

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR ANNABA-UNIVERSITY  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



جامعة باجي مختار عنابة

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT  
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

## MEMOIRE

PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

## INTITULE

**Les effets du Courant de Foucault sur la dégradation des roulements des moteurs électriques de la station de pompage de l'entreprise SKD.**

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : GENIE MECANIQUE

SPECIALITE : MAINTENANCE INDUSTRIELLE ET FIABILITE MECANIQUE

PRESENTE PAR : BOUMENDJEL MOHAMMED

DIRECTEUR DU MEMOIRE : DR O. BOUSSAID.

DEVANT LE JURY

PRÉSIDENT: Mr. KHELIF R. MCA

Université Annaba

EXAMINATEURS: Mr. AISSAOUI R.

MAA

Université Annaba

Mr. TADJINE K.

MAA

Université Annaba

Mr. BOUSSAID O.

MCA

Université Annaba

Mr. MERABTINE A.

MAA

Université Annaba

Année: 2012/2013

# Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à deux personnes les plus proches à mon cœur  
À mes chers parents qui ont tout sacrifié pour m'offrir tout ce qui peut exister de  
bon et qui ont jamais éprouvé la moindre lassitude d'être à mes côtés jusqu'à me  
voir réussir.*

*À ma mère, le signe d'amour et de la tendresse.*

*À mon père, qui mérite tout les respects.*

*À mes chères sœurs et mes frères,*

*À tous mes amis sans exception*

## Sommaire

---

Résumé.....	01
Introduction.....	02

### **Chapitre I : présentation de l'entreprise.**

1- Introduction.....	03
2-Définition du cycle.....	04
3-Description détaillée du projet .....	05
3-1-Les installations principales.....	06
3-2-Les installations auxiliaires.....	09
4-Conclusion.....	21

### **Chapitre II : Bibliographie.**

#### **Partie 1 : La maintenance.**

1- Concepts objectifs et politique de maintenance.....	23
2- Définition, Méthodes et opération de la maintenance.....	35
3-Conclusion.....	38
4- Opération de maintenance.....	38
5- Autres formes et méthode de maintenance.....	41
6-Les niveaux de maintenance.....	48
7- La sécurité.....	49
8-Conclusion.....	50

#### **Partie 2 : Les Roulements.**

1-Introduction.....	51
2-Conception.....	51
3-Types de roulement normalisés.....	54
4-Analyse des caractéristiques de chaque type de roulement.....	55
5-Défaillance du roulement .....	62
5-1-La Fatigue du matériau.....	63
5-2-L'Usure.....	64
5-3-La Corrosion.....	65
5-4-La Déformation Plastique.....	66
5-5-Cassure.....	67
5-6-Erosion électrique.....	68
6-Conclusion .....	69

#### **Partie 3: Les Courants de Foucault**

1-Définition de Courants de Foucault.....	70
2-Principe de Courants de Foucault .....	70
3-Description de phénomène des courants de Foucault.....	70
4-Applications des courants de Foucault.....	72
5-La fiabilité des moteurs électriques et le courant de Foucault.....	74

6- la défaillance des roulements due au passage du courant.....	75
7-Origines des courants dans les paliers.....	77
8-Conclusion.....	79

### **Chapitre III : Etude Technique**

1-Introduction.....	80
2-Objet.....	80
3-Situation.....	80
3-1-Les ratings du moteur sont les suivants.....	81
3-2- La plaque signalétique du moteur .....	81
4-Le placement des moteurs dans la centrale.....	82
5-Analyse de la défaillance des roulements.....	82
5-1-Démarche.....	82
5-2-Expertise.....	83
6-Description de ce type de défaillance.....	87
6-1-défaillance due au passage contenu de courant par roulements.....	87
6-2-Comportement électrique des roulements.....	87
7-Conclusion.....	88

### **Chapitre IV: Proposition de solutions.**

1- solution 1 : Implication du Service Maintenance de l'entreprise SKD.....	90
1-1-Application actions correctives .....	90
1-2-Application actions provisoires.....	91
1-3-Les pas qu'il faut suivre.....	93
2-Solution Alternatif : INSOCOAT– la solution SKF pour prolonger la durée de service des roulements dans les machines électriques.....	94
2-1-Introduction.....	94
2-2- Sources de courant électrique .....	94
2-3-Définition du roulement INSOCOAT .....	95
2-4-L'objectif de l'utilisation du roulement INSOCOAT .....	96
2-5- Effets du passage de courant électrique dans un roulement .....	97
2-6- Les avantages de l'utilisation du roulement INSOCOAT.....	100
2-7- Procédé d'enduction : technique de la projection plasma .....	101
2-8-Comportement électrique des roulements INSOCOAT.....	101
2-9-Conclusion .....	102
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>104</b>

## Résumé

Les problèmes relatifs à la station de pompage à l'entreprise sharikat kahrba koudiet eddraouch (SKD), dont la déficience du système informationnel font l'objet continuellement d'une amélioration de la fiabilité du matériel les moyens de surveillance et les méthodes de diagnostic.

Entre une variété de problèmes rencontrés, ce travail est consacré à la défaillance des roulements de moteurs de pompage (6 moteurs électriques) pour la centrale SKD, qui présentent un problème commun qui se résume en une détérioration périodique des bagues et billes des roulements dont la cause est probablement mise sur le compte des courants de Foucault qui naissent la zone de contact.

Pour remédier à ce problème, ce travail propose dans un premier temps une identification du phénomène et la mise en évidence de l'origine et dans un second temps une proposition d'une solution à ce phénomène, solution pour l'amélioration de la fiabilité de la station de pompage et l'efficacité de la fonction maintenance.

L'objectif de la thèse est de contribuer à l'amélioration de la fiabilité de ces moteurs de la station de pompage de l'entreprise SKD.

Notre travail est structuré suivant 4 chapitres :

Au 1<sup>er</sup> Chapitre une Présentation générale de la centrale SKD ; au 2<sup>ème</sup> Chapitre nous faisons une Etude bibliographique, Et au 3<sup>ème</sup> Chapitre on fait une Etude Technique (Etude de cas de défaillance de roulement), à la fin, une proposition de solution.

## **-Introduction :**

La fiabilité des moteurs électriques est un objectif important pour les constructeurs, Elle est justifiée dans un premier temps par un désir de fournir au client le maximum de qualité de service et dans un deuxième temps de garder les coûts de maintenance dans des limites les plus basses possibles. En résumé, un moteur fiable est un moteur dans lequel l'utilisateur a confiance. Il a été observé, dans des études, que la cause principale des défauts sur les moteurs électriques est la défaillance des roulements. Ces défauts ont des origines mécaniques, mais aussi électriques.

L'analyse des causes électriques de la défaillance des roulements a débuté dès les années 1920, on retrouve ainsi les phénomènes électrostatiques ou les dissymétries du flux dans la machine pour expliquer les passages de courant. Ces phénomènes ont été étudiés et classés comme des phénomènes de basse fréquence, c'est-à-dire liés au fondamental du courant statorique. L'analyse de ces phénomènes s'est affinée depuis et maintenant des correctifs sont mis en place dans la phase de conception. Tous les alternateurs de centrales électriques sont équipés de dispositifs permettant d'éviter les passages de courant dans les paliers.

Dans les années 1980, l'avancement dans le domaine des semi-conducteurs et de l'électronique de puissance a conduit à l'apparition des alimentations à modulation de largeur d'impulsion (MLI). Ces alimentations ont permis d'obtenir la flexibilité du couple en fonction de la vitesse nécessaire pour la traction ferroviaire.

Un effet secondaire des alimentations MLI est que des fronts de tension de plus en plus raides arrivent aux bornes des machines. Ces fronts excitent des capacités parasites qui se trouvent entre les composants du moteur ; en régime sinusoïdal ces chemins étaient beaucoup trop impédants pour être traversés par des courants significatifs. Les fronts de tension ( $dV/dt$ ) des MLI utilisées dans la traction ferroviaire aujourd'hui sont au niveau moyen de  $3.5kV/\mu s$  ( $10 kV/\mu s$  niveau maximal), ce qui se traduit par des fréquences équivalentes de front de l'ordre de la centaine de kHz. Par rapport aux phénomènes expliqués précédemment, on se retrouve sur des problématiques hautes fréquence. Par des différents couplages (capacitifs et inductifs) et différents cheminements du courant dans la machine, ces fronts de tension excitent des courants parasites qui traversent les machines et qui se retrouvent finalement dans les roulements.

## **-L'entreprise sharikat kahrba koudiet eddraouch (SKD)**

### **1-Introduction:**

La demande en électricité s'accroît inexorablement, nécessitant de faire appel à de nouveaux moyens de production. Avec un rendement élevé et de moindres rejets de CO<sub>2</sub>, les centrales à cycle combiné gaz naturel sont appelées à se développer.

La centrale à cycle combiné, avec son rendement intrinsèque supérieur et son moindre impact sur l'environnement, est dans de nombreux cas, le meilleur choix de l'industrie énergétique d'aujourd'hui.

En effet, les cycles combinés peuvent se présenter selon deux configurations : single shaft ou multi-shaft.

Dans les centrales en cycle combiné qui étaient les moyens privilégiés pour répondre à la charge de base, la configuration en single shaft était la plus adéquate puisque son exploitation était plus simple et plus économique. « C'est la configuration adoptée à la centrale de KOUDIET EDDRAOUCHE »

Avec l'abondance de capacités de production atteintes et pouvant être plus importantes avec l'ouverture du marché de l'électricité, cette configuration peut s'avérer inadaptée.

La souplesse d'exploitation d'un cycle combiné de type single shaft étant limitée, les constructeurs de machines ont œuvré pour l'amélioration de cette souplesse, notamment, en adjoignant des équipements pouvant rendre indépendant le fonctionnement des turbo-alternateurs.

La vapeur est alors dirigée directement vers le condenseur par le système de contournement.

Dans le cadre de la stratégie nationale de l'amélioration de la capacité de production de l'énergie électrique, la centrale à cycle combiné mono arbre de SKD, SHARIKAT KAHRABA KOUDIAT EDDRAOUCHE est une société mixte SONELGAZ / SONATRACH, créée en 2007 pour la réalisation d'une centrale électrique de 1 200 MW à KOUDIAT EDDRAOUCHE, près d'El TARGH. Elle sera chargée de produire et de commercialiser l'énergie électrique.

La centrale utilisera le gaz naturel comme combustible principal et le gas-oil comme combustible de secours.

Les principales composantes de cette extension sont essentiellement constituées par les équipements suivants :

- La turbine à gaz ;
- La turbine à vapeur ;
- L'alternateur commun aux 2 turbines ;
- La chaudière de récupération ;

- La cheminée ;
- Le condenseur de vapeur ;
- Un transformateur principal ;
- Le filtre de l'aire ;
- Le bâtiment de dessalement des eaux de mer ;
- Le bâtiment de déminéralisation de l'eau ;
- Le bâtiment d'hydrogène ;
- Le poste de détente gaz ;
- Station de pompage de l'eau de la mer ;



**Figure (1) : La construction de central SKD.**

#### **-Caractéristiques de la centrale :**

- Puissance : 1200 MW
- Technologie : cycle combiné mono-arbre
- Rendement : 60%
- Combustible de base : Gaz naturel
- Combustible de secours : Gasoil

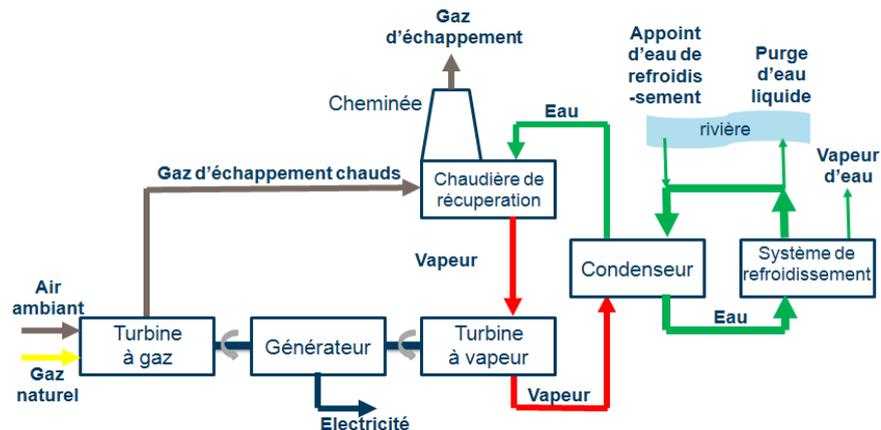
## **2-Définition du cycle combiné :**

Les turbines à gaz ont été présentées lors de la phase où elles fonctionnent en mode cycle simple. Dans ce mode de fonctionnement le gaz d'échappement à température élevée à grand débit ; est envoyé vers la cheminée sans être récupéré. Cependant si on ajoute les composants de cycle RANKINE à l'échappement de la turbine à gaz, on accroît alors le rendement thermodynamique du groupe pour tirer tous les avantages du combustible.

On note que la figure, ci-dessous, représente une centrale à cycle combiné typique. Le projet Sariket Kahraba Skikda est appelé est centrale à cycle combiné 2 pour 1 sur 1.

Ceci implique la présence de deux groupes de turbine à gaz avec chaudières de récupération qui alimentent chacune un groupe turbo alternateur à vapeur. Dans cette application, la vapeur est envoyée vers deux turbines à vapeur distinctes. Les unités sont indépendantes.

Le temps relativement court nécessaire à leur construction est une autre raison du succès des centrales à cycle combiné. Bien que l'édification d'une centrale à cycle combiné prenne plus de temps que pour une centrale à turbine à gaz simple, ce temps reste compensé bien inférieur à celui requis pour une centrale à cycle de RANKINE de comparable.



