou par la condensation. Le lubrifiant peut lui aussi être incriminé, pour diverses raisons :

- acidification due au vieillissement,
- présence d'additive extrême pression trop agressive,
- activation de ces additifs par la présence d'eau ou par une température excessive.

g.7.2 Corrosion de contact

Elle concerne :

- d'une part les dentures ordinaires soumises, pendant le transport ou l'arrêt, à des vibrations d'origine extérieure,
- d'autre part les accouplements à denture soumis, avec une protection insuffisante, à des vibrations de torsion ou à de petits mouvements dus au désalignement.

g.7.3 Surchauffe :

Elles résultent d'un échauffement anormal consécutif à une surcharge, une survitesse, un défaut de lubrification. Les plages colorées que l'on constate ne doivent pas être confondues avec le résultat d'une oxydation ou d'une corrosion. La chute des caractéristiques mécaniques favorise l'apparition du grippage et dans les cas les plus graves, elle peut conduire à un écrasement de la denture par fluage à chaud.

g.7.4 Erosion par cavitation :

L'érosion par cavitation peut se manifester au niveau des dentures lorsque celles-ci se meuvent perpendiculairement à leur surface. Un tel mouvement se produit lors de l'engrènement sous l'effet de vibrations. Il en résulte une alternance de surpressions et de dépressions au sein du lubrifiant.

g.7.5 Etincelage :

Il est caractérisé par la formation d'une multitude de petits cratères résultant du passage intempestif d'un courant électrique, cratères qu'il ne faut pas confondre avec des piqûres provoquées par la fatigue des couches superficielles. Les traces sont ici en forme de cupules présentant, juste après leur formation, un rebord provenant de l'éjection du métal fondu.

h- Spectres de quelques défauts simulés :

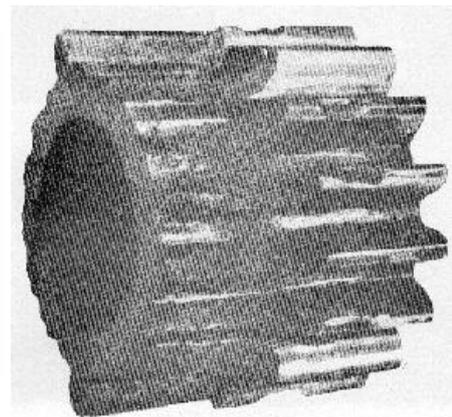
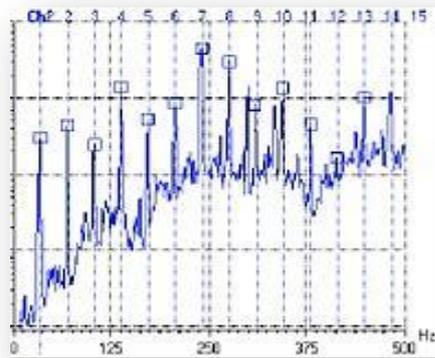


Figure 4.33 : Spectre typologique des ruptures des dents.

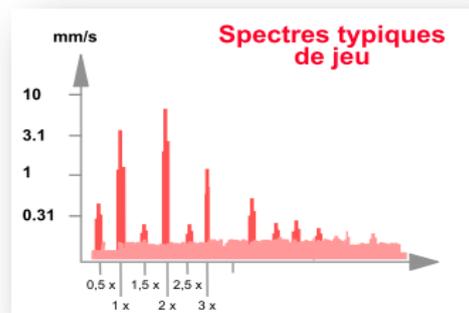
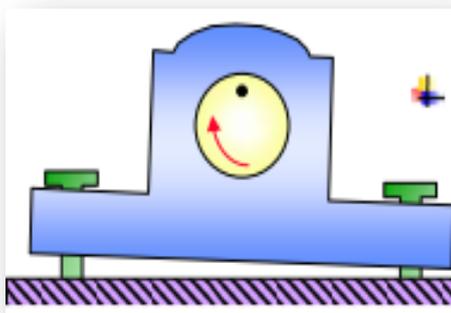


Figure 4.34 : Jeu de fondation et leur spectre typologique

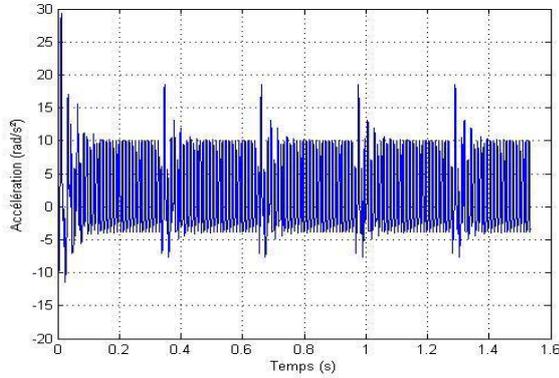


Figure 4.35: spectre de fissure de dents

La propagation de la fissure se traduit ici par une réduction de la rigidité de la dent fissurée et fait apparaître des pics périodiques (chocs) de plus en plus important dans le signal vibratoire.

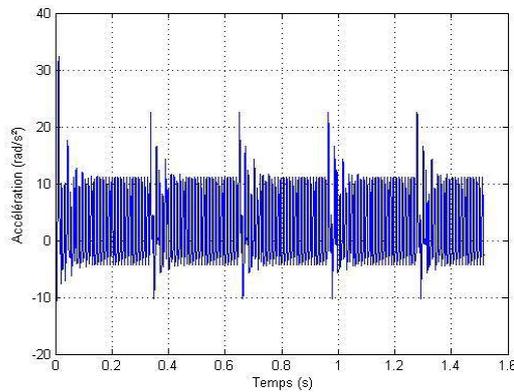


Figure 4.36 : spectre de pique de dents

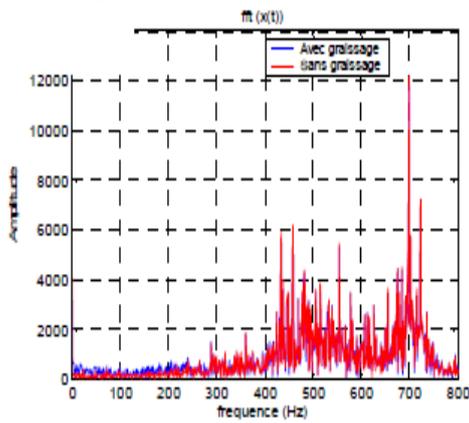


Figure 4.37: spectre d'écaillage de dents

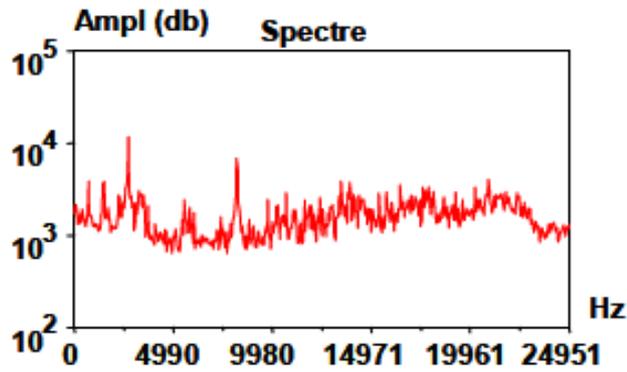


Figure 4.38 : Spectre du défaut réparti d'engrenage

La rigidité de contact entre les dents est évaluée avec la théorie de Hertz pour le contact de deux cylindres.

$$K_{\text{Hertz}} = F \cdot \pi \left\{ \left(\frac{(1 - \nu_p^2)}{E_p} + \frac{(1 - \nu_r^2)}{E_r} \right) \cdot \ln \left(\frac{4\pi \cdot F \left[\frac{1}{\rho_p} + \frac{1}{\rho_r} \right]^{-1}}{F_n \left(\frac{(1 - \nu_p^2)}{E_p} + \frac{(1 - \nu_r^2)}{E_r} \right)} \right) - 1 \right\}^{-1}$$

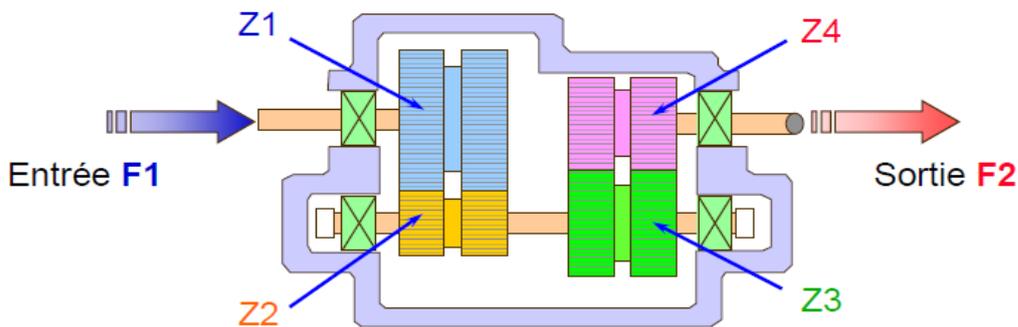
où

F représente la largeur de denture

μ le coefficient de poisson

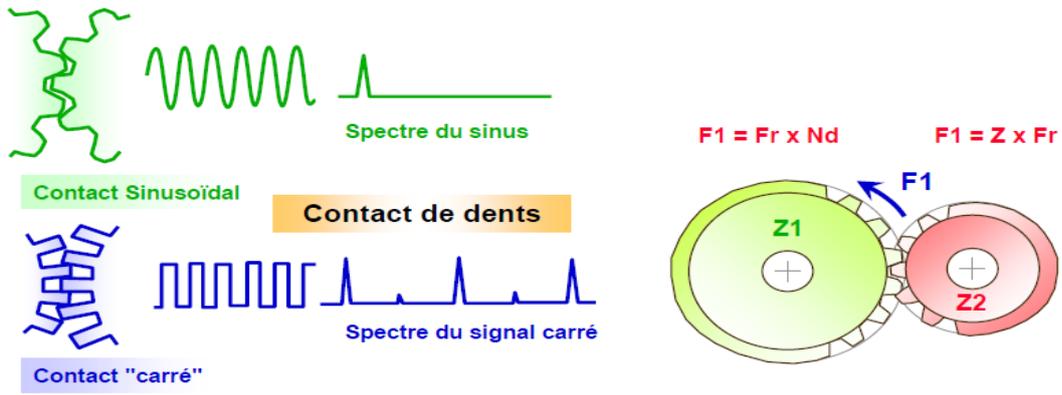
E le module élastique.