**Figure (2) : Fonctionnement d'un cycle combiné à gaz.**

### 2-1-Un cycle combiné 'single shaft' :

Est constitué d'une seule turbine à gaz, d'une seule chaudière de récupération qui alimente une turbine à vapeur et d'un unique alternateur dimensionné pour les deux turbines. La configuration single shaft se caractérise par le fait que les équipements : turbine à gaz, turbine à vapeur et alternateur sont agencés selon une disposition longitudinale, pour ne constituer qu'une seule ligne d'arbre.

La vapeur est alors dirigée directement vers le condensateur par le système de contournement. C'est la configuration adoptée à la centrale de KOUDIET EDDRAOUCHE.

### 3-Description détaillée du projet :

Les différents équipements et installations de ce projet peuvent être classés en deux catégories :

- Les installations principales.
- Les installations auxiliaires.

### 3-1-Les installations principales :

Les principales composantes de cette extension sont essentiellement constituées par les équipements suivants :

- La turbine à gaz ;
- La turbine à vapeur ;
- L'alternateur ;
- La chaudière de récupération ;
- Le condenseur de vapeur.

La turbine à gaz, la turbine à vapeur et l'alternateur sont sur la même ligne d'arbre d'où la nomination Cycle Combiné Mono-arbre.

#### 3-1-1-Turbine à gaze :

La turbine à gaz modèle MS-9001FB est une turbine à un seul arbre conçue pour fonctionner soit cycle simple, Soit en cycle combiné associée à une chaudière de récupération et une turbine à vapeur (STAG). L'ensemble turbine à gaz comprend six sections ou groupes principaux :

1. Admission d'air ;
2. Compresseur ;
3. Système de combustion ;
4. Turbine ;
5. Échappement ;
6. Systèmes de support ;



**Figure (3) : La turbine a gaze.**

### 3-1-2-L'alternateur :

L'alternateur est une machine tournante destinée à produire une tension alternative sinusoïdale. Son fonctionnement est proche de celui d'une génératrice de bicyclette. Les alternateurs sont couplés aux turbines à gaz et à vapeur.



**Figure (4) : L'alternateur.**

### 3-1-3-La turbine à vapeur :

La turbine à vapeur est constituée d'un grand nombre de roues (une centaine pour un modèle de puissance) portant des ailettes. La vapeur sous pression traverse d'abord les roues de petit diamètre.

Avant d'atteindre les roues de plus grand diamètre. La turbine tourne alors en entraînant l'alternateur qui lui est accouplé.



**Figure (5) : La turbine à vapeur.**

### 3-1-4-La chaudière de récupération :

La chaudière de récupération de l'énergie des gaz d'échappement de la turbine à gaz est horizontale, de type à circulation naturelle, sans feu additionnel et comporte trois étages HP, MP et BP.

Chaque étage est équipé d'un économiseur, d'un ballon, d'un évaporateur et d'une surchauffeur. La resurchauffe est prévue au niveau de l'étage MP.



**Figure (6) : La chaudière de récupération.**

### **3-1-5- Le condenseur de vapeur :**

Condenseur est un appareil dont la fonction principale est de condenser (transformation d'un gaz en liquide) de la vapeur sur une surface froide, ou via un échangeur thermique maintenu froid par la circulation d'un fluide réfrigérant. La chaleur latente du corps est transférée dans le fluide réfrigérant, ce qui consiste en un changement de phase à température constante. Le fluide réfrigérant varie en fonction du débit de gaz ou vapeur à condenser et de la température de condensation du gaz : air, eau, saumure.



**Figure (7) : Le condenseur de vapeur.**

### **3-2-Les installations auxiliaires :**

- Chaudière auxiliaire ;
- bâtiment anti incendie(PCI) ;
- bâtiment de dessalement de l'eau de la mer ;
- bâtiment de déminéralisation de l'eau ;
- bâtiment d'air comprimé ;
- bâtiment de production d'hydrogène ;
- bâtiment de plack start ;
- poste gaz ;
- bâtiment contrôle commande ;
- bâtiment administrative ;
- bâtiment de traitement de gazoile ;
- Station d'électrochloration ;
- Système de refroidissement ;
- station de pompage de l'eau de la mer ;

#### **3-2-1-Chaudière auxiliaire :**

Les corps de chaudières type "LKM" sont des récipients sous pression, cylindriques, horizontaux, à tube foyer, boîte extérieure tubulaire et double circuit de tubes fumées.

Chacun de ces corps est destiné à être incorporé comme élément principal d'un ensemble sous pression, soumis à la flamme, intégré et fonctionnel. Cet ensemble sous pression correspondra à une chaudière (générateur) produisant de la vapeur d'eau saturée.

Le plan N° 46013-DWG-001 représente les différents composants avec la limite de fourniture de l'équipement sous pression concerné.

#### **Caractéristiques générales**

- Catégorie de risque : IV ;
- Procédure d'évaluation de la conformité : Modules G ;
- Attestation d'examen CE de type (module G) ;
- Délivrée par l'organisme notifié : Lloyd's Register (0094) ;
- Code de conception et de fabrication utilisé : UNE EN 12953 ;
- Coefficient de soudure (ou de joint) : 0,85.



**Figure (8) : Chaudière auxiliaire.**

### **3-2-2-bâtiment anti incendie(PCI) :**

Systeme protection incendie et detection incendie :

Ensemble complet y compris reseau d'eau incendie avec equipement des reservoirs, pompes, bouches, lances autour et à l'intérieur du bloc. Ainsi que les moyens passifs (choix des matériaux et matériels de construction) et actifs comprenant notamment :

Systemes fixe et automatique de detection et protection des installations et équipements spécifiques(CO2, Mousse, déluge, sprinklers, etc.. .),

Systeme fixe de detection et protection à eau douce intérieur et extérieur aux bâtiments, locaux et galeries composé des reservoirs de stockage d'eau et de pressurisation, pompes, reseau d'eau incendie, poteaux incendie, RIA, armoire incendie, Tuyaux souples, accessoires de raccordement, etc.. . . ,

Systemes de désenfumage des bâtiments, locaux, galeries etc.. . . , Moyens mobiles et portatifs suivant les risques, Equipements individuels d'intervention.

Les mesures de protection contre l'incendie sont conçues pour atteindre les objectifs suivants :

- Assurer la protection et la sécurité du personnel de service et des occupants ;
- Minimiser les dommages/pertes par le feu au niveau de la centrale, des équipements et des structures ;
- Réduire le potentiel d'impact de pollution sur l'environnement local ;
- Réduire le potentiel d'interruption du fonctionnement de la centrale.



**Figure (9) : bâtiment anti incendie(PCI).**

### **3-2-3-bâtiment de dessalement de l'eau de la mer :**

Le processus de fonctionnement du poste de dessalement peut se diviser en Plusieurs sous-processus :

- Circuit d'eau d'alimentation/d'eau de mer.
- Circuit de vapeur motrice.
- Circuit de condensat.
- Circuit d'eau distillée.
- Circuit de saumure.
- Système du vide.



**Figure (10) : bâtiment de dessalement de l'eau de la mer.**

### **3-2-3-bâtiment de déminéralisation de l'eau :**

L'eau de mer (d'alimentation) fournie à la station de dessalement, après la décoloration, est filtrée et dépourvue de toutes ses substances nuisibles telles que particules d'huile en suspension, composants toxiques, sable, etc., normalement non présents dans l'eau

de mer normale. La décoloration est obtenue en injectant du bisulfite de sodium dans le flux d'alimentation pour éliminer l'excès de chlore dû au dosage choc de chlore dans l'eau de mer.



**Figure (11) : bâtiment de déminéralisation de l'eau.**

### **3 -2-4-bâtiment d'air comprimé :**

Le système d'air comprimé a été conçu pour réaliser les fonctions suivantes :

- Production et distribution de l'air comprimé pour l'instrumentation de la centrale.
- L'air d'instrumentation passe à travers deux étapes de séchage et filtrage.
- Production et distribution de l'air comprimé pour l'air de service de la centrale.
- L'air de service passe à travers d'une étape de séchage et filtrage.

#### **-Description :**

Le système d'air comprimé comprend deux ensembles principaux :

- Ensemble des équipements pour la production, le stockage, le séchage et la filtration de l'air comprimé : compresseurs, ballons, sécheurs et filtres (module air comprimé).
- Réseau de distribution de l'air comprimé aux différents points de la centrale qui ont besoin d'une alimentation en air d'instrumentation ou en air de service.

#### **-Production et stockage d'air comprimé :**

Le module air comprimé se compose de deux compresseurs (00-SCA10/20-AN001) de 110% de capacité chacun. Chaque compresseur refoule dans un ballon (00SCA10 / 20 BB001) de 110% de capacité également. Chaque ballon est pourvu d'un contournement. Les lignes de sortie des ballons (00SCA10 / 20 BR004-4'') convergent sur une ligne commune conduisant à deux ensembles de séchage et filtrage installés en parallèle (2x110%).

L'air est tout d'abord séché au moyen de sècheurs frigorifiques (00SCA10/20AH002). Il est ensuite filtré (00SCA10/20AT001 – pré filtres) Après ces deux étapes, l'air de service sort du skid de séchage vers sa distribution.



**Figure (12) : bâtiment d'air comprimé.**

### **3-2-5-bâtiment de production d'hydrogène :**

L'installation d'hydrogène est défini pour 10-14Nm/h de H<sub>2</sub> avec une pureté minimum de 99 .les impuretés en H<sub>2</sub>O seront inférieures a 5pp également le débit d'oxygène (5-7) nm/h sera envoyé l'atmosphère.

### **3-2-6-bâtiment de black Start :**

Les groupes électrogènes diesel représentent l'une des technologies de production d'énergie électrique les plus robustes et les plus adaptables aux divers besoins et environnements. Selon les définitions de la norme ISO 8528, les groupes diesel peuvent être classifiés en :

- régime de base continu. Les groupes sont conçus pour livrer de l'énergie à la puissance maximale pour une période illimitée, sans pouvoir livrer de l'énergie en régime de surcharge.
- régime de base variable. Les groupes sont conçus pour produire de l'énergie à la puissance maximale pour une période illimitée avec la possibilité de livrer de l'énergie dans un régime de surcharge de 10 % pour une période limitée.
- réserve (stand-by). Les groupes sont conçus pour livrer de l'énergie seulement pendant une panne du fournisseur normal. Ce type de groupes ne peut pas livrer de l'énergie en régime de surcharge.

La gamme des puissances couvre les besoins à partir de quelques kilowatts jusqu'à approximativement 100 MW, avec des consommations spécifiques de combustibles

pouvant atteindre des valeurs très réduites (155 g/kWh) et des rendements dépassant 50 % (54,4 % MAN S80ME-C7).



**Figure (13) : bâtiment de black Start.**

### **3-2-7- Poste de filtrage et de détente de la gaze ERM :**

Le système de gaz naturel est conçu pour fournir du gaz, conforme aux exigences, aux turbines à gaz et aux exigences, aux turbines à gaz et aux chaudières auxiliaires. Il remplit les fonctions suivantes :

-Fournir à la turbine à gaz du gaz réchauffé, conforme aux exigences de pureté, de pression et de température.

-Éliminer les échoulements de liquide et des polluants par filtration/ séparation dans le système de confinement du gaz.



**Figure (14) : Poste de filtrage et de détente de la gaze ERM.**

### 3-2-8-bâtiment contrôle commande :

Son rôle est de faire contrôler et commandé toute le système de la central et commandé toute le système de la centrale par un moyen informatique s'appelé DCS (Distriburbed Control System).



**Figure (15) : bâtiment contrôle commande.**

### 3-2-9-bâtiment de traitement de gazoile :

Le système de gasoil est conçu pour remplir les fonctions suivantes :

- Réception et conditionnement du gasoil jusqu'à l'obtention des niveaux de qualité requis par les modèles de turbines à gaz du cycle combiné de Koudiet.
- Stockage et distribution du gasoil aux services suivants :
- Trois (3) modules d'air d'atomisation des turbines à gaz où il est utilisé comme combustible de secours (un module pour chaque tranche).
- Deux (2) chaudières auxiliaires où il est utilisé comme combustible de secours.
- Un (1) réservoir de la pompe incendie à moteur diesel.
- Trois (3) réservoirs des groupes électrogènes de secours (un réservoir journalier par tranche).
- Un (1) réservoir de stockage de gasoil pour les groupes électrogènes de démarrage autonome (black Start).



**Figure (16) : bâtiment de traitement de gazoile.**

### 3-2-10-La station d'électrochloration :

La station d'électrochloration a pour objectif de générer une solution d'hypochlorite de sodium ( $\text{NaClO}$ ) à partir d'eau de mer par un procédé électrochimique d'électrolyse partielle du chlorure de sodium contenu dans l'eau de mer, réalisé avec des électrodes alimentées par un courant continu.

L'apport d'eau de mer pour l'électrochloration est fourni par Iberdrola. Les caractéristiques de l'eau de mer sont celles indiquées comme valeurs de conception.



**Figure (17) : La station d'électrochloration.**

### 3-2-11-Système de refroidissement :

#### a- Fonction :

Dans un cycle combiné, la vapeur générée dans la chaudière de récupération se détend dans la turbine à vapeur et doit être refroidie avant d'être admise de nouveau dans la chaudière. On distingue plusieurs types de systèmes de refroidissement :

- le système de refroidissement par eau à passage unique utilisé lorsque l'eau de refroidissement est disponible en grande quantité (en anglais, « once-through system ») ;
- le système de refroidissement par voie humide en circuit fermé au moyen de tours de refroidissement par évaporation;
- le système de refroidissement par voie sèche en circuit fermé au moyen d'aérocondenseurs.

Actuellement, le choix principal de CEEG/ KDM du système de refroidissement des centrales à cycle combiné s'oriente vers la sélection de l'eau de la mer méditerranée comme fluide de refroidissement.

Le système de refroidissement par eau de mer à passage unique. Les deux autres systèmes sont cités brièvement comme cas particuliers.

La fonction principale du système de refroidissement par eau de mer est d'alimenter les condenseurs et les autres systèmes de la centrale à cycle combiné en eau de refroidissement.

La station de pompage d'eau de mer de la centrale sert en premier lieu à faire circuler l'eau de mer au travers d'un condenseur destiné à condenser la vapeur basse pression qui provient de l'échappement de la turbine à vapeur. La chaleur dégagée par la vapeur est absorbée par l'eau de mer de circulation par transfert de chaleur dans les tubes du condenseur (tel que cela est décrit dans le guide technique n°8 – Poste d'eau) et est ensuite évacuée via un canal de rejet à la mer. Les condensats sortant du condenseur sont retournés au circuit eau/ vapeur de la chaudière de récupération.

Ainsi, l'eau de mer prélevée pour le refroidissement en circuit ouvert est intégralement restituée à la mer, sans dégradation autre qu'un réchauffement thermique.

À titre indicatif de l'ordre de grandeur du débit d'eau de mer, il faut savoir que pour une centrale à cycle combiné d'une puissance de 800 MW, la condensation de la vapeur de sa turbine de 240 MW nécessite un débit d'environ 22 000 m<sup>3</sup> /h.

Pour la protection des équipements du système de refroidissement et des échangeurs à eau de mer de la centrale, l'eau de mer est filtrée et traitée par injection d'hypochlorite de sodium avant d'être distribuée aux différents utilitaires de la centrale.

### **b-Sous système :**

Le système d'eau de refroidissement de la centrale comprend plusieurs sous-systèmes :

- **système de refroidissement en boucle ouverte** : c'est le circuit d'eau de mer qui assure la circulation à un seul passage de l'eau de mer à travers les échangeurs à eau de mer de la centrale.
- **système d'électrochloration** : c'est le système qui assure le traitement de l'eau de mer.
- **système de refroidissement en boucle fermée** : c'est le circuit d'eau déminéralisée qui assure le refroidissement des différents échangeurs de la centrale. Le fonctionnement de ce système doit être continu et permanent pendant tout le temps où la centrale est en production. Les besoins de l'eau de système de refroidissement sont fournis par la station de pompage.



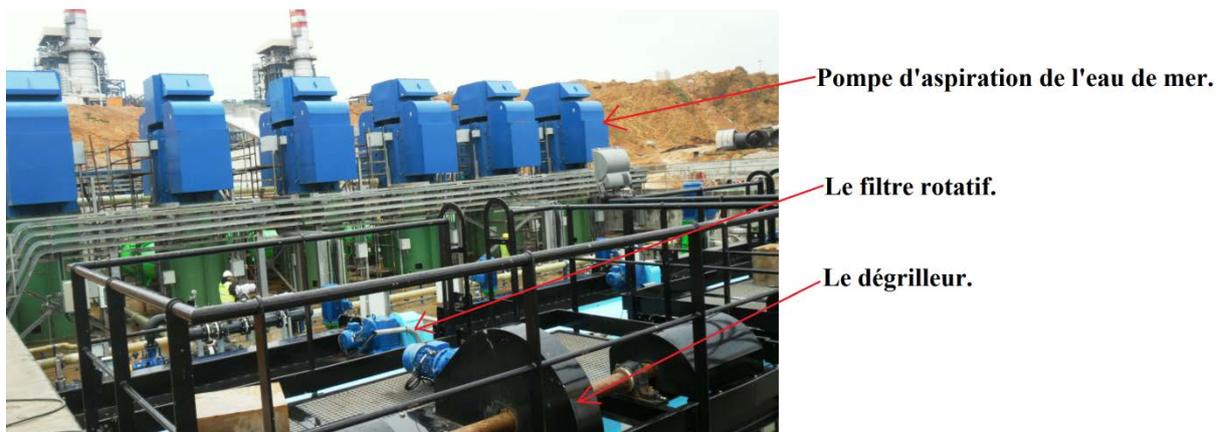
**Figure (18) : Système de refroidissement.**

### 3-2-12- Station de pompage de l'eau de mer :

Cette dernière est un bassin rectangulaire construit en béton armé et comprenant plusieurs chambres parallèles, indépendantes et isolables destinées à recevoir des pompes à raison d'une pompe par chambre. La conception de la station de pompage permet à la fois d'assurer une répartition uniforme du flux d'eau de mer sur l'ensemble pompes et de répondre aux conditions hydrauliques nécessaires pour le fonctionnement optimal des pompes. Chaque chambre doit être conçue pour permettre son isolement pour entretien sans porter atteinte au bon fonctionnement des autres pompes ; fonctionnement et sans augmentation significative de la vitesse de l'eau dans les autres chambres.

La station de pompage accueille l'ensemble des composants suivant :

- 6 dégrilleurs ;
- 6 filtres rotatifs ;
- 6 pompes d'aspiration de l'eau de mer.



**Figure (19) : Station de pompage de l'eau de mer.**

#### a-Le dégrilleur :

La grille est composée de barreaux fixés à un cadre (soudés ou boulonnés) et espacés de quelques millimètres pour bloquer le passage de débris et matières flottantes. Les grilles peuvent

être verticales ou légèrement inclinées pour faciliter le passage du dégrilleur qui assure l'enlèvement des débris. Elles peuvent aussi être de forme courbée.

Chaque grille doit être équipée d'un dégrilleur automatique équipé d'un dispositif de relevage et d'éjection automatique des débris vers une benne afin d'assurer leur évacuation.

Le dégrilleur est constitué essentiellement des éléments suivants :

- un râteau doté d'un peigne pour soulever les débris et dégager la grille;
- un moteur pour actionner le mouvement ascendant et descendant du râteau;
- une benne pour la récupération des débris;

Les grilles / dégrilleurs sont également dotés de mesure de niveau (en amont et en aval de chaque grille) ainsi que d'un panneau de contrôle commande.

L'évacuation des débris peut se faire également via un tapis roulant qui recueille les débris de toutes les grilles et les déverse vers une benne commun.



**Figure (20) : Le dégrilleur.**

### **b-Le filtre rotatif :**

Après un filtrage grossier par la grille, l'eau de circulation est canalisée vers les filtres rotatifs, habituellement du type à bande, chacun comprenant essentiellement :

- des panneaux filtrants modulaires, chaque module étant constitué d'un cadre supportant un élément filtrant en toile de fils d'acier inoxydable;
- des joints d'étanchéité latéraux et longitudinaux;
- des chaînes porte-panneaux à mailles destinées à supporter et à mettre en mouvement les panneaux filtrants;
- un chemin de guidage de la chaîne porte-panneau en acier inox et rails de roulements;
- un mécanisme d'entraînement muni d'un capot de protection et comprenant notamment : l'arbre principal, les paliers, le moteur électrique, l'accouplement, le réducteur, le pignon d'entraînement, les dispositifs mécanique de sécurité contre les surcharges et blocages, fin de course;

- un dispositif mesurant la différence de niveau entre l'amont et l'aval de chaque filtre;
- une protection cathodique;
- un panneau de contrôle commande ainsi que toute l'instrumentation nécessaire au bon Fonctionnement de l'installation.

Les filtres rotatifs disposent d'un système de lavage destiné à nettoyer les panneaux filtrants en pulvérisant de l'eau sur leur face interne.



**Figure (21) : Le filtre rotatif.**

### **c-La pompe d'aspiration de l'eau de mer :**

#### **c-1-Dispositions :**

Gamme NM 10 bars, 6 grandeurs (12 hydrauliques) désignées par l'orifice de refoulement et le type d'hydraulique.

Hydraulique E (petit débit) et L (grand débit) disponible sur chaque taille pour assurer une couverture optimale des débits.

Equilibrage des poussées radiales et axiales réalisé par diffuseurs et joints hydrauliques avec chambre d'équilibrage à chaque étage.

Flasques de roues et corps d'étage usinés garantissent des performances hydrauliques élevées et répétées.

Construction soignée et robuste avec diffuseurs à ailettes fermés tenus par l'empilage des corps d'étage.

Bride d'aspiration et refoulement orientables tous les 90° pour une adaptation aisée aux tuyauteries existantes.

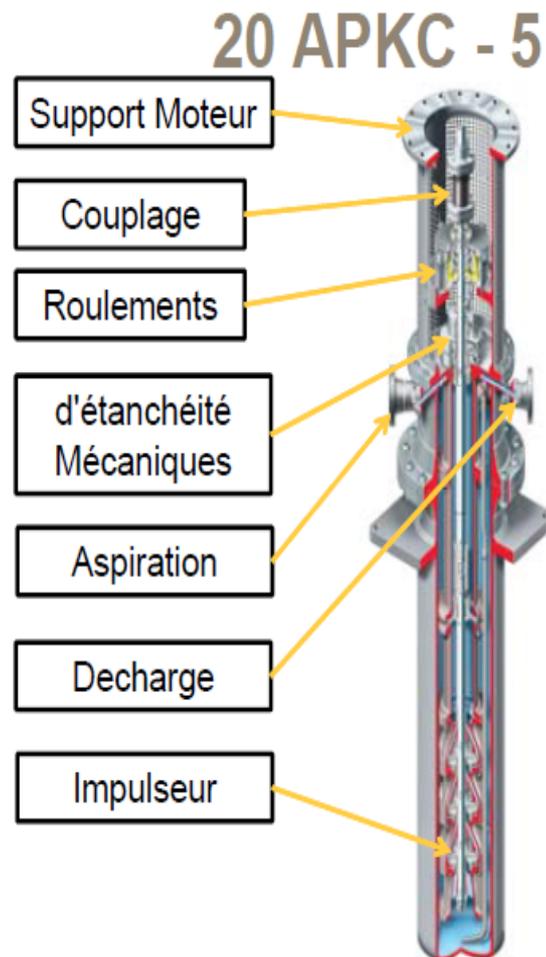
#### **- NMD, NMAD :**

-Disposition verticale posée et moteur porté.

-Accouplement semi-élastique (NMD), accouplement rigide (NMAD), avec boîte de butée équipée de roulements à billes lubrifiés à la graisse.

- Aspiration et refoulement latéraux orientables.
- Coussinet inférieur lubrifié par le liquide pompé.
- Etanchéité réalisée par une garniture à tresse ou mécanique.
- Encombrement au sol réduit. [1]

### c-2-Conception :



### 4-Conclusion :

Après le stage pratique de l'entreprise de sharikat hahraba koudiet eddraouch (skd), on a constaté que cette entreprise se constitue de trois unités identiques. Leur source d'énergie principale est le gaz et le gasoil comme énergie de secours en cas d'absence de gaz.

Chaque unité produit 400 MW, l'entreprise recouvre 15 % de la production nationale. Elle est la dernière en date de particularités de technologie de cycle combiné.

Chaque unité est basée sur le système de refroidissement par l'eau de la mer qui est ramené par la station de pompage qui se caractérise par les six moteurs de pompage.

Vue que les six moteurs son le noyau de ses pompe, on a constatée qu'ils sont des problèmes au niveau des roulements ce qui ma dirigée pour faire une étude approfondie pour trouve la cause de problème.

## La maintenance Généralités

### 1- Concepts objectifs et politique de maintenance :

#### 1-1 Introduction :

La maintenance s'inscrit parmi les contraintes que rencontre tout exploitant d'une installation industrielle. Plus généralement, une installation de production nécessitant un ensemble de moyens matériels et humains n'est en mesure d'assurer le service qu'on lui demande qu'après avoir surmonté diverses contraintes, dont la maintenance des équipements de production utilisés. Construire une usine ou un atelier ne sert à rien en l'absence de production significative, ou de personnel qualifié, ou d'un système d'organisation permettant le maintien en état des installations. Ce constat explique la tendance actuelle de l'usine vendue « *produit en main* », alors que celle jadis universellement adoptée correspond à l'usine livrée « *clés en main* ». Il faut donc penser, dès que l'on conçoit une nouvelle installation, aux moyens qui seront nécessaires pour sa future exploitation. On ne compte plus les échecs économiques, notamment dans les pays en voie de développement, pour cause de déficience de main d'œuvre suffisamment qualifiée, tant en production qu'en maintenance, et pour manque de moyens appropriés. Des rapports de l'Organisation des Nations Unies pour le développement Industriel (ONUDI) indiquent qu'environ 40% des usines restent inutilisées. La production et la maintenance sont donc indissociables.

L'histoire de la maintenance peut se décomposer en trois étapes :

D'abord la période où les machines étaient simples et peu nombreuses, mais la main d'œuvre de fabrication est importante, la maintenance était très élémentaire et son budget était noyé dans les frais généraux de l'entreprise.

Dans une seconde période, avec le développement du machinisme, la main d'œuvre diminue et, en valeur relative, la maintenance prend plus d'importance, Elle a son budget autonome. Cette situation existe encore dans de nombreuses entreprises.

Une troisième période s'est ouverte avec le développement de l'automatisme. Dans les industries de processus, la plus grande part des effectifs de production appartient à la maintenance, dont les coûts et le budget se sont considérablement accrus. Le rapport entre les effectifs de maintenance et ceux de la fabrication est passé de 1/50 à 1/5.

### 1-2-Définition de la maintenance :

Ce n'est pas seulement réparer ou dépanner au moindre coût ou remettre en état dans les plus brefs délais. Ce n'est pas non plus maintenir les installations en marche à tout prix ou assurer une sécurité de fonctionnement élevée, coûte que coûte, pour atteindre une disponibilité maximale mais non rentable. La maintenance commence dès la conception du matériel : il faut qu'il soit apte à être entretenu (notion de maintenabilité), ensuite à produire, son utilisation doit être aisée et sa sécurité maximale. Pendant toute sa vie de production la maintenance surveille le matériel, suit ses dégradations et le remet à niveau avec un contrôle des performances, une surveillance des coûts et disponibilités en recherchant les solutions les plus simples. En fin de vie, la maintenance propose d'abord une diminution des performances compatible avec les possibilités du matériel et enfin son renouvellement.