ρ représente le rayon de courbure instantané de la dent.

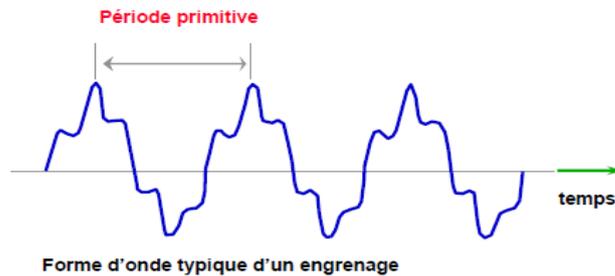
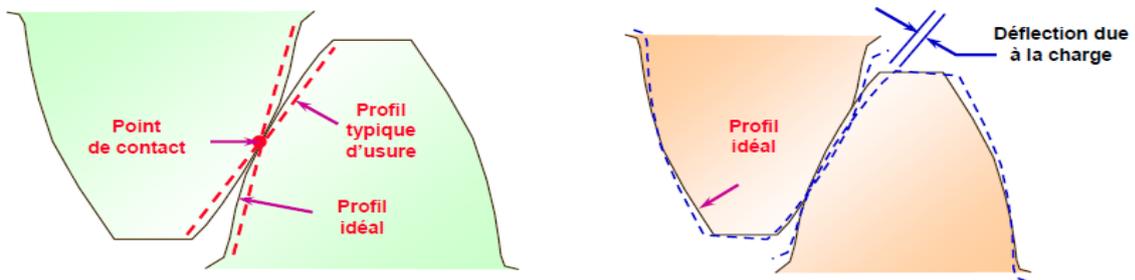


$$\text{Rapport de multiplication} = F2 / F1 = Z1 \cdot Z3 / Z2 \cdot Z4$$

Chapitre 4 : Défaits d'engrenages

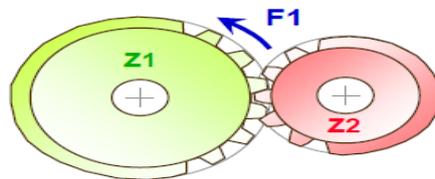


Comportement des engrenages :



Fréquence de coïncidence

- ◆ $F_c = F_e / PPCM (Z1, Z2)$
- ◆ 2 dents données se retrouvent à nouveau en contact



Fréquence fantôme



- Erreur sur la roue guide (n_2 dents) transférée à l'engrenage taillé (n_1 dents).
- Due à l'outil de taillage/rectification des dents.
- F_e^f correspondant aux dents n_1 et n_2 , elle diminue avec le rodage.

Défauts des engrenages :

Sources de vibrations | des engrenages :

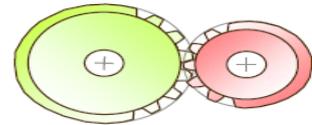
- Flexion des dents due à la charge.
- Usure régulière, uniforme de la denture.
- Phénomènes locaux (dent fissurée...).

Ces vibrations affectent la fréquence d'engrènement « F_e » :

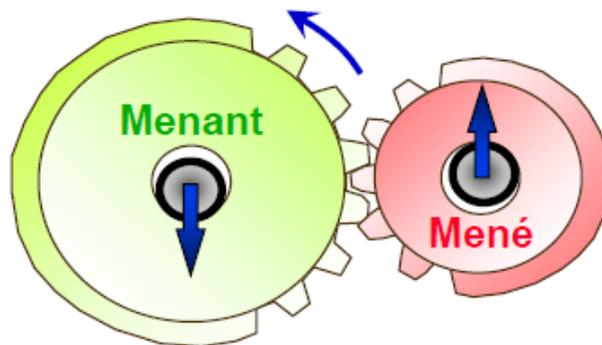
$$F_e = \text{Nombre de dents} \times F_{\text{rot}}$$

et ses harmoniques

bandes latérales (modulation)

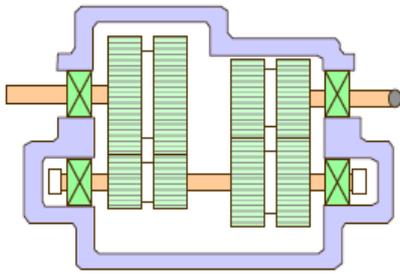


Effet de Couple



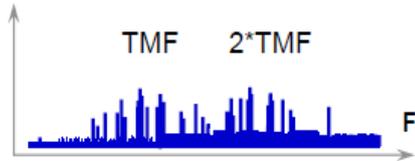
Pour des faibles charges, le pignon de petite masse est entraîné vers le haut, dans une position de fonctionnement inhabituelle.

Le poids et le couple se combinent parfois pour donner des vibrations d'arbre excessives et instables.



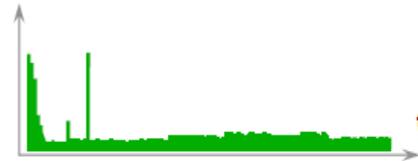
Les réducteurs produisent des spectres complexes

L'analyse de cepstre et le moyennage dans le temps simplifient grandement la tâche d'expertise des défauts d'engrenages.



Spectre d'engrenage :

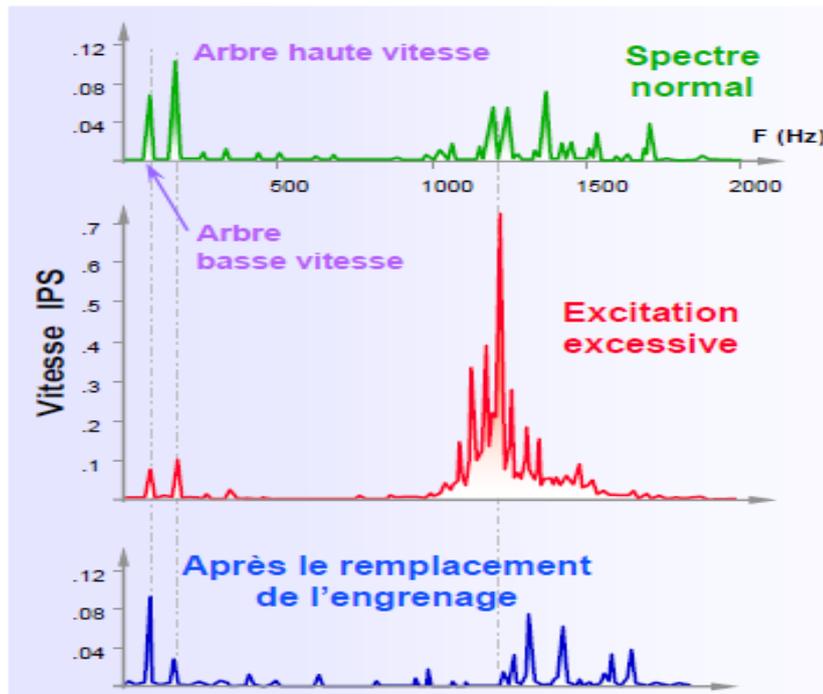
- Les défauts produisent des familles de bandes latérales autour de la fréquence d'engrènement (TMF) et de ces harmoniques.



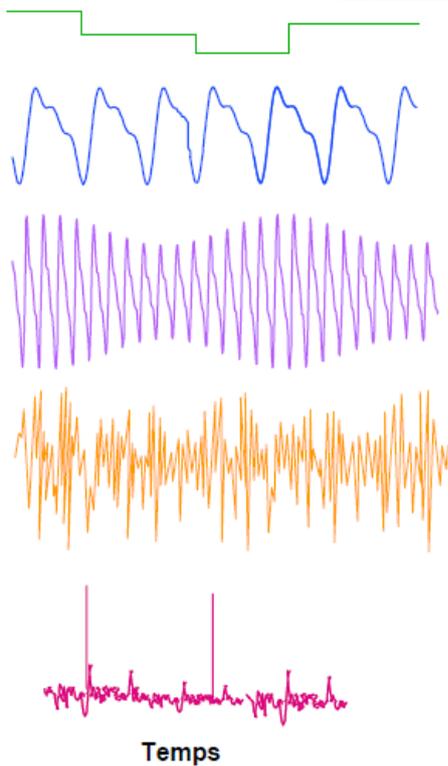
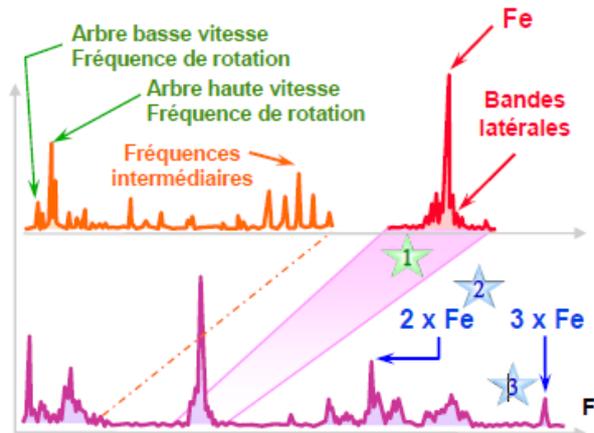
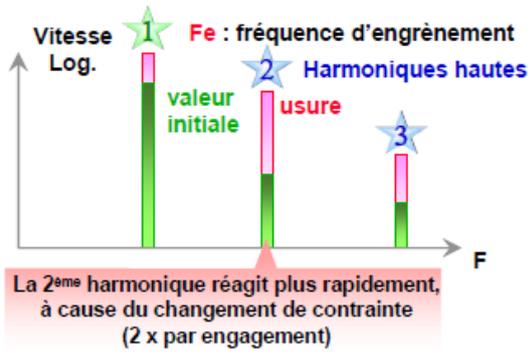
Cepstre d'engrenage :

- L'énergie de chaque famille de bandes latérales (défaut) est facilement repérable.