Le ratio qui englobera tous ces aspects de la maintenance sera :

$$\frac{\text{Coût total (achat et maintenance)} + \text{Pertes de production}}{\text{Service rendu}}, \text{ doit être minimum.}$$

Il est possible aussi de condenser tout ceci dans la définition de l'AFNOR (Association Française de Normalisation) :

**«La maintenance est l'ensemble des actions<sup>1</sup> permettant de maintenir<sup>2</sup> ou de rétablir<sup>3</sup> un bien<sup>4</sup> dans un état spécifiés<sup>5</sup> ou en mesure d'assurer un service déterminés<sup>6</sup>»** en lui ajoutant **«au coût optimal<sup>7</sup>»**.

### **1-3- Importance de la maintenance dans l'entreprise :**

Aucune autre fonction dans une installation de production, à l'exception peut être de la recherche et du développement (bureau d'études), n'implique une aussi large gamme d'activités que celle de la maintenance. Dans le management de cette fonction, abondent les problèmes de planning, d'approvisionnement, de personnel, de contrôle de qualité, de gestion et des problèmes techniques. La maintenance embrasse toutes les activités, comme si elle constituait une industrie propre. Dans certaines usines, notamment dans l'industrie chimique, l'importance de cette fonction est égale à celle de la production, et son personnel est souvent plus nombreux que le personnel de production. Ceci n'est évidemment pas le cas dans les petites entreprises, mais les mêmes problèmes s'y posent également. Par suite de la large gamme d'activités dans la fonction de maintenance, celle-ci ne peut être satisfaisante que si ces activités sont aussi bien définies que celle de la production. Il y avait souvent une grave disparité entre la production et la maintenance. Mais, les ennuis de la production ne peuvent être évités que par une maintenance efficace.

Pendant longtemps, la maintenance était considérée comme une fatalité, cependant, le progrès technologique ainsi que l'évolution de la conception de la gestion des entreprises ont fait que la maintenance est devenue de nos jours une fonction importante de l'entreprise dont la direction exige l'utilisation de techniques précises et dont le rôle dans l'atteinte des objectifs de l'entreprise est loin d'être négligeable. Ainsi, la fonction maintenance est devenue l'affaire de tous et doit être omniprésente dans les entreprises et les services. Elle est devenue un enjeu économique considérable pour tous les pays qui souhaitent disposer d'outils de production disponibles et performants. Si l'entretien ne se traduisait que par des interventions, nous pouvons dire que la maintenance est tout autre chose. C'est d'abord un état d'esprit, une manière de penser, ensuite une discipline nouvelle dotée de moyens permettant d'intervenir dans de meilleures conditions, d'appliquer les différentes méthodes en optimisant le coût

global. La maintenance vise à éviter les pannes et les temps morts que celles-ci entraînent. La maintenance ne doit pas être perçue comme une fonction secondaire et elle doit bénéficier de toute l'attention voulue.

Actuellement la modernisation de l'outil de production impose une évolution fondamentale dans le domaine de maintenance. Cette évolution se traduit par un changement profond pour les entreprises (remplacement de la fonction entretien par la fonction maintenance), par une évolution de mentalités. Cette mutation nécessite des structures nouvelles, des moyens nouveaux et pour le personnel un état d'esprit de "maintenance".

La maintenance est devenue une des fonctions de l'entreprise contemporaine, mais elle n'est pas une fin en soi. A ce titre, elle est peu lisible et parfois méconnue des décideurs qui sous-estiment son impact. Et pourtant, elle devient une composante de plus en plus sensible de la performance de l'entreprise. Il est donc important de la faire mieux connaître. Concevoir, produire et commercialiser sont des fonctions naturelles facilement identifiables et rarement négligées. Par contre, la maintenance n'est qu'un soutien à la production, son principal client.

C'est donc une fonction masquée, agissant comme prestataire de service interne et, de plus, fortement évolutive. Bien organisée, elle est un facteur important de qualité, de sécurité, de respect des délais et de productivité, donc de compétitivité d'une entreprise évoluée.

En plus de ce qui a été dit, le terme de maintenance désigne, au sein de l'entreprise, plusieurs catégories de travaux notamment :

- Surveillance et travaux simples (nettoyage, graissage, etc.) généralement dévolus aux utilisateurs du matériel ou des installations,
- contrôle de fonctionnement et travaux plus complexes que les précédents, souvent effectués par des spécialistes,
- Dépannage et réparation en cas d'incident confiés à des ouvriers ou des équipes spécialisées,

- Entretien systématique comportant des révisions partielles ou totales, faites sur place ou dans un atelier spécialisé,
- reconstruction complète de machines ou d'installations, constituant une véritable remise à l'état neuf.

#### **1-4-Objectifs de la maintenance dans l'entreprise :**

Dépanner, réparer au moindre coût, arrêter les machines le moins longtemps possible étaient les consignes données au chef d'entretien. L'intégration du service entretien dans l'entreprise s'arrêtait à la marche des machines. Mais on ne fait pas un programme de fabrication valable sans tenir compte des possibilités des matériels. Il faut que la maintenance participe aux définitions des programmes. Dans ces conditions, les objectifs à demander à un service maintenance sont

- Assurer la production prévue.
- Maintenir la qualité du produit fabriqué.
- Respecter les délais prévus.
- Recherche des coûts optima.
- Objectifs d'aspect humain.
- Préserver l'environnement.

#### **1-5 Politique de la maintenance dans l'entreprise :**

##### **1-3-1 Définition et stratégie :**

Les politiques d'entretien ou de maintenance vont de l'absence totale à des définitions très élaborées. Souvent le responsable est abandonné à sa seule initiative, la consigne étant que les machines tournent au moindre frais. La prévision est inconnue : on voit des révisions générales stoppées parce qu'on remplace la machine, et des machines laissées à l'abandon alors qu'elles vont être très sollicitées. Dans d'autres cas la direction fixe à la maintenance et en accord avec elle des objectifs précis ainsi que les moyens nécessaires, ceci pour un temps déterminé. A échéance on fait le point et on révisé les objectifs. Le responsable d'entretien connaît donc la ligne à suivre et conserve le maximum de liberté dans les décisions d'action prises à son niveau. Une véritable politique ou

stratégie de maintenance doit combiner des moyens d'intervention, techniques, économiques, financiers et humains. Elle est fondée sur la rentabilité. Elle tient compte des moments. Tantôt on recherchera le coût minimum en période d'austérité, tantôt le maximum de disponibilité en période de croissance. Des études de fiabilité permettent de définir les probabilités de panne donc les moyens nécessaires. Un contrôle de gestion permet de vérifier que la maintenance se trouve au voisinage de l'optimum, et que les choix sont effectués en fonction des gains escomptés : une dépense importante peut être plus rentable qu'une dépense moindre s'il y a gain de délai, ou de durée de vie, ou de disponibilité ou de qualité sur le produit.

Une étude a montré que les politiques de maintenance sont rarement définies et qu'elles existent très rarement sous forme écrite. Citons l'American Management Association,

**-Control of Maintenance Costas :** « Les politiques de maintenance sont ordinairement issues de l'expérience, de façon assez empirique, au lieu d'avoir été conçues pour réaliser des objectifs spécifiques à la maintenance. Relativement peu d'entreprises disposent de politiques écrites de maintenance. L'uniformité et la continuité de ces politiques tendent à manquer, car elles existent surtout dans la tête des chefs de l'entretien. Cette situation peut partiellement être attribuée au peu d'attention qu'attribue la direction à la maintenance. On peut trouver une explication encore meilleure dans les difficultés rencontrées pour appliquer l'analyse quantitative à l'établissement des objectifs de maintenance. »

### **1-3-2 Gestion de la politique de maintenance :**

La gestion de la politique de maintenance préalablement établie ne doit pas se reposer uniquement sur l'aspect financier, sinon elle aura pour but de réduire au minimum les coûts de maintenance sans trop se soucier de l'intérêt majeur de l'entretien, car on cherche toujours à ne pas trop dépenser dans le cadre d'un exercice déterminé, ce qui donne la conception selon laquelle

l'entretien coûte et ne rapporte rien, en oubliant que sans entretien, on ne peut pas produire. Les politiques sont des principes directeurs qui aident à atteindre l'objectif défini d'une fonction. Elles indiquent l'action à entreprendre pour remédier aux situations qui se produisent. Pour vérifier la validité d'une politique, nous pouvons nous demander : « Nous aide-t-elle à résoudre efficacement un problème existant ? » ou « Remédie-t-elle sans difficulté à une situation récurrente ? ».

Les politiques portant sur le fonctionnement de la maintenance peuvent être subdivisées en cinq groupes comme suit :

1. domaine et limites de la maintenance ;
2. type et niveau de service attendu ;
3. responsabilités auprès de la direction ;
4. pratiques du personnel ;
5. budget et contrôles financiers.

L'avantage qu'il y a à définir et à utiliser des politiques est le fait que la direction peut aviser tous les niveaux de ses intentions. Les politiques étendent et limitent à la fois l'autorité puisqu'elles garantissent l'action des gens dans le domaine tout entier permis par la définition.

En l'absence de politique, les gens tendent à exagérer leurs limitations, de sorte qu'ils ne se surmènent pas et qu'ils n'accroissent pas leurs responsabilités. Les fonctions que l'on attend du service maintenance ne sont pas évidentes. Il arrive souvent que certaines fonctions ne sont spécifiées explicitement qu'en partie, d'autres sont supposées, certaines sont assignées à la maintenance en l'absence d'autres responsables et d'autres enfin semblent ne venir de nulle part. Il n'y a rien de mal à faire ce qui doit être fait, mais il est important de se rendre compte que rien ne va plus lorsque la maintenance supporte une trop lourde charge extérieure. Quand cela se produit, ni la maintenance ni la direction ne peuvent voir la réalité en face. Seules les politiques de maintenance nous permettront de définir ce que l'on attend, réellement de la maintenance.

### **1-3-3- Groupes de politiques de maintenance :**

Le premier groupe de politiques de la liste suscitée détermine le sens propre du terme de maintenance et ce qui est exclu. Il vaut mieux sous-traiter certains travaux, par exemple l'entretien des balances et des bascules, le goudronnage des toits ou la réparation des appareils électriques, en tenant compte des aptitudes spéciales nécessaires. D'autres travaux pourraient être sous-traités à la suite des charges saisonnières, par exemple la révision des installations pendant les fermetures.

Le second groupe de politiques porte sur la quantité et l'intensité que l'on attend de la maintenance pour répondre aux besoins de production. Ces politiques devraient refléter les objectifs de la maintenance. Faute d'être un engagement financier de la part de la direction, ces politiques indiquent comment l'on attend que ce service soit « rendu ». Le niveau du service, son intensité et son choix dépendent de l'équilibre entre les frais engagés et les objectifs fonctionnels de l'entreprise. S'il s'agit avant tout d'économiser, le niveau du service peut être abaissé. Le niveau opérationnel présente cependant deux aspects : la performance de l'installation et son aspect extérieur. Le premier se prête à une quantification, c'est-à-dire l'état mécanique qui se manifeste dans la quantité et la qualité des produits et dans le pourcentage de fonctionnement sans panne. L'aspect extérieur est déterminé principalement par la politique de l'entreprise. Les entreprises qui veulent améliorer les relations avec leurs clients peuvent désirer une présentation du type « vitrine de magasin ». En agissant ainsi, l'on s'attend souvent à ce que l'attitude du personnel soit aussi favorablement influencée. Donc, les politiques serviront à établir clairement les normes du niveau de maintenance pour réaliser à la fois de bonnes performances et une excellente présentation. La simple action consistant à définir les politiques et à les adopter aura des effets bénéfiques aussi bien sur la direction que sur la maintenance en développant une meilleure coopération et en supprimant de nombreux sujets de friction. Le plus grand nombre de conflits

entre la maintenance et les autres départements se rencontre dans le domaine des priorités. La meilleure façon pour éviter ces frictions est l'établissement des priorités.

Le groupe suivant de politiques porte sur la dépendance de la direction dans laquelle se trouve la maintenance. Il y a souvent des problèmes d'autorité pour agir, pour approuver un certain travail et pour commander les pièces de rechange. Il est banal d'affirmer que les directeurs et les cadres de la maintenance doivent être motivés, et qu'ils ne doivent être en aucun cas démotivés. En réduisant l'autorité, la direction refuse de donner au responsable de la maintenance l'occasion de prouver sa compétence à son propre personnel, et de prouver à l'entreprise son aptitude à diriger. Rien n'est plus décevant pour le cadre de la maintenance que de tenter de faire correctement son travail avec un équipement médiocre et une pénurie de pièces détachées, tout en recevant des reproches pour frais excessifs. Cette situation se produit lorsque les budgets sont fixés arbitrairement ou pas du tout, ou lorsque les dépenses exigent une longue procédure d'absorption.

Les politiques concernant le personnel de maintenance doivent porter sur les points suivants :

- a) le nombre, rapporté à l'échelle des opérations ;
- b) les méthodes de choix, de formation et de promotion ;
- c) les aptitudes professionnelles ;
- d) le nombre de contrôleurs et les pratiques de contrôle ;
- e) l'échelle des salaires et les stimulants ;
- f) les programmes de sécurité.

Comme nous avons vu, l'adoption de politiques bien choisies fournit une charte opérationnelle qui aidera la direction, la production et la maintenance. L'établissement des politiques exige de disposer des informations voulues sur l'entreprise et la nécessité de coordonner les besoins existants avec les moyens

disponibles. L'étude détaillée et son incorporation dans un «manuel de service» poseront un important jalon dans le travail de l'équipe de maintenance.

On doit fixer des politiques qui permettent au département de fonctionner sans dépasser les limites de dépenses requises. On devra pouvoir tenir compte du véritable état de l'installation et de son usage, de l'achat des pièces détachées et des matières premières et de l'outillage pour la maintenance.

Généralement le budget affecté au service de maintenance (budget empirique) est annuel et fonction des dépenses antérieures. Il est préparé à partir de l'analyse d'observation des différents éléments réunis dans le passé (base statistique) et dans le courant de l'année précédente et pour une date déterminée.

Une conjoncture différente peut le remettre en cause car ses objectifs sont essentiellement financiers. Les politiques de budget ne doivent pas déterminer les montants à distribuer, qui sont variables, mais bien leurs limites grâce à des ratios ou autres repères. Il faudra\* également décider de quelle façon la direction exercera son contrôle. Ce groupe de politiques doit également couvrir la nature des habitudes de compte rendu. Deux buts seront ainsi remplis : exiger des comptes rendus de maintenance et, en même temps, obliger la direction à y prendre intérêt. Un sous-produit des comptes rendus est l'exercice de contrôles.

Les politiques répondront à des questions comme « Quelles sont les activités que doivent refléter ces contrôles ? » ou « Quelle est la précision demandée et la fréquence des comptes rendus ? » Remarquons que si l'on suit cette méthode, on pourra résoudre la plupart des problèmes soulevés par l'attitude de la direction envers la maintenance.

#### **1-3-4 Choix des objectifs :**

La politique de maintenance implique la prise de décision sous forme de compromis entre les quatre pôles : humain, économique, financier et technique.

#### **a) Exemples de politique de maintenance :**

La liste suivante peut être donnée à titre indicatif.

1- Accroître la disponibilité des matériels de production.

- 2- Réduire les coûts de maintenance des matériels de production.
- 3- Permettre une production de haute qualité.
- 4- Diminuer les pertes de production.
- 5- Augmenter la productivité du personnel de maintenance.
- 6- Réduire les stocks liés à la maintenance.
- 7- Améliorer l'efficacité de l'ordonnancement (moins « d'improvisations »).
- 8- Définir une politique d'approvisionnement.
- 9- Définir les conditions de renouvellement ou d'investissement.
- 10- Définir une politique de recours à des entreprises extérieures.
- 11- Optimiser la répartition entre la maintenance corrective et la maintenance préventive.
- 12- Choisir la méthode de maintenance la mieux adaptée à un matériel donné.

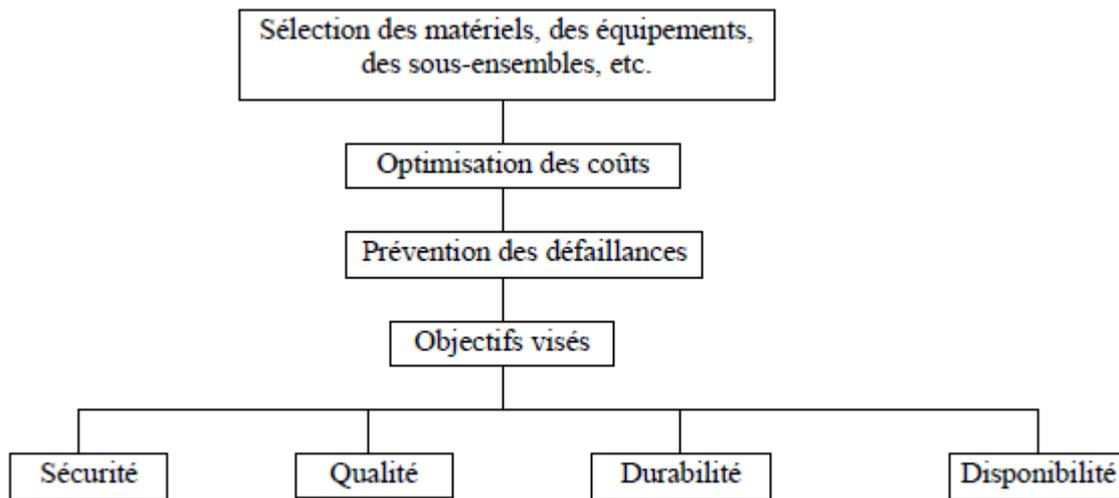
**b) Une fois un objectif clairement défini, et en se limitant au domaine de la maintenance opérationnelle, nous devons encore raisonner en terme de choix :**

- Quelle méthode à mettre en œuvre ?
- Préventive ou corrective ?
- Quel niveau de maintenance préventive ?
- Quelle forme de maintenance préventive ?
- A quelle périodicité intervenir ?
- Quand remplacer un équipement ?
- Quand faut-il cesser la maintenance ?
- Comment introduire une politique de maintenance efficace ?

### **1-3-5-La mise en œuvre d'une politique de maintenance :**

Sachant que les responsables opérationnels n'ont pas le pouvoir de définir la politique, nous pouvons dire qu'elle relève des décisions de la direction générale. Un certain retard a été pris dans ce domaine, trop peu de directions sont informées de l'existence d'outils d'aide à la décision ou de l'élaboration de doctrines permettant la réalisation d'une maintenance efficace et économique.

Une politique de maintenance peut s'articuler et s'organiser autour du concept suivant :



Ce concept implique des moyens définis, compris, admis et réalisables par l'équipe de maintenance. La mise en place d'une politique de maintenance implique :

- a- Une volonté et une bonne compréhension de la direction générale.
- b- Des structures compatibles avec la fonction maintenance.
- c- Dotation en moyens humains.
- d- Dotation en moyens financiers.
- e- Dotation en moyens matériels.
- f- Maîtrise des flux de communication.

## **2- Définition, Méthodes et opération de la maintenance.**

### **2-1 Introduction :**

Lorsque la politique ou la stratégie de maintenance est définie, on doit choisir ensuite la méthode la plus appropriée pour atteindre les objectifs fixés, le choix de cette méthode dépendra également d'autres paramètres à savoir :

- La connaissance du matériel, de son âge, de son état et de la durée de vie de ces différents organes.
- La probabilité de pannes ; faible ou élevée.
- La facilité d'intervention.

- La possession en stock de pièces de rechange.
- Les moyens disponibles au moment de l'intervention.

### **2-2-Les méthodes de la maintenance :**

Le choix entre les méthodes de maintenance s'effectue dans le cadre de la politique de la maintenance et doit s'opérer en accord avec la direction de l'entreprise.

Pour choisir, il faut être informé des objectifs de la direction, des décisions politiques de maintenance, mais il faut aussi connaître le fonctionnement et les caractéristiques des matériels ; le comportement du matériel en exploitation ; les conditions d'application de chaque méthode ; les coûts de maintenance et les coûts de perte de production.

#### **2-2-1.-La maintenance corrective :**

**-Définition :** « Maintenance effectuée après défaillance. »

**-Défaillance :** « Altération ou cessation de l'aptitude d'un bien à accomplir la fonction requise. »

On distingue deux formes de défaillance : la défaillance partielle et la défaillance complète.

**-Défaillance partielle :** « Altération de l'aptitude d'un bien à accomplir les fonctions requises. »

**-Défaillance complète :** « Cessation de l'aptitude d'un bien à accomplir la fonction requise. »

La maintenance corrective a pour objet de redonner au matériel des qualités perdues nécessaires à son utilisation.

Les défauts, pannes ou avaries diverses exigeant une maintenance corrective entraînent une indisponibilité immédiate ou à très brève échéance des matériels affectés ou / et une dépréciation en quantité ou / et en qualité des services rendus.

### 2-2-2 La maintenance préventive :

**-Définition** : «Maintenance effectuée selon des critères prédéterminés, dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu. »

Elle doit permettre d'éviter des défaillances des matériels en cours d'utilisation. L'analyse des coûts doit mettre en évidence un gain par rapport aux défaillances qu'elle permet d'éviter.

#### **-But de la maintenance préventive :**

- Augmenter la durée de vie des matériels ;
- Diminuer la probabilité des défaillances en service ;
- Diminuer le temps d'arrêt en cas de révision ou de panne ;
- Prévenir et aussi prévoir les interventions de la maintenance corrective coûteuse ;
- Permettre de décider la maintenance corrective dans de bonnes conditions ;
- Eviter les consommations anormales d'énergie, de lubrifiant, etc.;
- Diminuer le budget de la maintenance ;
- Supprimer les causes d'accidents graves.

### 2-2-3- La maintenance préventive systématique :

**-Définition** : « Maintenance préventive effectuée selon un échancier établi selon le temps ou le nombre d'unités d'usage. »

Cette périodicité d'intervention est déterminée à partir de la mise en service ou après une révision partielle ou complète.

**-Remarque** : Même si le temps est l'unité la plus répandue, d'autres unités peuvent être retenues telles que : la quantité de produits fabriqués ; la longueur de produits fabriqués ; la distance parcourue ; la masse de produits fabriqués ; le nombre de cycle effectué ; etc.

**-Conditions d'applications :**

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

**-Remarque :** De plus en plus les interventions de la maintenance systématique se font par échanges standards.

**2-2-4- La maintenance préventive conditionnelle :**

**-Définition :** « Maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé, (autodiagnostic, information d'un capteur, mesure d'une usure, etc.), révélateur de l'état de dégradation du bien. »

**-Remarque :** la maintenance conditionnelle est donc une maintenance dépendant de l'expérience et faisant intervenir des informations recueillies en temps réel. On l'appelle parfois maintenance prédictive.

**-Conditions d'applications :**

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

**-Cas d'application :**

Tous les matériels sont concernés. Cette maintenance préventive conditionnelle se fait par des mesures pertinentes sur le matériel en fonctionnement.

**3-Conclusion :**

Pour être efficace, la méthode de maintenance proposée, doit dans tous les cas être comprise et admise par les responsables de production et avoir l'adhésion de tout le personnel.

Ces méthodes doivent être dans la mesure du possible standardisées entre les différents secteurs (production et périphériques). Ce qui n'exclut pas l'adaptation essentielle de la méthode au matériel (par exemple à un ensemble

de machines, à une machine ou à un organe). Avec l'évolution actuelle des matériels et leurs tendances à être plus fiables, la proportion des pannes accidentelles sera mieux maîtrisée. La maintenance préventive diminuera quantitativement d'une façon systématique mais s'améliorera qualitativement par la maintenance conditionnelle. La maintenance préventive, hier expérimentale et subjective, tend aujourd'hui à devenir plus scientifique.

#### **4- Opération de maintenance :**

##### **4-1- Opération de maintenance corrective :**

Ces opérations peuvent être classées en trois groupes d'actions.

- Le premier groupe concerne la localisation de la défaillance ; il comprend les opérations suivantes : le test, la détection, le dépistage et le diagnostic.
- Le deuxième groupe concerne les opérations de la remise en état ; il comprend les opérations suivantes : le dépannage, la réparation et la modification soit et du matériel ou du logiciel.
- Le troisième groupe concerne la durabilité ; il comprend les opérations suivantes : la rénovation, la reconstitution et la modernisation.

##### **4-1-1-La localisation de défaillances :**

C'est l'action qui conduit à rechercher précisément le (les) élément(s) par le(s) quel(s) la défaillance se manifeste.

**-Le test :** c'est une opération qui permet de comparer les réponses d'un système à une sollicitation appropriée et définie, avec celles d'un système de référence, ou avec un phénomène physique significatif d'une marche correcte.

**-La détection :** c'est l'action de déceler au moyen d'une surveillance accrue, continue ou non, l'apparition d'une défaillance ou l'existence d'un élément défaillant.

**-Le dépistage :** c'est une action qui vise à découvrir les défaillances dès leur début par un examen systématique sur des équipements apprenant en état de fonctionnement.

**-Le diagnostic :** c'est l'identification de la cause probable de la (ou les ) défaillance(s) à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test. Le diagnostic permet de confirmer, de compléter ou de modifier les hypothèses faites sur l'origine et la cause des défaillances et de préciser les opérations de maintenance corrective nécessaires.

#### **4-1-2- La remise en état :**

La remise en état de fonctionnement peut consister à réaliser l'une des opérations suivantes.

##### **-Le dépannage :**

###### **a) Définition :**

C'est une action sur un bien en panne, en vue de le remettre en état de fonctionnement

compte tenu de l'objectif, une action de dépannage peut s'accommoder de résultats provisoires et de conditions de réalisation hors règles de procédures, de coûts et de qualité, et dans ce cas sera suivie de la réparation.

###### **b) Conditions d'applications :**

Le dépannage, opération de maintenance corrective, n'a pas de conditions d'applications particulières. La connaissance du comportement du matériel et des modes de dégradation n'est pas indispensable même si cette connaissance permet souvent de gagner du temps.

Souvent les interventions de dépannage sont de courtes durées mais peuvent être nombreuses.

De ce fait les services de maintenance, soucieux d'abaisser leurs dépenses, tentent d'organiser les actions de dépannage. D'ailleurs certains indicateurs de maintenance, pour mesurer son efficacité, prennent en compte le problème du dépannage.

**-La réparation :****a) Définition :**

C'est une intervention définitive et limitée de maintenance corrective après défaillance.

**b) Conditions d'applications :**

L'application de la réparation, opération de maintenance corrective, peut être décidée, soit immédiatement à la suite d'un incident, ou d'un d'une défaillance, soit après dépannage, soit après une visite de maintenance préventive conditionnelle ou systématique.

**c) Cas d'application :**

Tous les équipements sont concernés.

**4-1-3- La durabilité :**

La durabilité est la durée de vie ou durée de fonctionnement potentielle d'un bien pour la fonction qui lui a été assignée dans des conditions d'utilisation et de maintenance données.

Les opérations maintenance qui concernent la durabilité d'un bien sont les suivantes.

**-La rénovation :** inspection complète de tous les organes, reprise dimensionnelle complète ou remplacement des pièces déformées, vérification des caractéristiques et éventuellement réparation des pièces et sous-ensembles défaillants, conservation des pièces bonnes.

La rénovation apparaît donc comme l'une des suites possibles d'une révision générale au sens strict de sa définition.

**-La reconstitution :** remise en l'état défini par le cahier des charges initial, qui impose le remplacement de pièces vitales par des pièces d'origine ou des pièces neuves équivalentes. La reconstruction peut être assortie d'une modernisation ou de modifications.

Les modifications apportées peuvent concerner, en plus de la maintenance et de la durabilité, la capacité de production, l'efficacité, la sécurité, etc.