Spectre d'engrenage marqué



Chapitre 4 : Défaits d'engrenages



Semi-statiques

- Position de l'arbre

Harmoniques

- Balourd
- Délignement

Modulés en amplitude en fréquence

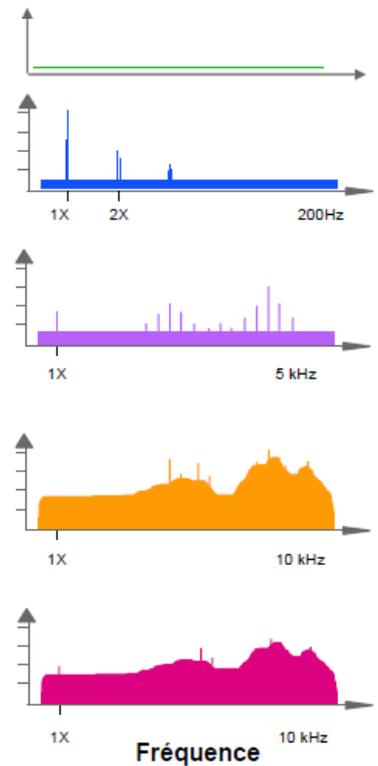
- Excentricité
- Torsion
- Flexion de denture

Aléatoires

- Lubrification
- Roulements
- Montage palier
- Excitation fluide

Pulsés, impulsionnels

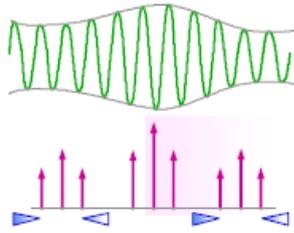
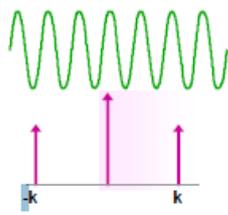
- Usure roulement
- Frottement
- Aubages, saletés
- Défaut local de denture



Modulation en amplitude :

Chapitre 4 : Défaits d'engrenages

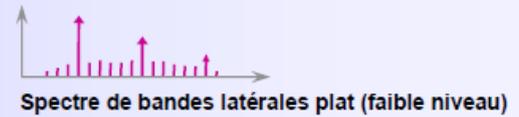
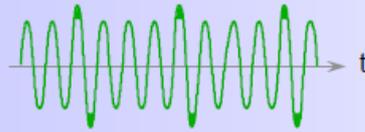
Signal d'engrènement



modulation d'amplitude (sensibilité à la charge)

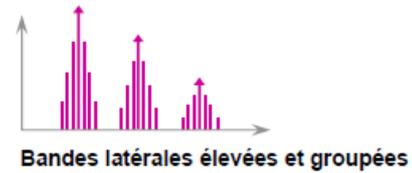
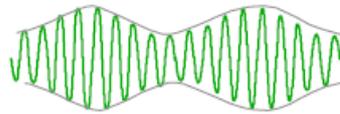
convolutions à V arbre (entrée-sortie) en défaut

Défaut localisé

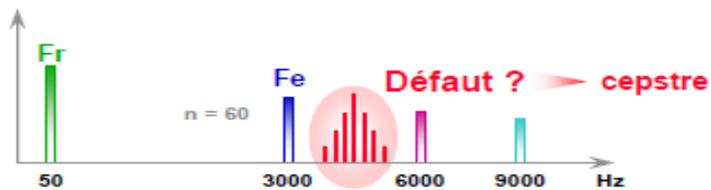


Spectre de bandes latérales plat (faible niveau)

Défaut distribué



Bandes latérales élevées et groupées

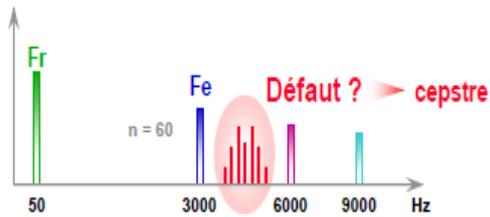


■ Modulation en amplitude :

- Excentricité
- Espacement entre les dents variant périodiquement
- **Charge fluctuante**

Bandes latérales : Zoom + Cepstre (2515, 2526)

Modulation en fréquence :



● **Modulation en fréquence :**

➤ **Vitesse** angulaire variable

➤ Espacement entre les dents variable

● **Modulation de phase :**

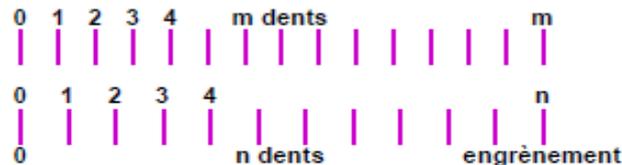
Démodulation de phase (3550)

Signal engrenement

Une modulation par une fréquence unique F^m résultera en toute une famille de bandes latérales avec un espacement $= F^m$.

La structure des bandes latérales est donnée par le Rapport de déviation $\angle F / F^m$.

Établissement de la fréquence d'engrènement



La fréquence d'engrènement est généralement la 1^{ère} fréquence qui est un harmonique des deux vitesses d'arbre.

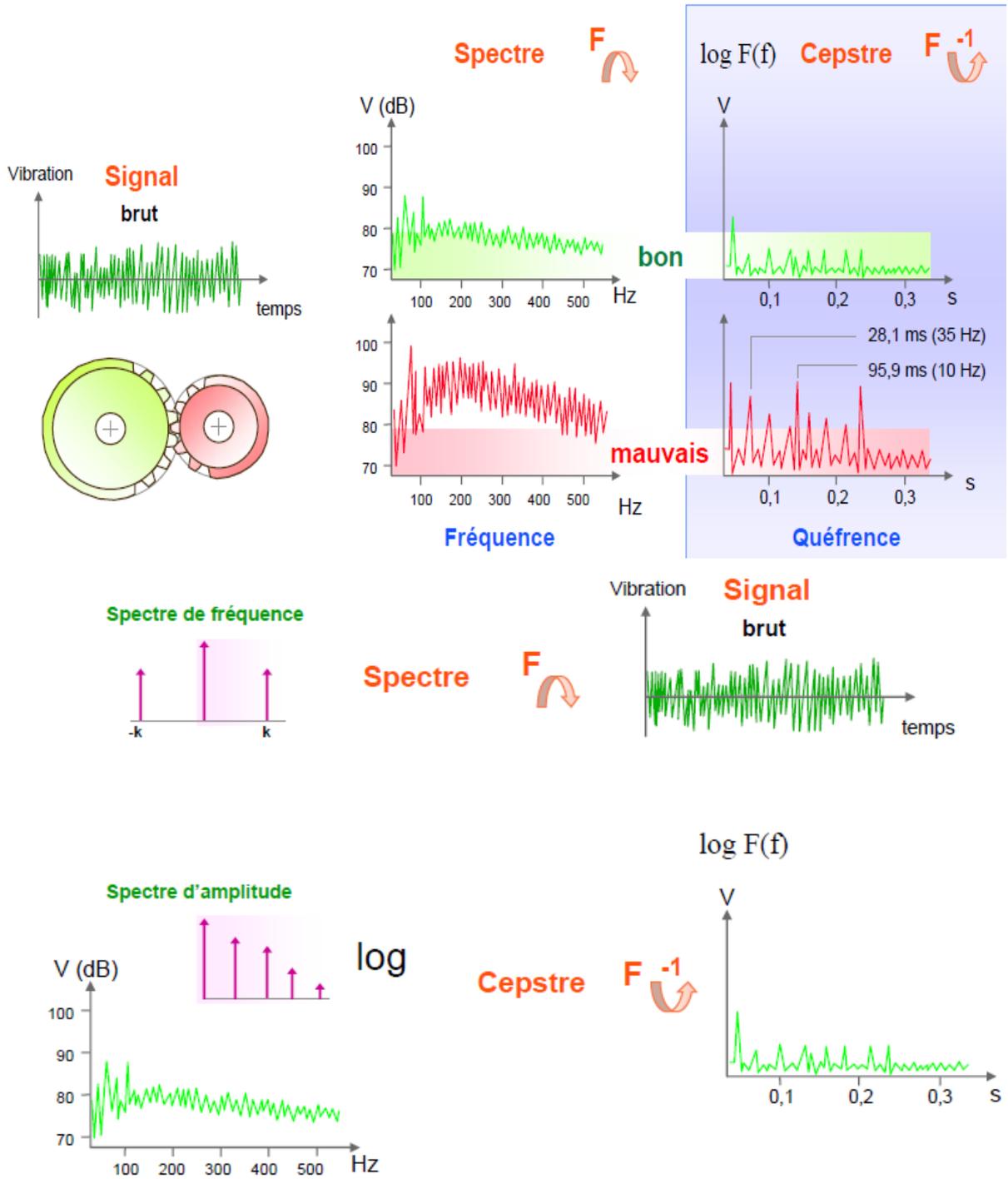
Précision du curseur d'harmonique ~ 1:20.000

Espacement le plus proche des autres harmoniques = $1 / m \times n$.

Distinction des défauts d'engrenage et de roulement

- Les défauts d'engrenages apparaissent aux fréquences harmoniques exactes des vitesses des roues dentées (sauf pour planétaire).
- Les défauts de éléments roulants apparaissent à des fréquences qui ne sont pas des multiples entiers des vitesse d'arbre.

Analyse de Cepstre :



La définition du cepstre est:

$$C(\tau) = \mathbf{F}^{-1} \{ \log F(f) \}$$

Où $F(f)$ est la fréquence du spectre.

En fait cela signifie que le cepstre est une sorte de "spectre du spectre"

MAIS, ce n'est pas la caractéristique distinctive de cette fonction

Le cepstre sert à mettre en évidence des structures périodiques du spectre.