-**La modernisation** : remplacement d'équipements, accessoires et appareils ou éventuellement de logiciel apportant, grâce à des perfectionnements techniques n'existant pas sur le bien d'origine, une amélioration de l'aptitude à l'emploi du bien.

Cette opération peut aussi bien être exécutée dans le cas d'une rénovation, que celui d'une reconstruction.

La rénovation ou la reconstruction d'un bien durable peut donner lieu, pour certains de ses sous-ensembles, à la pratique d'un échange standard.

-**Echange standard** : c'est la reprise d'une pièce, d'un organe ou d'un sous-ensemble usagé, et vente au même client d'une pièce, d'un organe ou d'un sous-ensemble, neuf ou remis en état conformément aux spécifications du constructeur, moyennant le paiement d'une soulte dont le montant est déterminé d'après le coût de remise en état.

-**Soulte** : somme d'argent qui, dans un échange ou dans un partage compense l'inégalité de valeur des lots ou des biens échangés. Afin d'accélérer les procédures et de diminuer les coûts, le recouvrement de la soulte peut être forfait.

#### **4-2- Opération de maintenance préventive :**

Ces opérations peuvent être classées en quatre groupes d'actions.

- Le premier groupe concerne l'entretien ; il comprend les opérations suivantes : le nettoyage, la dépollution et le retraitement de surface.
- Le deuxième groupe concerne la surveillance ; il comprend les opérations suivantes : l'inspection le contrôle et la visite.
- Le troisième groupe concerne la révision ; il comprend les opérations suivantes : la révision partielle et la révision générale.
- Le quatrième groupe concerne la préservation ; il comprend les opérations suivantes : la mise en conservation, la mise en survie et la mise en service.

#### **4-2-1- L'entretien :**

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

#### **4-2-2-La surveillance :**

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

#### **4-2-3-La révision :**

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

#### **4-2-4- La préservation :**

Elle comprend les opérations suivantes.

- La mise en conservation.
- La mise en survie.

#### **4-2-5-Les activités connexes de la maintenance :**

Ces activités complètent les actions de la maintenance citées ci-dessus et participent pour une part non négligeable à l'optimisation des coûts d'exploitation.

#### **4-2-6 Les travaux neufs :**

L'adjonction à la fonction maintenance de la responsabilité des travaux neufs, est très répandue, en particulier dans les entreprises de taille moyenne. Elle part du principe que, lors de tout investissement additionnel de remplacement ou d'extension, il est logique de consulter les spécialistes de la maintenance qui, d'une part, connaissent bien le matériel anciennement en place, et d'autre part auront à maintenir en état de marche le matériel nouveau. A partir de là, on prend souvent la décision de leur confier l'ensemble des responsabilités de mise en place des nouvelles installations. On crée alors un service appelé « maintenance-travaux neufs ». L'étendue des responsabilités en matière de travaux neufs est très variable d'une entreprise à l'autre.

Il peut s'agir de la construction d'un quai ou d'un bâtiment, de la mise en place d'une machine achetée à l'extérieur (raccordement à la source d'énergie, etc.), ou même de la réalisation intégrale de la machine elle-même. Dans certains cas les « travaux neufs » auront recours à la fabrication de l'entreprise qui réalisera les commandes passées par eux-mêmes.

Notons que même si la fonction maintenance ne se voit pas adjoindre la fonction « travaux neufs », le service s'occupera des installations succinctes du type modifications (réfection d'un bureau, etc.).

### **5- Autres formes et méthode de maintenance :**

#### **5-1- La maintenance d'amélioration :**

L'amélioration des biens d'équipements qui consiste à procéder à des modifications, des changements, des transformations sur un matériel correspond à la maintenance d'amélioration.

### **5-2-La totale productive maintenance (t.p.m) :**

Le concept TPM date de 1971 et il est japonais. C'est S. Nakajima de l'institut japonais de maintenance industrielle qui fait la promotion de la TPM. Mais les origines de la TPM viennent des Etats-Unis où la maintenance productive date de 1954. C'est en 1958 que John

Smith vient au Japon enseigner la PM (*productive maintenance*). La TPM est donc une adaptation japonaise de la PM américaine. L'ajoutant du mot total a trois significations majeures : la TPM est un système global et transversal, elle concerne tous les niveaux hiérarchiques, des dirigeants aux opérateurs et comprend l'auto maintenance, c'est-à-dire la participation des exploitants à certaines tâches de maintenance.

Nakajima définit la TPM en cinq points :

- la TPM a pour objectif de réaliser le rendement maximal des équipements ;
- la TPM est un système global de maintenance productive, pour la durée de vie totale des équipements ;
- la TPM implique la participation de toutes les divisions, notamment l'engineering, l'exploitation et la maintenance ;
- la TPM implique la participation de tous les niveaux hiérarchiques ;
- la TPM utilise les activités des cercles comme outil de motivation.

La TPM implique donc un décloisonnement de ces services en faisant participer le personnel de production aux tâches de maintenance. Elle vise ainsi à atteindre les zéro pannes, en procédant comme suit :

- Les opérateurs sont chargés de tâches de maintenance du 1er niveau (nettoyage, lubrification, examen externe, etc.). Ils ont la responsabilité de leur machine ;
- Le service maintenance intervient comme spécialiste pour des tâches plus complexes ;

- La TPM fait participer des petits groupes analogiques aux cercles de qualités ayant pour objectif l'amélioration de la maintenance dans l'intérêt de l'entreprise.

### **5-2-1- Les objectifs de TPM sont :**

- Réduction du délai de mise au point des équipements.
- Augmentation de la disponibilité, et du taux de rendement synthétique (T.R.S.).
- Augmentation de la durée de vie des équipements.
- Participation des utilisateurs à la maintenance appuyés par des spécialistes de maintenance.
- Pratique de la maintenance préventive systématique et conditionnelle.
- Meilleure maintenabilité des équipements (envisagée à la conception, aide au diagnostic, systèmes experts).

### **5-3-La maintenance basée sur la fiabilité :**

#### **5-3-1- Histoire de la MBF**

Les origines de la MBF viennent de la RCM {reliability centered maintenance) qui a été introduite en aéronautique vers 1960 aux Etats-Unis pour déterminer les programmes de maintenance. La publication du document MSG (maintenance steering groupe) a fixé les bases de la méthode de développement d'un programme de maintenance recevable à la fois pour les constructeurs d'avions, pour les autorités de l'aviation civile et pour les compagnies.

Il faut souligner que la certification de navigabilité des appareils commerciaux est conditionnée à la mise en œuvre de la maintenance MSG (programme MSG 3 pour l'Airbus A320 et les Boeing 757 et 767). L'évolution des versions successives des MSG a traduit la régression de la maintenance planifiée, le développement des actions

conditionnelles, puis l'optimisation économique dans le respect de l'objectif prioritaire qu'est la sécurité. C'est en

1984 que la méthode de maintenance RCM a été transposée au nucléaire américain, puis importée par EDF au nucléaire français sous le nom de « projet OMF », optimisation de la maintenance par la fiabilité.

L'OMF peut se définir comme une politique de maintenance ayant pour objet « de définir un programme de maintenance préventive afin de contribuer à maintenir, voire à améliorer la fiabilité des fonctions des systèmes qui sont importantes pour la sûreté et la disponibilité des tranches nucléaires ». En 1991, EDF a pris la décision de généraliser l'application de l'OMF à toutes les tranches 900 MW, puis aux 1 300 MW à partir de 1995. Les objectifs de l'OMF sont :

- le maintien, voire l'amélioration de la sûreté nucléaire ;
- la maîtrise des coûts et l'optimisation économique de la maintenance, suivant le principe : « exercer l'effort au bon endroit » ;
- la mise en œuvre d'une méthode structurée et rationnelle, par analyse de chaque mode de défaillance fonctionnelle ;
- l'utilisation du retour d'expérience pour réajuster les programmes de maintenance et leur pertinence.

Plus pragmatique que la TPM, la démarche MBF repose sur l'analyse technique des équipements, donc sur une forte implication des techniciens de maintenance et de l'encadrement sectoriel, le résultat abouti étant proche de celui obtenu par la démarche TPM : une redistribution des responsabilités dans une nouvelle organisation.

#### **5-3-1-1- Définitions, objectifs et moyens de la MBF :**

L'objectif de la MBF est de proposer aux entreprises une méthode structurée permettant d'établir un plan de maintenance sélectif à partir de la criticité des équipements, puis de leurs défaillances identifiées. Cela à partir d'une démarche participative.

**-Définitions de la MBF :**

Quelques définitions de la MBF, tirées de la littérature récente, donneront l'idée générale de la méthode.

- La RCM est une stratégie de maintenance globale d'un système technologique utilisant une méthode d'analyse structurée permettant d'assurer la fiabilité inhérente à ce système.
- La MBF est une méthode destinée à établir un programme de maintenance préventive permettant d'améliorer progressivement le niveau de disponibilité des équipements critiques.
- La MBF est une méthode reposant essentiellement sur la connaissance précise du comportement fonctionnel et dysfonctionnel des systèmes

**-Moyens nécessaires à la mise en œuvre de la MBF :**

La méthode s'appuie sur une démarche de type AMDEC et des matrices de criticité pour hiérarchiser les équipements, puis les causes de défaillances. L'utilisation ultérieure d'arbre de décisions permet de déterminer les actions à entreprendre dans le cadre d'un plan de maintenance préventive.

**6-Les niveaux de maintenance :**

En fonction de la politique de maintenance et du potentiel humain et technique de l'entreprise, les opérations de maintenance sont décomposées en cinq niveaux d'intervention du simple réglage (1er niveau) à l'opération lourde de maintenance confiée à un atelier central ou à une unité extérieure (5ème niveau). Ces niveaux sont donnés à titre indicatif et leur utilisation n'est concevable qu'entre des parties qui sont convenues de leur définition précise selon le type du bien à entretenir.

Cependant, il est important de noter que la tendance actuelle est de se ramener à trois niveaux seulement dans une logique de TPM. A savoir :

- I = 1 + 2 : c'est la maintenance de première ligne transférée progressivement aux opérateurs de production, assisté si nécessaire par les techniciens de maintenance.

- II = 3 + 4 : domaine d'action privilégié des équipes polyvalents de techniciens de maintenance. Diagnostics, interventions techniquement évoluées, mis en œuvre d'amélioration, etc.
- III = 5 : travaux spécialisés souvent sous-traités pour que la maintenance puisse recentrer ses moyens sur son savoir-faire c'est-à-dire le niveau II.

Tableau 1.1 : Les cinq niveaux de maintenance.

Niveau	Personnel intervenant	Nature de l'intervention	Moyens requis	Interventions et opérations
1	L'exploitant du bien sur place.	Réglages simples, généralement prévus par le constructeur, au moyen d'organes accessibles sans aucun démontage ou aucune ouverture de l'équipement, ou échange d'éléments consommables en toute sécurité tels que voyants ou certains fusibles, etc.	Sans outillage ou outillage léger et à l'aide des instructions d'utilisation et de conduite. Le stock des pièces consommables nécessaires dans ce cas est très faible.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Niveau d'huile moteur ;</li> <li>- Niveau d'eau ;</li> <li>- Indicateur de colmatage ;</li> <li>- Niveau de la réserve de combustible ;</li> <li>- Niveau de la réserve d'huile ;</li> <li>- Régime du moteur ;</li> <li>- Température de l'eau de refroidissement ;</li> <li>- Température d'échappement ;</li> <li>- Test des voyants et indicateurs ;</li> <li>- Purge de circuit d'échappement ;</li> <li>- Nettoyage des filtres ;</li> <li>- Contrôle visuel de l'état des organes ;</li> <li>- Contrôle auditif des bruits de marche.</li> </ul>
2	Un technicien habilité* de qualification moyenne ou un ouvrier qualifié de maintenance (dépanneur) sur place. Ce dernier suit les instructions de maintenance qui définissent les tâches, la manière et les outillages spéciaux.	Dépannage par échange standard des éléments prévus à cet effet, ou opérations mineurs de maintenance préventive, par exemple de graissage ou de contrôle de bon fonctionnement.	Outillage standard ou spécial, les pièces de rechanges situés à proximité immédiate sont du type consommables ; filtres, joints, huile, liquide de refroidissement. Suivant les instructions de maintenance.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Remplacement des filtres à gazole ;</li> <li>- Remplacement des filtres à huile moteur ;</li> <li>- Remplacement des filtres à air ;</li> <li>- Prélèvement d'huile pour analyse ;</li> <li>- Vidange de l'huile de moteur ;</li> <li>- Analyse de liquide de refroidissement ;</li> <li>- Contrôle des points signalés pour le 1<sup>er</sup> niveau ;</li> <li>- Graissage de tous les points en fonction de la périodicité ;</li> <li>- Contrôle des batteries.</li> </ul>
3	Un technicien spécialisé ou un ouvrier spécialisé de maintenance sur place ou en atelier de maintenance, avec l'aide d'instructions de maintenance et d'outils spécifiques.	Identification et diagnostic des pannes, réparation par échange de composants ou d'éléments fonctionnels, réparations mécaniques mineures, et toutes opérations courantes de maintenance préventive telles que réglage général ou réaligement des appareils de mesure.	Outillage plus appareils de mesure et de réglage ou de calibrage prévus dans les instructions de maintenance, et éventuellement des bancs d'essais et de contrôle des équipements et en utilisant l'ensemble de la documentation nécessaire à la maintenance du bien, ainsi que les pièces approvisionnées par le magasin.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réglage des jeux des soupapes ;</li> <li>- Réglages des injecteurs ;</li> <li>- Contrôle des sécurités du moteur ;</li> <li>- Contrôle et réglage des protections électriques ;</li> <li>- Contrôle des refroidisseurs ;</li> <li>- Contrôle du démarreur ;</li> <li>- Remplacement d'un injecteur ;</li> <li>- Contrôle et réglage de la régulation de puissance ;</li> <li>- Contrôle et révision de la pompe ;</li> <li>- Contrôle des turbocompresseurs ;</li> <li>- Remplacement d'une résistance de chauffe ;</li> <li>- Contrôle de l'isolement électrique ;</li> <li>- Remplacement des sondes et capteurs ;</li> <li>- Remplacement d'une bobine de commande, remplacement d'un disjoncteur.</li> </ul>
4	Des techniciens bénéficiant d'un encadrement technique très spécialisé, ou une équipe comprenant un encadrement technique très spécialisé, dans des ateliers spécialisés (rectification, réusinage).	Tous les travaux importants de la maintenance préventive ou corrective à l'exception de la reconstruction et de la rénovation. Ce niveau comprend aussi le réglage des appareils de mesure utilisés pour la maintenance et, éventuellement, la vérification des étalons de travail par des organismes spécialisés. Plus les opérations de révision.	Outillage général complet et outillage spécifique (moyens mécaniques, de câblage et de nettoyage). Eventuellement, des bancs de mesures et des étalons de travail nécessaires, à l'aide de toutes documentations générales ou particulières.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Découssage (révision, rectification) ;</li> <li>- Révision de la cylindrée ;</li> <li>- Contrôle d'alignement du moteur / alternateur ;</li> <li>- Changement des pôles d'un disjoncteur Haute Tension.</li> </ul>
5	Une équipe complète polyvalente en atelier spécialisé ou par le constructeur lui même.	Travaux de rénovation, de reconstruction ou exécution des réparations importantes confiées à un atelier spécialisé ou une unité extérieure de maintenance	Moyens proches de ceux de fabrication définis par le constructeur.	Il s'agit d'opérations lourdes de rénovation ou de reconstitution d'un équipement.

## 7- La sécurité :

La sécurité est l'ensemble des méthodes ayant pour objet, sinon de supprimer, du moins de minimiser les conséquences des défaillances ou des incidents dont un dispositif ou une installation peuvent être l'objet, conséquences qui ont un effet destructif sur le personnel, le matériel ou l'environnement de l'un

et de l'autre. Sachant qu'un incident mécanique, une panne, peuvent provoquer un accident, sachant aussi que la maintenance doit maintenir en état le matériel de protection ou même que certaines opérations de maintenance sont elles-mêmes dangereuses, il apparaît que la relation entre la maintenance et la sécurité est particulièrement étroite. Pour toutes ces raisons ainsi que pour sa connaissance du matériel, le responsable de la maintenance devra participer aux réunions du Comité d'hygiène et de

Sécurité en qualité de membre ou à titre d'invité, et développer sa collaboration avec l'ingénieur sécurité lorsque l'entreprise en possède un. Dans une entreprise moyenne où la sécurité n'a pas de service propre, on trouve normal de faire appel au service maintenance pour les interventions concernant la sécurité. Celles-ci sont de deux ordres :

- d'une part celles que l'on peut classer dans la sécurité « officielle ». C'est la tenue des registres concernant les chaudières, les visites d'appareils à pression, le contrôle des installations électriques, etc., la tenue des dossiers des rapports de visite de l'inspecteur du travail, du contrôleur de la sécurité sociale, etc. ;
- d'autre part celles qui, tout en s'inspirant des premières, s'appliquent dans un contexte précis.

### **8-Conclusion**

Même si ces activités sortent du cadre direct de la maintenance, elles s'intègrent bien dans le champ de compétence des professionnels de maintenance. En période de crise économique, certains industriels peuvent se montrer prudents à l'égard des investissements et trouvent des possibilités d'amélioration par l'intermédiaire de ces formes de maintenance. [2]

## **1-Introduction :**

L'invention fondamentale est basée sur l'utilisation de corps roulants pour intégrer sans friction la vitesse différentielle entre une charge à déplacer et son support.

Si la roue avec son axe lisse a été la plus grande invention technique de l'Antiquité, son montage sur roulements est beaucoup plus récent. Il a été le résultat de recherches des performances toujours plus poussées quant à la réduction du frottement, l'augmentation de la vitesse et des charges. Les premières théories sur la lubrification et la résistance des matériaux en fatigue s'élaborent alors timidement.

C'est au XVIII<sup>e</sup> siècle qu'apparaissent les véritables prototypes de nos roulements actuels. Citons, par exemple, le roulement à billes breveté en 1794 par l'anglais Philip Vaughan et employé sur les axes de roues. C'est l'invention de la bicyclette au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle qui donne un véritable développement industriel au roulement à billes. En même temps, les constructeurs commencent à procéder à des recherches théoriques et expérimentales relatives à la conception des roulements (théorie d'Hertz en 1881). Mais c'est finalement le XX<sup>e</sup> siècle et le développement des industries mécaniques et de l'automobile qui vont donner un niveau de haute performance aux propriétés fondamentales du roulement : faible frottement, forte charge, haute, vitesse, longue durée.

## **2-Conception :**

Un roulement est un organe mécanique permettant de transmettre des charges ou un mouvement d'une pièce mobile à une pièce fixe .

Les roulements autorisent le déplacement relatif sous charge, en rotation ou en translation, de deux éléments mécaniques mobiles l'un par rapport à l'autre. Leur premier rôle est de diminuer les frottements et par là-même d'améliorer les rendements et les performances des machines, Le roulement est constitué :

- De deux bagues : une bague intérieure et une bague extérieure;
- Des corps roulants permettant la rotation relative de ces deux bagues en les positionnant l'une par rapport à l'autre ;
- Et, généralement, d'une cage séparant les corps roulants en maintenant leur équidistance (pour une meilleure clarté des dessins, les roulements seront représentés sans cage sur les figures).

On appelle logement l'élément du mécanisme où s'insère le roulement ; on a donc une liaison fixe entre la bague extérieure et le logement.

L'élément qui vient s'insérer dans la bague intérieure est généralement un arbre, ce qui implique de la même manière une liaison fixe entre celui-ci et la bague intérieure.

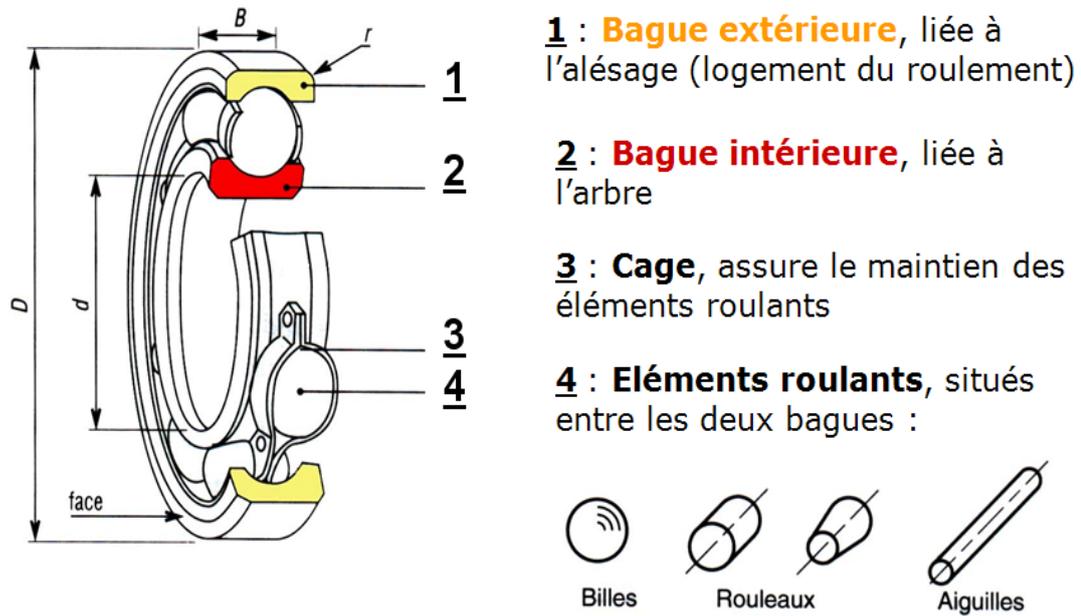
Les corps roulants parcourent les chemins usinés respectivement dans la bague intérieure et dans la bague extérieure du roulement.

Le corps roulant qui génère le minimum de frottements est la bille, par le fait qu'elle n'a qu'un point de contact théorique avec son chemin. Pour guider la bille, le chemin de roulement est torique, de section circulaire mais de rayon supérieur à celui de la bille, de façon à respecter le point de contact théorique. Le rapport entre le rayon de courbure du chemin et le diamètre de bille, rapport que l'on appelle osculation, est donc légèrement supérieur à 0,5 (environ 0,52). Dans la pratique, sous l'effet de la charge du roulement transmise au travers de la bille et de l'élasticité de l'acier, le point de contact théorique devient une ellipse de contact.

La limite en charge de la bille du fait de son contact conduit à envisager aussi des corps roulants à contact théorique linéaire (cas des rouleaux). Dans la pratique, ce contact linéaire devient un rectangle de contact. Mais la théorie de Hertz fait ressortir qu'aux extrémités des rouleaux, il y a des sur contraintes de bord que l'on évite en donnant à la génératrice du rouleau un léger bombé, ce qui a pour effet de donner au contact une forme elliptique allongée avec une distribution des contraintes plus uniforme.

Contact théorique ponctuel dans le cas des billes, contact théorique linéaire dans le cas des rouleaux, ce sont deux conceptions de base pour tous les corps roulants des roulements. Le rouleau peut être d'ailleurs cylindrique, conique ou sphérique ; mais le principe du « bombé » subsiste en termes de courbure de la génératrice du rouleau plus petite que celle du chemin.

Par la nature de ses contacts ponctuels, le roulement à billes représente l'idéal théorique du palier sans friction (ce qui explique son développement universel), mais il a, de par sa conception, une capacité de charge de niveau moyen lorsqu'on le compare à la conception du roulement à rouleaux. Dans la pratique, les roulements à billes ont un léger frottement dû à la forme de leur ellipse de contact et aux pressions de contact qui s'y exercent (le roulement à rouleaux a un couple de frottement au moins dix fois plus élevé que celui du roulement à billes de mêmes dimensions).



**Figure (22) : conception de roulement.**

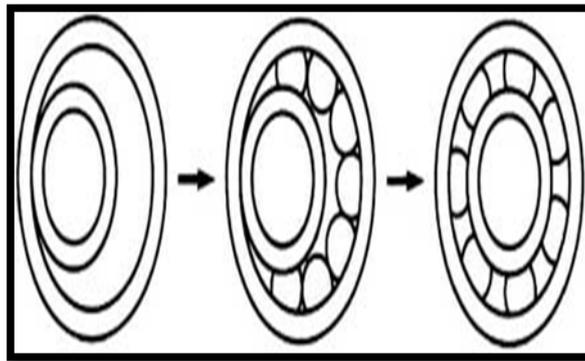
### 3-Types de roulements normalisés : comparaison de leurs aptitudes et applications caractéristiques :

Types de roulements		Roulements à contact radial à une ou deux rangées de billes		Roulements à contact oblique à une ou deux rangées de billes		Roulements à rotule sur billes	Roulements à rouleaux cylindriques	Roulements à rouleaux coniques	Roulements à rouleaux sphériques	Butées à billes	Butées à rouleaux sphériques
Comparaison des aptitudes											
Aptitudes aux charges radiales	bonne										
	moyenne										
	faible										
Aptitudes aux charges axiales	bonne										
	moyenne					(1)					
	faible										
Facteur de vitesse limite $N \cdot D_m$ (2)	600 000										
	450 000										
	300 000										
	150 000										
Défaut d'alignement admissible $\delta$ entre arbre et logement	3°										
	1/2°										
	10'										
	0										
Applications caractéristiques		Moteurs électriques; roues de chariots, de remorques légères; électroménager; rouleaux convoyeurs; broches de machines à bois; poulies; petits réducteurs; boîtes de vitesses; vilebrequins de motocycles.	Boîtes de réduction.	Pompes centrifuges; broches de machines-outils ou de machines à bois; réducteurs à vis sans fin.	Petits renvois d'angle; réducteurs à vis sans fin; roues de chariots.	Arbres longs et flexibles; calandres légères.	Gros moteurs électriques; boîtes d'essieux de wagon; galets de pression; cylindres de laminoir.	Arbres de réducteur; roues de poids lourds; boîtes d'essieux du TGV; ponts arrière de camion et voiture; renvois d'angle à pignons coniques.	Cages de laminoir; gros réducteurs; éoliennes et gros ventilateurs industriels; cylindres de machines à imprimer; arbres de couche d'hélice de navire; gros galets de pression; calandres; machines de carrière (concasseurs, cribles, tamis, etc.).	Butées d'arbres verticaux; contre-poinçages; pompes à plateau.	Arbres verticaux lourds (ventilateurs, turboalternateurs, etc.); butées de réaction d'arbre d'hélice de navire; pivots de grue; crapaudines; vis d'injection de plastique.

## 4-Analyse des caractéristiques de chaque type de roulement :

### 4-1-Roulement à une rangée de billes :

C'est le roulement le plus utilisé qui a souvent le meilleur rapport performance/prix dans une multitude d'applications très diversités. Ce roulement étant constitué d'éléments inséparables (il est dit rigide), le nombre et le diamètre de ses billes sont limités par construction et par la nécessité de réserver la place à des joints d'étanchéité intégrés. Par contre, étant conçu pour supporter les charges radiales, les courbures de chemin (de l'ordre de 4 % supérieures à celles des billes) et son jeu interne lui permettent de supporter aussi des charges axiales par adaptation automatique de sa ligne de charge sur une ligne de contact angulaire. Cette même propriété lui permet d'accepter des défauts d'alignement plus importants que les autres roulements rigides : environ 2 à 3 fois plus, soit 10' d'angle.