Celles-ci ont essentiellement comme sources :

- **Les familles d'harmoniques dues à des éléments de cinématique.**
- **La répétition d'un phénomène : rebond d'un impact, chemins de transmission multiples (échos)**

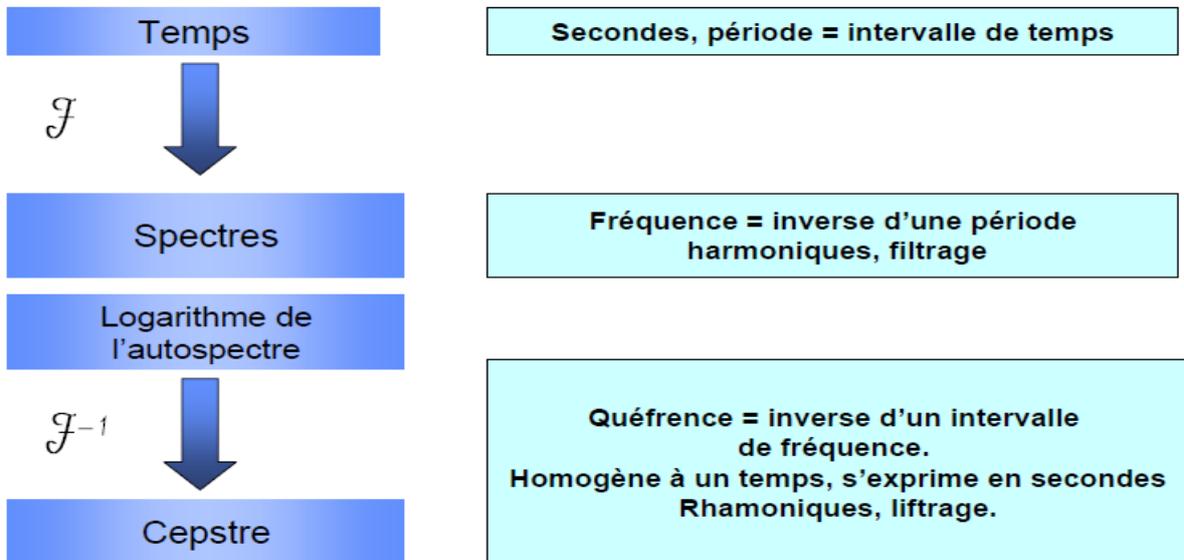
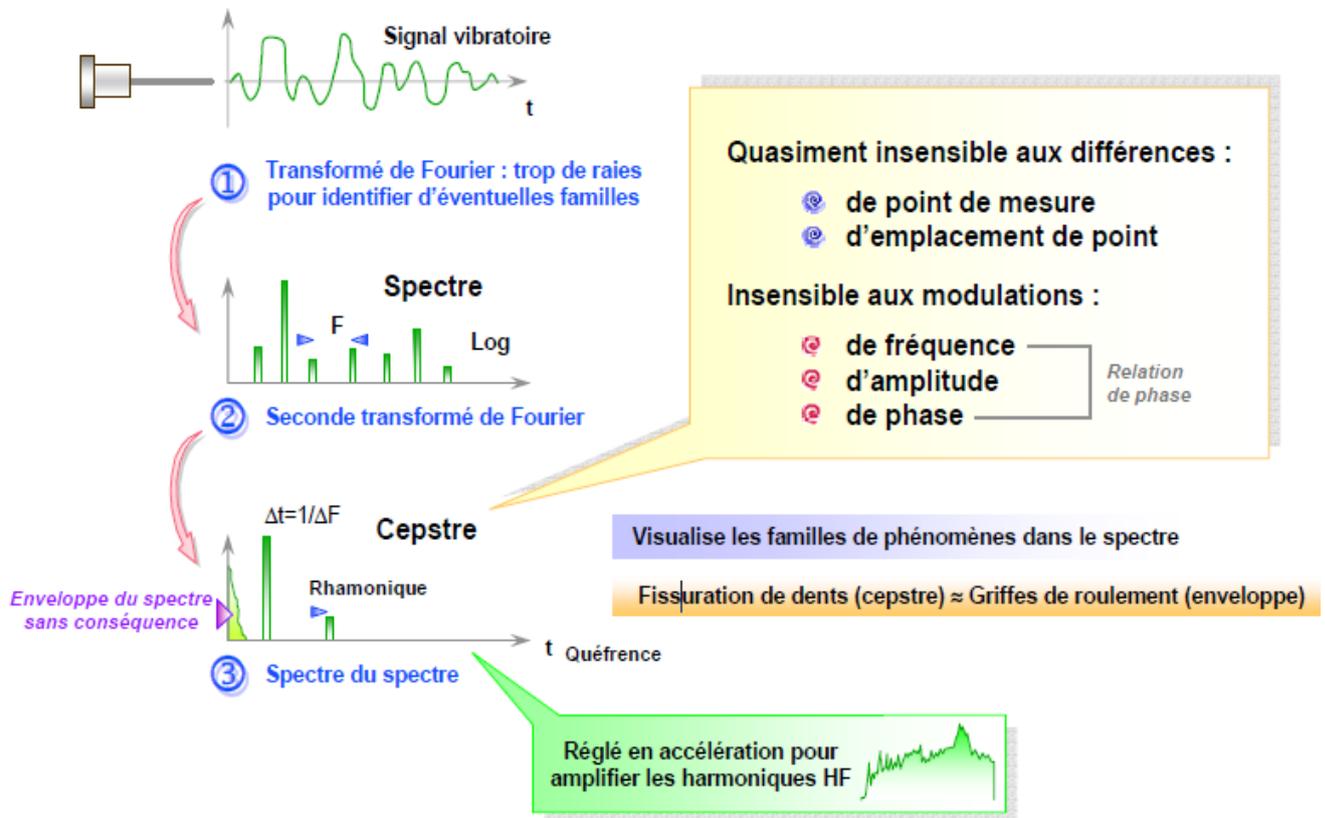
Dans le premier cas il est toujours critique d'optimiser le rapport signal à bruit pour avoir une émergence, donc une visibilité maximale des familles d'harmoniques et de bandes latérales.

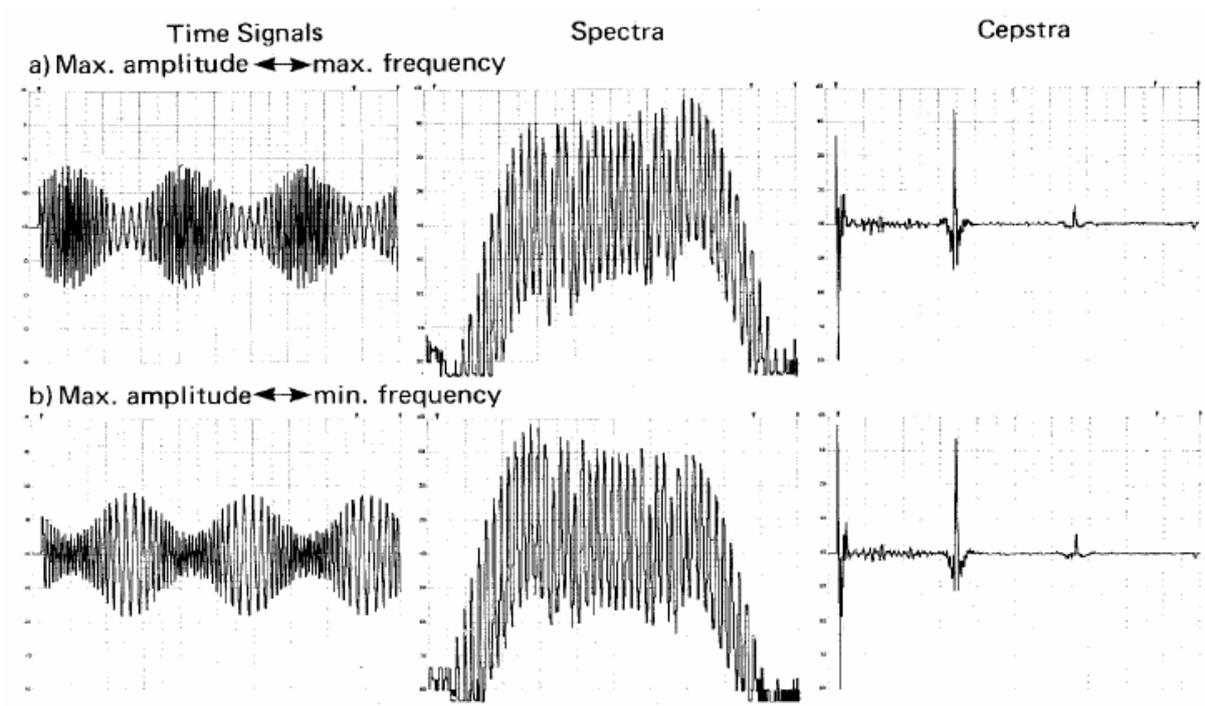
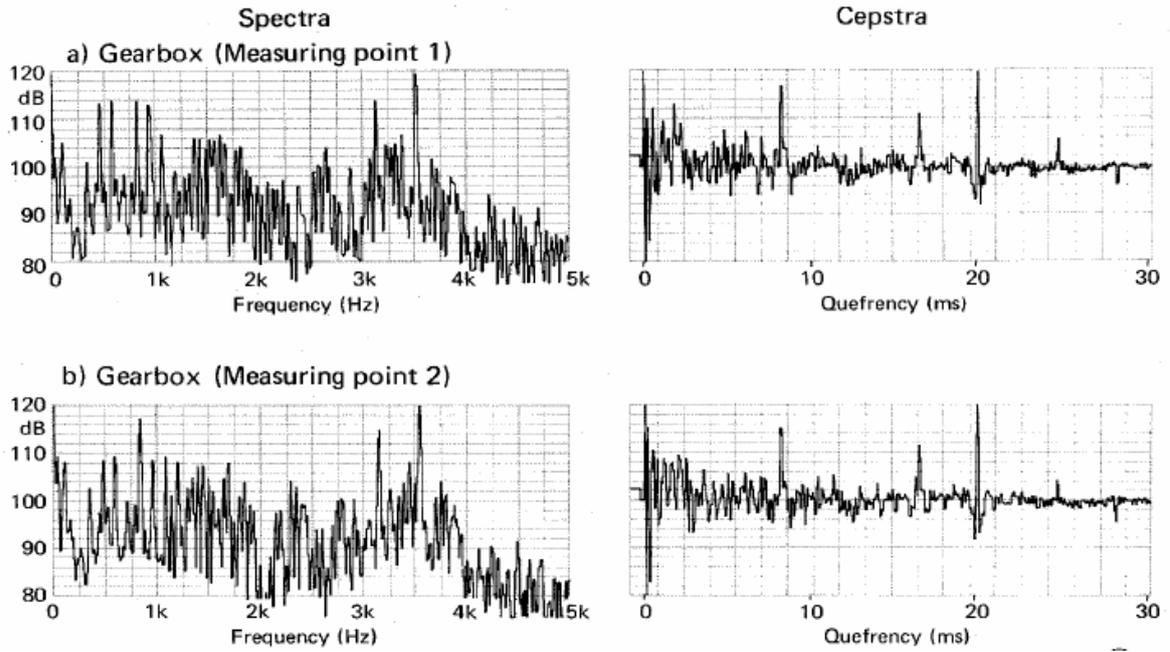
- Fonction d'Auto-corrélation

$$R_{xx}(\tau) = \mathbf{F}^{-1} \{ F_{xx}(f) \}$$

- Où $F_{xx}(f)$ est un spectre de puissance
- Ainsi la caractéristique distinctive du cepstre est la **conversion logarithmique** du spectre

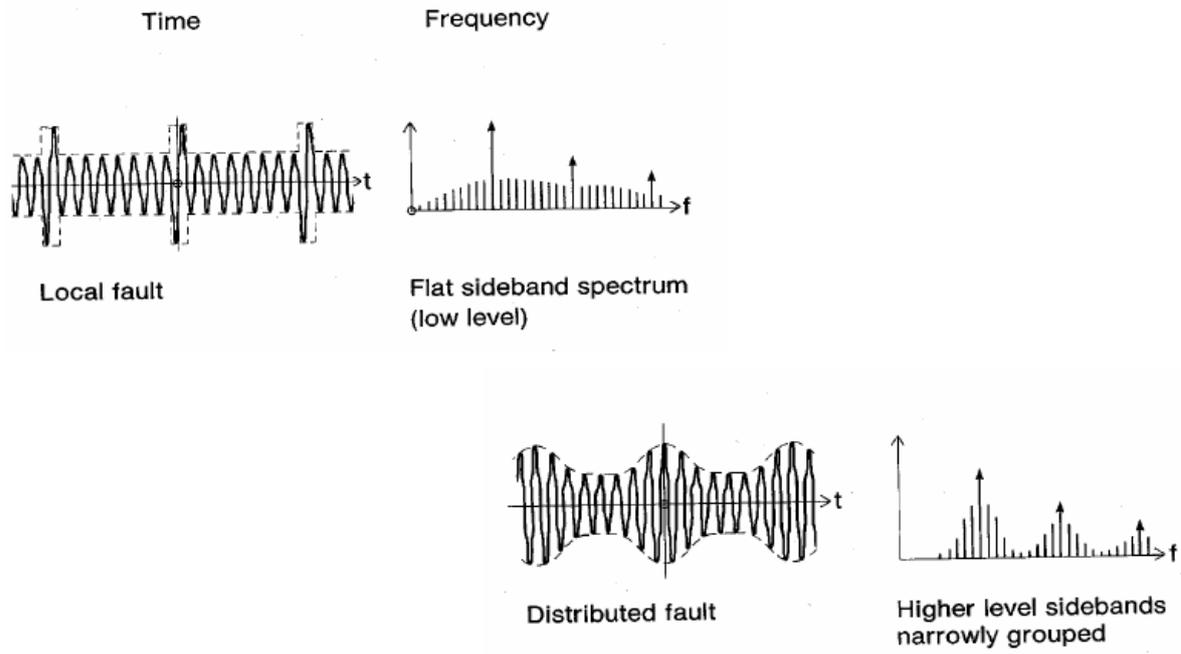
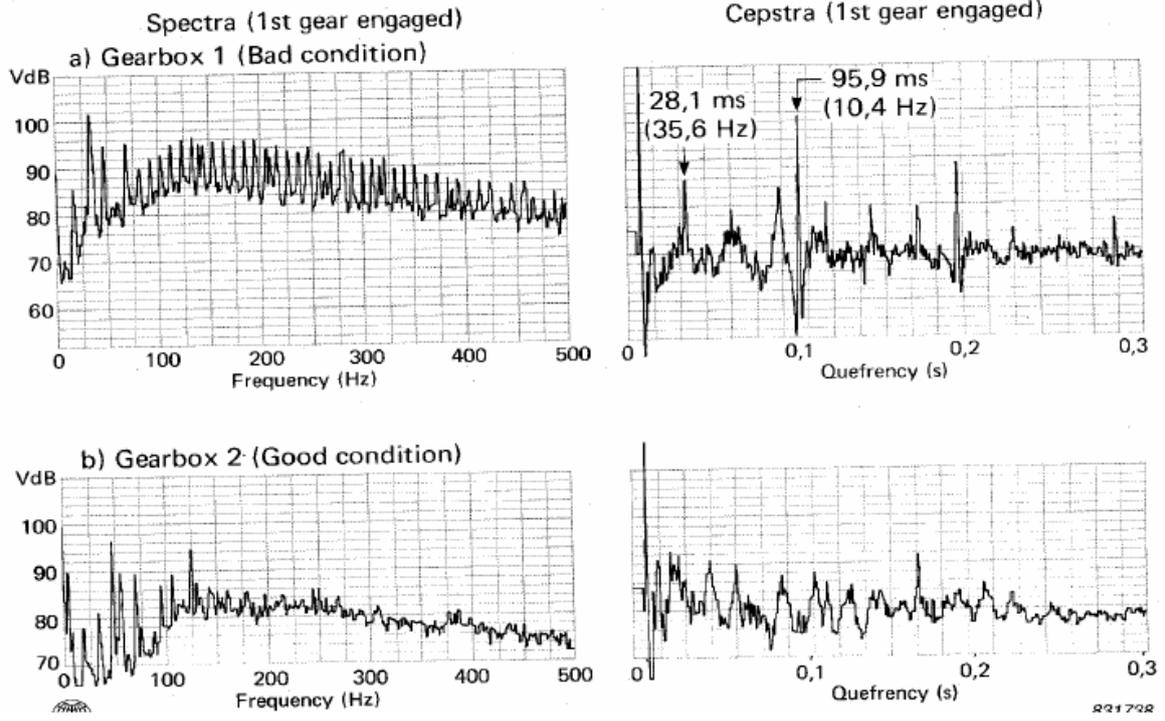
Chapitre 4 : Défaits d'engrenages





Engrenages: Cepstre utilisé pour le diagnostic

Chapitre 4 : Défaits d'engrenages



CONCLUSION :

La présence de défauts ou d'endommagement sur une dent modifie le comportement vibratoire, pour faire un bon diagnostic, on doit comprendre comment se manifeste la vibration d'engrenages, sous l'effet de défauts d'engrèvements le graissage et le couple appliqué, qui peut simuler en pratique la charge de l'engrenage, sont très influents sur les indicateurs scalaires et même les outils fréquentiels. Pour le graissage, le niveau vibratoire augmente dans le cas où l'engrenage est non graissé. La différence du niveau vibratoire entre un engrenage graissé et non graissé apparaît plus clairement au niveau des fréquences d'engrènement et des fréquences propres du système.

Introduction :

Le réducteur et le moteur constituent la cage de laminage entrainant deux cylindres(ou trois galets à 120°) dans les quels sont usinées les cannelures et entre lesquels passent les produits à transformer. Le profil de la cannelure est celui que l'on souhaite pour le produit en sortie de la cage.

Le réducteur réduit la vitesse jusqu'à satisfaction de toutes ces limitations. En raison des sollicitations importantes d'accélération et de choc, le réducteur dans le laminoir, est prévu et sélectionné avec un coefficient de fonctionnement élevé, basé sur le couple d'accélération.

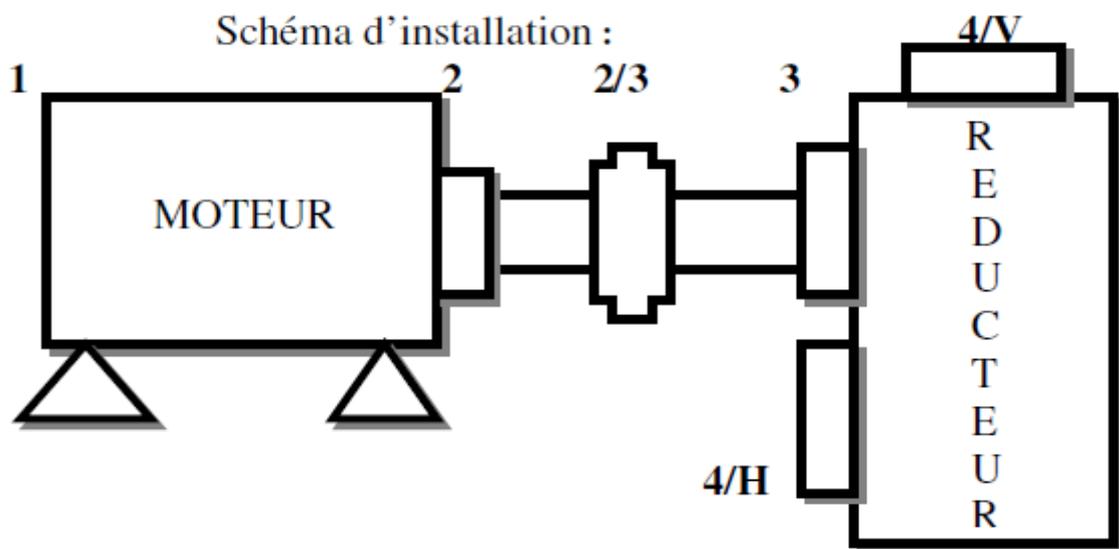


Figure 5.1 : image de l'installation
Appareil de mesure



Figure 5.2 : le Vibrotest60

5.1 Consignes de sécurité :

Règles d'utilisation :

Le vibrotest 60 est destiné à faire des mesures globales de vibrations, de paramètres de procédé, de filtre suiveur et des spectres en fréquence.

D'autres types de mesures ne sont pas possibles.

Toute personne habilitée à utiliser le VIBROTEST 60 doit lire les consignes de sécurité ci-dessous.

Dangers résiduels

Ceux-ci sont indiqués dans le manuel:

Attention :

Si l'on ne tient pas compte des mesures de sécurité indiquées dans le manuel, il y a risque de détérioration du matériel.

Maintenance

Celle-ci doit être effectuée par un personnel agréé par Brüel & Kjær Vibro.

Attention :

Avant toute utilisation, vérifier que la tension d'alimentation du secteur est compatible avec l'appareil.

Les batteries du vibrotest60 ne devraient pas se trouver dans l'appareil durant le transport.

Veillez à ne pas court-circuiter les raccordements de l'accumulateur.

Conseils :

- Toujours utiliser l'appareil avec son couvercle de protection.
- Ne pas toucher les contacts électriques reliant le Vibrotest 60 au chargeur. Ceci pourrait provoquer une décharge d'électricité statique qui provoquerait la détérioration de l'appareil.
- L'utilisation d'un téléphone portable dans un rayon de 5 mètres autour de l'appareil peut provoquer des perturbations dans l'affichage.

Chapitre5: Etude de cas

Les missions remplies par le vibrotest 60?

Le vibrotest 60 offre, grâce à son concept modulaire, un grand choix de fonctions:

- Analyse de vibrations
- Equilibrage dans les conditions de service
- Collecteur de données.

Le vibrotest 60 est un appareil pratique de mesure de vibrations pour apprécier l'état des machines, faire le diagnostic des défauts et pour réaliser la maintenance conditionnelle.

5.2 Le logiciel xms utilisé :

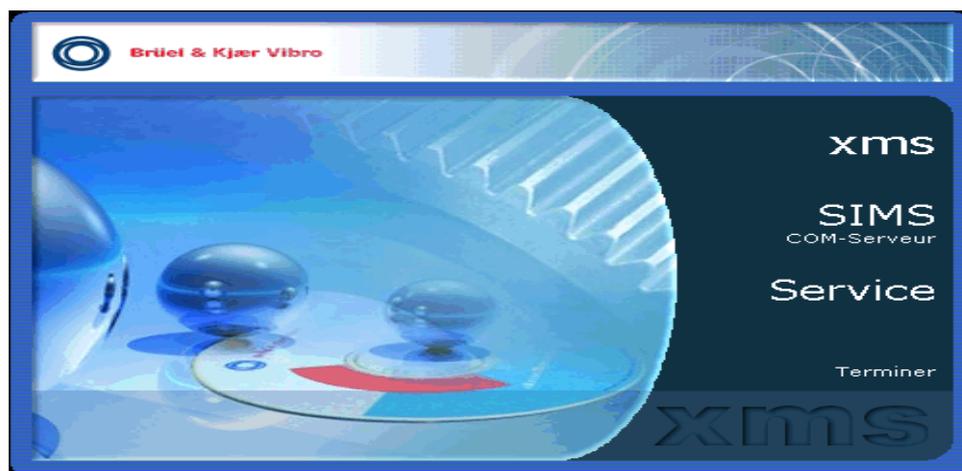


Figure 5.3 : le logiciel utilisé

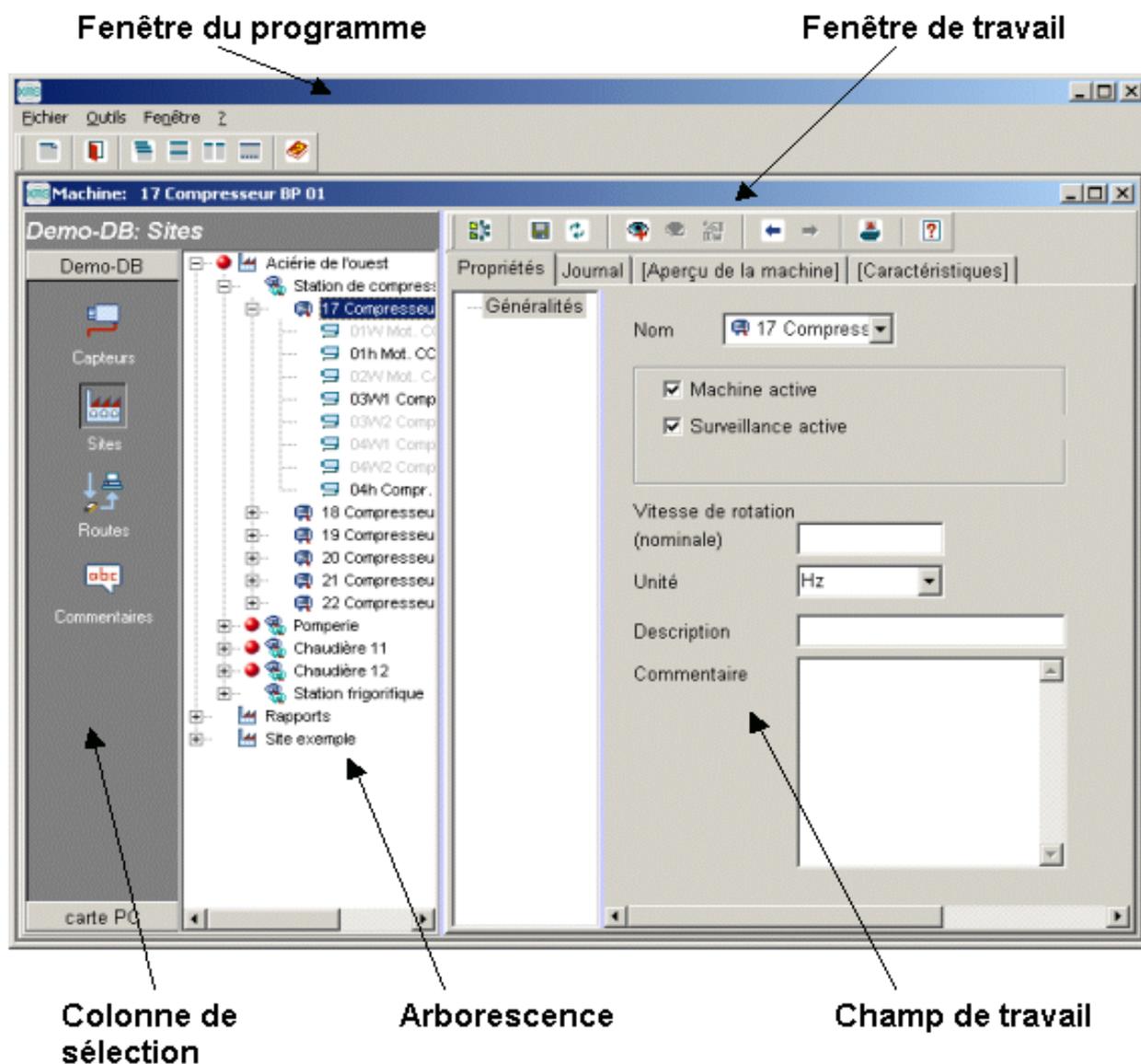


Figure 5.4 : image de logiciel

Le logiciel *xms* est le noyau d'un système de maintenance conditionnelle des machines et des installations.

Toutes les mesures de vibrations et de paramètres de procédé d'un parc de machines sont systématiquement acquises à intervalles réguliers et stockées dans la banque de données du logiciel *xms*. Selon l'importance des machines dans la ligne de production, les mesures peuvent être effectuées en ligne à l'aide d'appareils de mesure installés à poste fixe, ou bien hors ligne à l'aide d'un collecteur de données.

5.2.1 les missions de *xms*

Le logiciel *xms* simplifie l'organisation des données et leur exploitation.

Chapitre5: Etude de cas

Parmi toutes les machines d'un parc, celles qui nécessitent une attention particulière sont mises en valeur.

Les causes des défaillances des machines sont identifiées.

Les défauts sont détectés précocement.

Combiné au *SIMS*, il donne accès aux **mesures en ligne en temps réel dans le monde entier** et renseigne sur l'état des machines et des installations.

Dans cette version du logiciel, les mesures hors ligne sont collectées au moyen de l'appareil de mesure portable *VIBRO-TEST 60*, elles sont ensuite sauvegardées dans la banque de données et analysées hors ligne.

Les appareils de surveillance en ligne, tels que les *SIMS* ou autres appareils en ligne, permettent le transfert de mesures en temps réel vers *xms* via une liaison client/serveur OPC. Leur affichage réalisé grâce à la fonctionnalité de visualisation des procédés garantit leur disponibilité à tout moment dans le monde entier.

5.3 Réducteur :



Figure 5.5 : image du réducteur

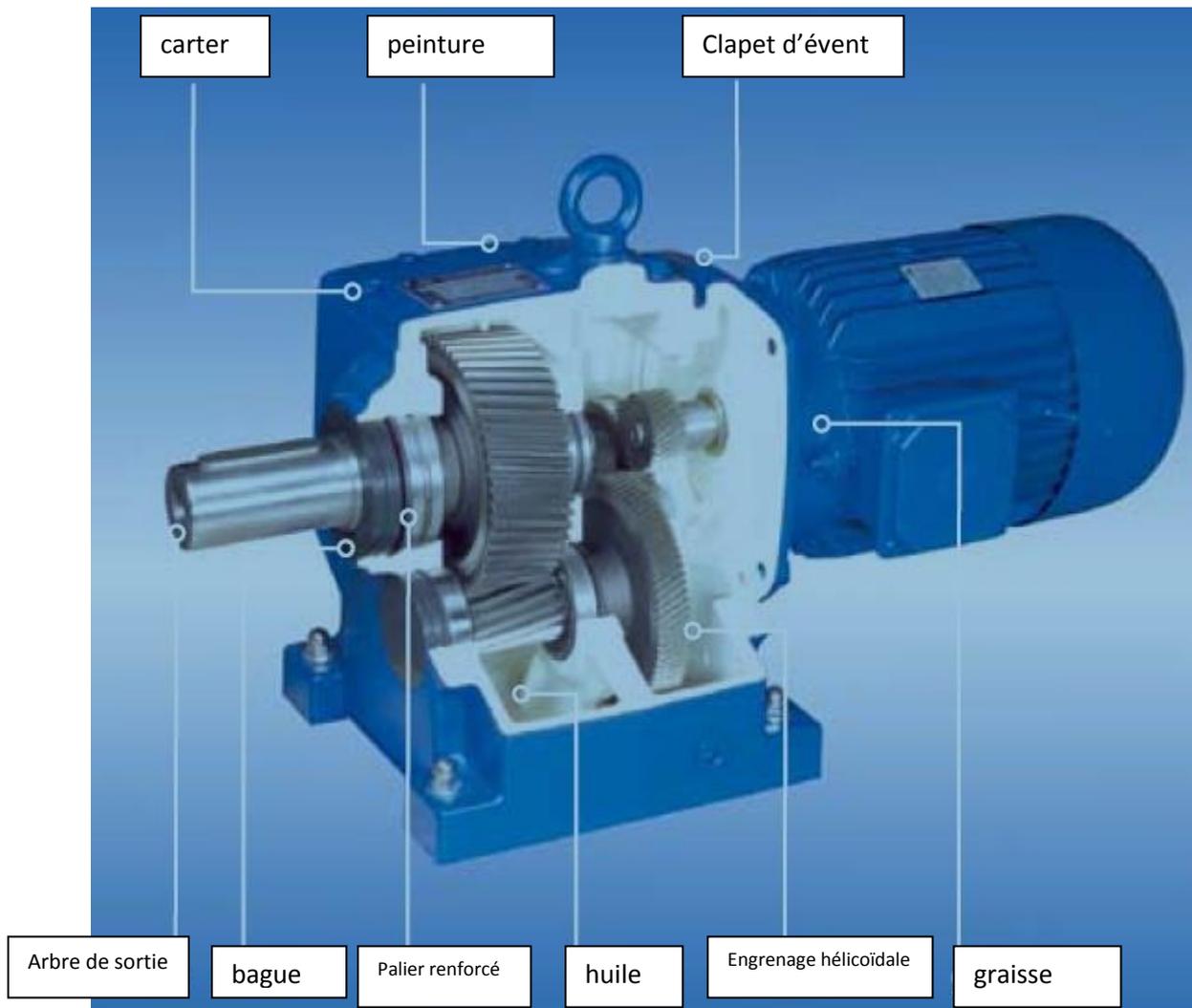
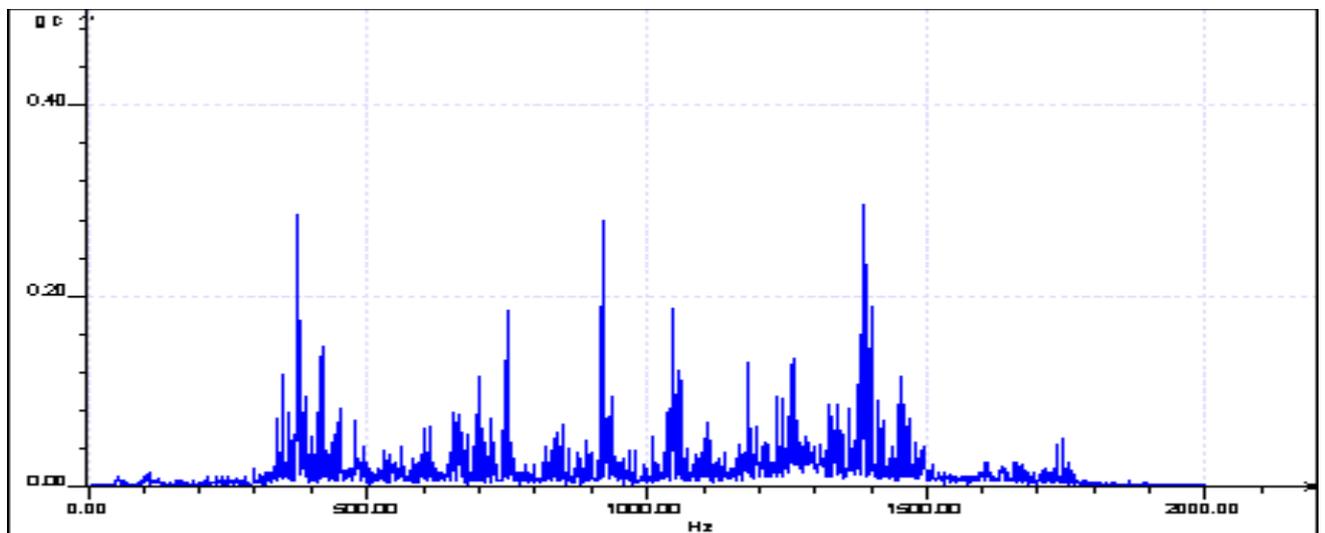
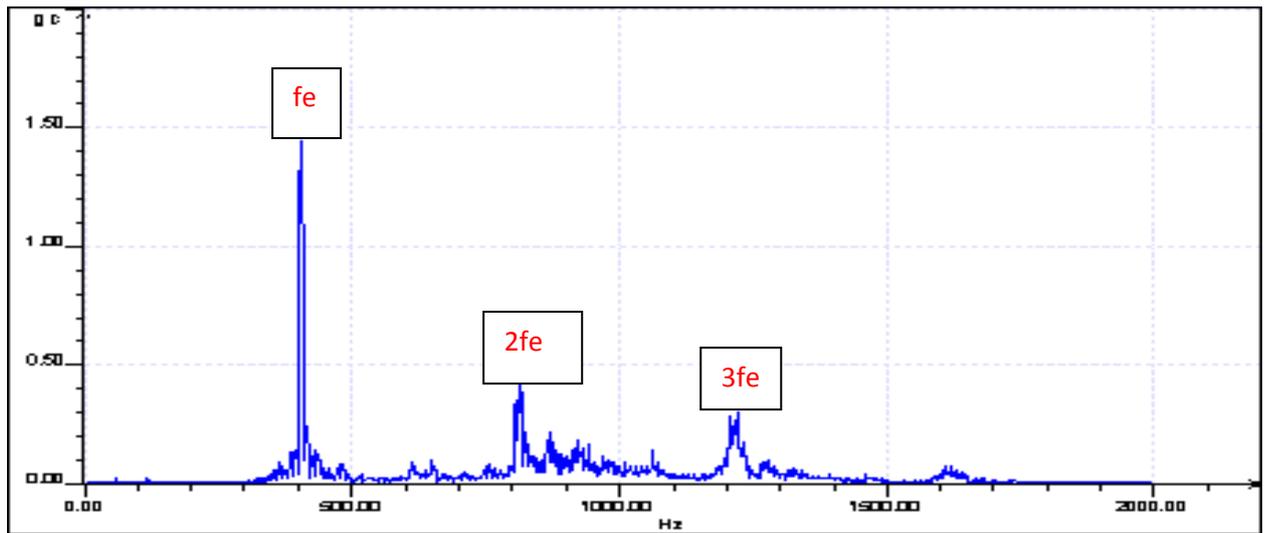


Figure 5.6 :principe de fonctionnement

5.4 Rapport des mesures et des alarmes :

Unité :		g	eff.	Unité vit. rot.:	Hz
Alarme:		3		Vitesse de rot. (Réf:	1/1
Heure	Valeur	Vitesse de rotation		Commentaire	
11:27:13	1.325	1251.00			
13:51:42	0.587	1251.00			
08:28:37	0.618	1251.00			
10:41:00	0.690	1251.00			

[Spectre]	Unité:	g	c	Unité de vit. rot.:	Hz	Unité de vit. rot.:	Hz
	Nombre de lignes:	1600		Fenêtre de pondération:	Hanning	Durée de moyennage:	
	Nombre de moyennes:	4		Type de moyenne:	ds le dom. fréq.		



Tendance :

Figure 5.7 : spectre du réducteur

3H/ACC

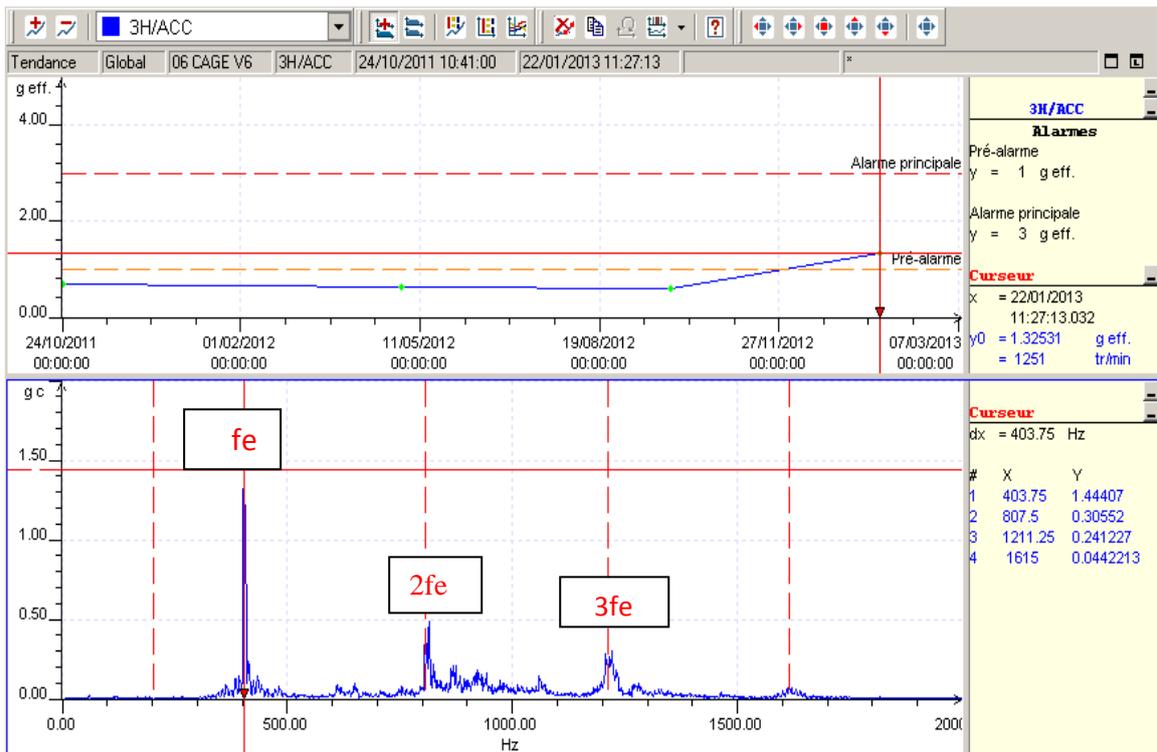


Figure 5.8 : Niveau global avec spectre pendant défaut

3H/ACC

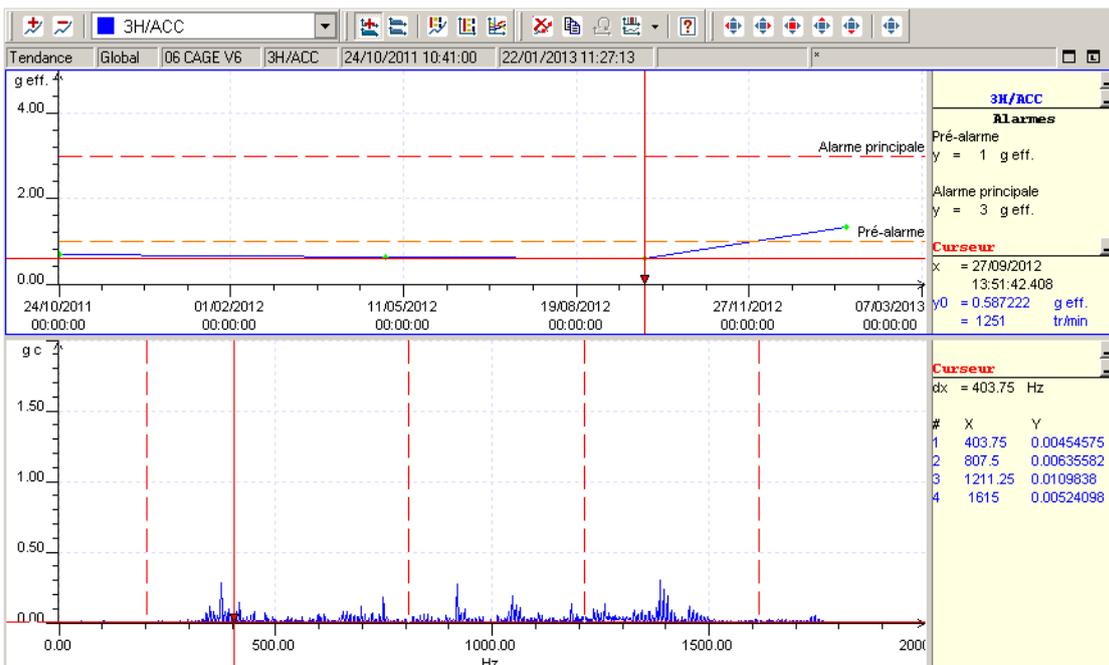


Figure 5.9 : Niveau global avec spectre avant le défaut

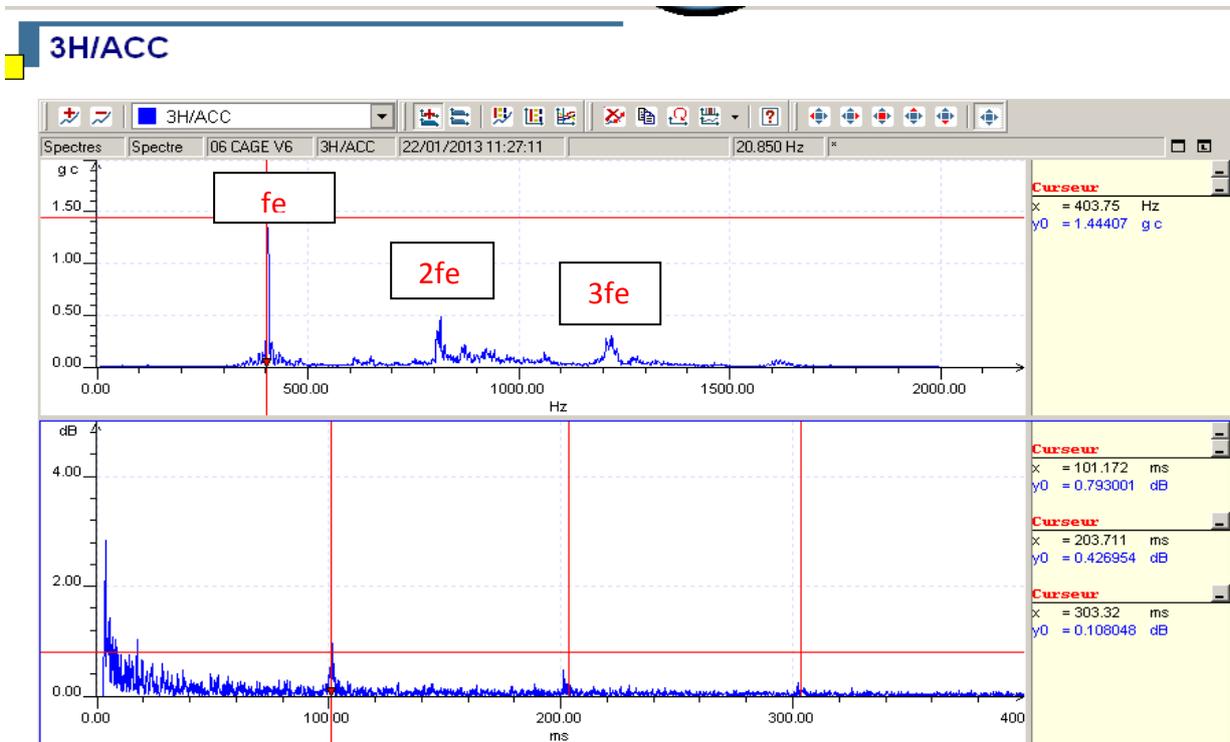


Figure 5.10 : Spectre et son cepstre pendant le défaut

Fréquence d'engrènement = 403.75 HZ

Donc 19.3 Hz = la vitesse du moteur électrique = 1158 tr/min = la vitesse d'entrée du réducteur (PV)

$$F_e = n_1 * Z_1 = 19.3 * 21 = 403.75 \text{ Hz} = n_2 * Z_2$$

N₂ = La vitesse de 2^o étage du réducteur

Z₂ = Nombre des dents de pignons de 2^o étage = 42

Conclusion :

Un défaut d'engrènement constaté entre le pignon du 1er et 2ème étage du réducteur dû à la détérioration des dents des deux pignons. L'augmentation de pics explique donc la présence de ce défaut.

Avant de faire la mesure on a d'abord vérifié l'alignement de l'arbre. Les causes possibles de ce défaut sont la mauvaise lubrification, la pollution et la corrosion.

Conclusion générale et recommandations :

La maintenance nous permet donc d'éviter l'arrêt de production et l'augmentation de coûts et de délais en maintenant les outils de production en parfait état.

L'analyse vibratoire a permis de détecter pratiquement les défauts dans le réducteur. Avant de faire la mesure on a d'abord vérifié l'alignement de l'arbre, rien que pour faire un diagnostic adéquat des défauts d'engrenages pour éviter d'avoir les vibrations d'un autre défaut.

Le résultat explique alors le comportement constaté du cepstre d'énergie lors de la naissance d'un défaut, à savoir l'augmentation des pics du peigne associé à l'organe défectueux, au détriment des autres.

L'outil de surveillance doit être initialisé à zéro pendant une phase de fonctionnement sain du réducteur. Son utilisation sur des cas concrets de diagnostic a montré son efficacité, puisqu'il a permis par exemple, de déceler la présence d'un défaut le jour même de sa manifestation constatée par un expert.

Il est aussi utile de connaître l'état des roulements avant de faire le diagnostic issu de cette mesure.

L'analyse vibratoire est également très utilisée en complément des autres méthodes, lorsque celles-ci ne suffisent pas à réaliser un diagnostic et c'est notamment le cas de l'analyse d'huile qui détecte de manière précoce l'usure d'un organe, que l'on peut ensuite localiser par une analyse vibratoire.

Après mure réflexion, nous recommandons :

- Les mesures doivent être réalisées par un matériel adéquat et performant.
- De veiller aux opérations de remise en état (maintenabilité), en respectant les conditions de bon fonctionnement : respect des jeux fonctionnels (roulements, engrenages) ainsi que les alignements des arbres.
- Nous proposons dans ce cas, du fait de l'importance de cet équipement, la méthode de suivi continu. Pour ce cas il est intéressant de doter tous les paliers de capteurs d'amplitude et de déplacement. Toutes les données seront canalisées sur un pupitre où des signaux lumineux seront visibles pour indiquer les seuils admissibles et d'alarme. Notons que ces méthodes restent qualitatives dans la mesure où leurs résultats admettent une présence obligatoire d'une personne pour comparer à chaque vue des résultats les différences entre les signaux et en déduire l'existence ou non de l'erreur.

Ces méthodes restent donc insuffisantes et peuvent être l'objet d'une étude plus poussée, qui a pour but l'automatisation des résultats, c'est-à-dire la création d'un programme automatique, capable de détecter les défauts sans l'indispensabilité de la présence d'un spécialiste derrière.

I. Problématique :

Les engrenages sont un ensemble d'éléments de machines universellement répandus en mécanique et servent à transmettre un mouvement de rotation d'un arbre menant à un second arbre mené. Comme les engrenages peuvent prendre diverses formes, ils sont utilisés dans tous les secteurs de l'industrie. Par exemple, ils constituent les boîtes de vitesses des véhicules servant au transport, ils transmettent la puissance nécessaire au fonctionnement des machines dans les papeteries et ils mettent en mouvement les bras articulés des robots.

Les réducteurs (ou multiplicateurs) à engrenages sont très répandus en mécanique ; on les trouve dans tous types d'industries, de procédés par exemple ; automobile (boîtes de vitesse), aéronautique (hélicoptères), cimenteries, raffineries. Ce sont des éléments mécaniques très sollicités, complexes à dimensionner et à réaliser (calcul, choix et traitement des matériaux, taillage des dents, . . .), qui peuvent présenter des défaillances limitant leur durée de vie. Vu leur importance, il n'est donc pas étonnant de voir qu'ils aient été (et qu'ils soient) l'objet de nombreuses études portant sur le calcul, le dimensionnement, l'étude des matériaux, la lubrification, l'analyse des défauts, sur les techniques de surveillance et de diagnostic de défauts, pour éviter les ruptures soudaines (par exemple dans les laminoirs) pour diminuer les coûts de maintenance en milieu industriel en pratiquant la maintenance dite conditionnelle. Selon Dudley [Dud 192], il existe quatre grandes classes de défaillance des engrenages. La première est la plus importante est l'usure des surfaces de contact suite à la présence de particules abrasives ou d'un film d'huile inadéquat.

La seconde est la plasticité des surfaces de contact en présence de contraintes supérieures à la limite d'écoulement du matériau. La troisième défaillance est la fatigue des surfaces en présence des contraintes cycliques élevées. La dernière est la rupture d'une dent due à des surcharges ou à un phénomène de fatigue au creux de la dent.

Notre nouvelle approche consiste à l'élaboration d'une banque de données relative aux défauts majeurs d'engrenages de réducteur du laminoir, en faisant appel à l'analyse vibratoire.

Bibliographie

- [1] Henriot G « Traité théorique et pratique des engrenages » ;Dunod paris 1968, tome1 .
- [2] DUDLEY, Darla W, Handbook of prentice gear de sign, New York, Mc.Graw-Hill 1984
- [3] Aublin. M, et al. « Systèmes Mécaniques Théorie et dimension » Dunod, Paris, 1992, pp.1-657
- [4] **Mohamed EL BADAOUI.** Contribution au diagnostic vibratoire des réducteurs complexes à engrenages par l'analyse cepstrale (Thèse présentée devant l'Université jean-Monnet) 1999.
- [5] Sidahmed M., « Analyse des vibrations d'un engrenage : cepstre, corrélation, spectre », traitement du signal, 1992.
- [6] Saboni O., « Cohérence et cohérence spectrale : application à la modélisation de la propagation à travers des éléments tournants»Senlis France, 13-15 oct 1998.
- [7] Crapart F. « Implantation d'algorithmes rapides sur processeur de traitement du signal. Application à l'analyse vibratoire de machines tournantes », thèse de l'Université de Reims Champagne-Ardenne, 1995.
- [8] Dron J. P., « Élaboration et adaptation d'outils pour l'étude et le suivi de l'endommagement de composants mécaniques par analyse vibratoire. Application à la maintenance conditionnelle des paliers à roulements », Thèse de l'UFR de Reims, France 1995.
- [9] BRUEL & KJAER :Capteurs, Stage MC Rév. A Octobre 2007
- [10] BRUEL & KJAER : Défauts d'arbre, engrenages, stage MC Rév. B Octobre 2001
- [11] BRUEL & KJAER : Logiciel de traitement du signal . 2008