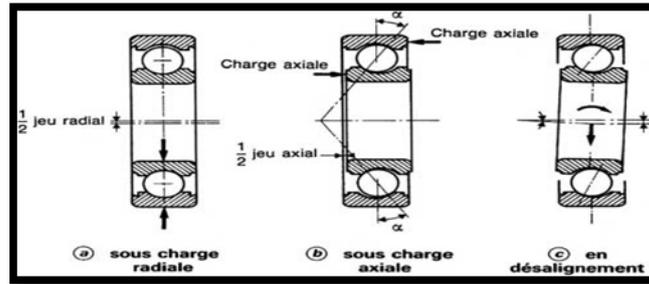


**Figure (23) : Roulement à billes à contact radial.**

Son jeu radial interne peut rentrer dans différentes catégories de valeurs normalisées (jeu normal, jeux augmentés) qui permettent au constructeur une relative adaptation aux conditions de fonctionnement ; par exemple, roulement à jeu augmenté pour boîte de vitesses (défaut d'alignement) ou butée d'embrayage (charge axiale uniquement).

Dans ce type de roulement à billes, le jeu axial résultant du jeu radial est de l'ordre de 8 à 10 fois.

Le roulement à une rangée de billes à contact radial est le type même du roulement universel qui rassemble l'ensemble des propriétés du roulement en général : frottement minimal, bonne capacité de charge tant radiale qu'axiale, simplicité donc faiblesse de coût, facilité de mise en œuvre, nombreuses variantes disponibles.



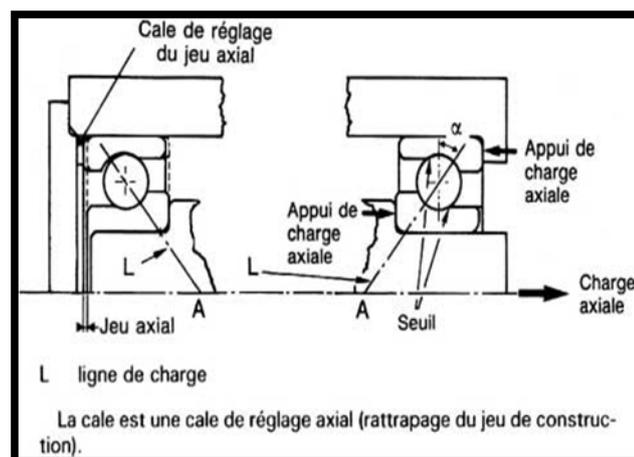
**Figure (24) : Roulements à billes sous charge.**

#### 4-2-Roulement à billes à contact oblique :

Ce roulement est conçu pour lui permettre une capacité de charge tant radiale qu'axiale élevée par inclinaison de la ligne de charge (angle de contact de  $40^\circ$ , suffixe B). Sa construction interne est bâtie sur le principe d'un roulement à billes à contact radial avec un grand jeu, suffisant pour obtenir l'angle de contact nominal de  $40^\circ$  quand celui-ci est annulé axialement.

Cette conception permet un grand nombre de billes de diamètre maximal (il n'existe pas de variante avec joint).

Les éléments du roulement normalisé sont rendus inséparables par l'existence d'un léger retour (seuil) sur les chemins de bagues. À noter également que grâce à des calculs d'optimisation et à l'emploi de la cage polyamide, le roulement à contact oblique comporte actuellement dans les mêmes enveloppes normalisées, des billes plus grosses qui lui confèrent une capacité de charge augmentée. La conception même de ce type de roulements fait qu'il ne peut accepter une charge axiale que dans un seul sens, ce qui nécessite un roulement de même type monté en opposition pour constituer les deux paliers d'un arbre.

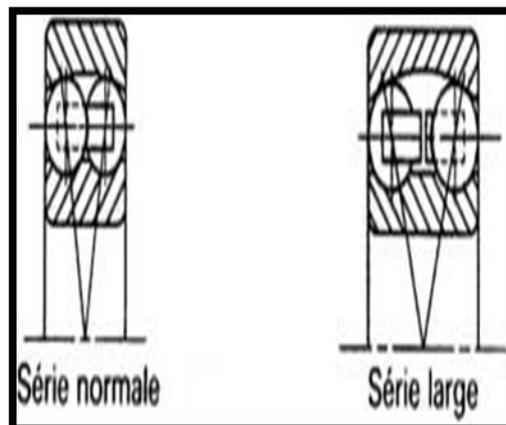


**Figure (25) : Roulements à billes à contact oblique.**

### 4-3-Roulement à rotule sur billes :

Le chemin de la bague extérieure est sphérique, ce qui autorise un débattement angulaire important de la bague intérieure de  $2^{\circ}$  à  $4^{\circ}$  (rotulation). C'est le roulement idéal pour des arbres travaillant en flexion rotative ou pour des montages à structure souple qui demandent un auto alignement permanent (mécanismes à arbre long, cylindres imprimeurs). Malgré ses deux rangées de billes, il a une capacité de charge radiale inférieure à celle du roulement à une rangée de billes à contact radial par le fait que les contacts billes/chemin sphérique sont peu enveloppants ; de plus, sa conception (contact ponctuel et ligne de charge à faible angle) limite sa capacité de charge axiale à des valeurs relativement faibles.

Ce type de roulement existe en deux séries) : la série normale dans l'enveloppe des roulements à une rangée de billes (série 1200, 1300) et la série large (série 2200, 2300) dans l'enveloppe des roulements à double rangée de billes qui présente plus de capacité de charge radiale.



**Figure (26) : Roulements à rotules sur billes.**

### 4-4-Roulement à rouleaux cylindriques :

L'intérêt premier du roulement à rouleaux est sa grande capacité de charge radiale par rapport au roulement à billes de même enveloppe (contact linéaire au lieu de contact ponctuel). Par contre, la longueur de contact du rouleau requiert un contrôle du désalignement entre arbre et logement de sorte que ce défaut ne dépasse pas  $1/1000$  rad.

Il existe plusieurs types de conception interne de ces roulements pour chaque enveloppe normalisée. Les plus courants sont :

-Le type N où les rouleaux sont retenus sur la bague intérieure par ses deux épaulements et la cage, La bague extérieure est séparable du reste du roulement et ne comporte pas d'épaulement.

-Les types NU, NJ et NUP où les rouleaux sont retenus dans la bague extérieure par ses deux épaulements et la cage. La bague intérieure est séparable ; elle peut être sans épaulement (type NU), avec un seul épaulement (type NJ) ou avec deux épaulements (type NUP) dont l'un est constitué d'une rondelle séparable.

Les épaulements de la bague intérieure ont pour but de limiter le débattement axial du palier dans un sens (type NJ) ou dans les deux (type NUP) mais ne permettent pas de supporter des charges axiales importantes du fait du frottement de la face des rouleaux (celles-ci sont limitées à environ 10 % des charges radiales appliquées).

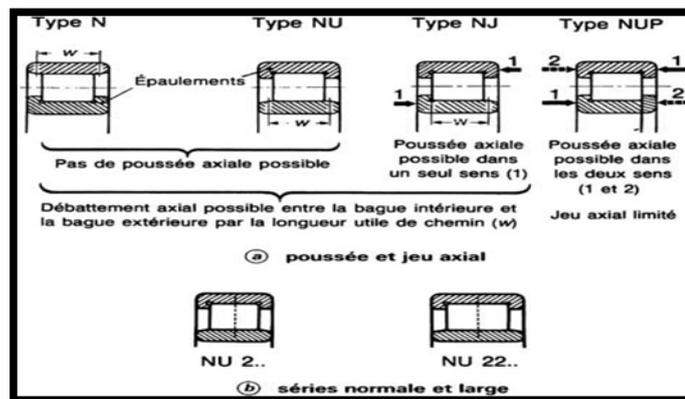


Figure (27) : Roulements à rouleaux cylindriques.

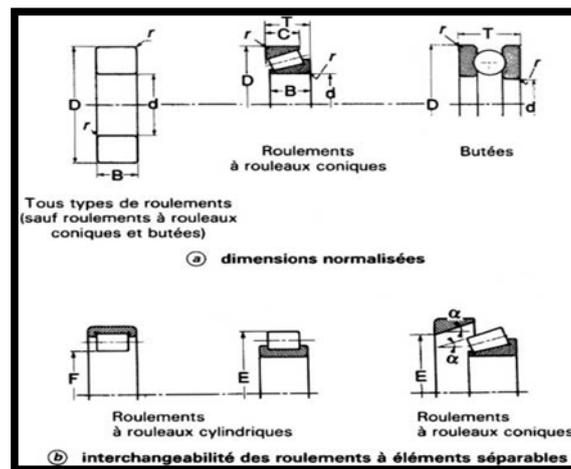
#### 4-5-Roulement à rouleaux coniques :

C'est un roulement à rouleaux à contact angulaire. Tout comme le roulement à rouleaux cylindriques a une aptitude à prendre des charges radiales supérieures à celles du roulement à billes de même enveloppe, le roulement à rouleaux coniques est caractérisé par son aptitude à supporter des charges combinées, axiales et radiales, qui est supérieure à celle du roulement à billes à contact oblique. Comme lui, il ne peut accepter les charges axiales que dans une seule direction.

Les séries dans ce type sont très nombreuses (une quinzaine) et offrent un large choix d'encombres comme d'angles de contact.

Les bagues de roulement sont séparables : la cuvette (bague extérieure) n'est pas liée au reste du roulement, qui est constitué du cône (bague intérieure) et des rouleaux retenus sur celui-ci par la cage ; ce sous-ensemble est appelé « cône monté ».

Les cônes et cuvettes étant dissociables, la normalisation, outre les dimensions et les tolérances des enveloppes extérieures, a fixé les cotes nominales du diamètre d'entrée de la cuvette (E) et l'angle du chemin de cuvette(a). Cela assure l'interchangeabilité entre les éléments séparables des roulements de même référence.

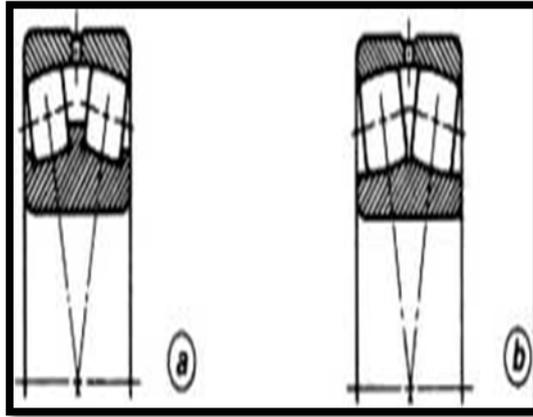


**Figure (28) : Roulement à rouleaux coniques.**

#### 4-6-Roulement à rouleaux sphériques :

C'est un roulement à rotule à double rangée de rouleaux qui comporte, comme le roulement à rotule sur billes, un chemin de bague extérieure sphérique, ce qui conduit les rouleaux à avoir une forme de « tonneau ».

Les séries dans ce type sont nombreuses : huit séries d'encombrement différentes offrant un large choix de dimensions. Sa très grande capacité de charge radiale grâce à sa conception (contact linéaire, deux rangées de rouleaux, grand nombre de rouleaux de gros diamètre par rangée) ainsi que son aptitude à accepter des défauts d'alignement entre arbre et logement de l'ordre du  $1/2^{\circ}$  font de ce roulement un type très utilisé dans la mécanique lourde : palier de laminoir, de machines à imprimer, de machines vibrantes (cribles, tamis), palier de ligne d'arbre d'hélice (navire, éolienne, etc.).



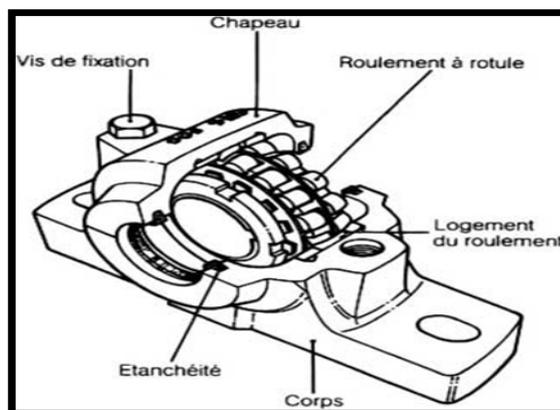
**Figure (29) : Roulements à rouleaux sphériques.**

#### **4-7-Palier en deux parties :**

Le palier standard est constitué d'un corps et d'un chapeau en fonte et sert de logement à un roulement à rotule sur billes ou sur rouleaux sphériques à alésage conique. Il constitue à lui seul un organe complet de rotation lubrifié à la graisse et étanche (par joints en feutre ou en élastomère) qui présente l'avantage de posséder de nombreux degrés de liberté rendant son montage très simple.

L'ensemble se fixe par boulonnage de la semelle du palier sur une assise quelconque alors que le chapeau permet de dégager la ligne d'arbre avec ses roulements qui y sont montés par l'intermédiaire d'un manchon de serrage. Le logement des roulements est usiné dans le corps du palier avec un ajustement libre et une grande possibilité de déplacement axial qui peut être annulé par une ou deux bagues d'arrêt.

Les roulements à rotule donnent une certaine liberté d'alignement des paliers ( $1/2^\circ$ ) dans les limites permises par ses joints d'étanchéité.



**Figure (30) : Palier en deux parties.**

#### 4-8-Butée à billes :

Les butées à billes normalisées sont conçues pour supporter uniquement des charges axiales. Elles ont un angle de contact de 90°, c'est-à-dire que la ligne de charge est parallèle à l'axe. Elles doivent donc être associées à un roulement radial pour constituer un véritable palier dont la vitesse est relativement limitée par la force centrifuge exercée sur les billes.

Les butées à billes sont formées d'éléments séparables : rondelle arbre, rondelle-logement, cage à billes. Ils sont aussi interchangeables mais seulement dans la même marque.

La répartition de la charge axiale sur une butée à billes n'est correcte que si l'arbre est parfaitement aligné avec le logement.

La butée à billes est dite à simple effet, car elle ne peut supporter la charge axiale que dans un sens. Il existe aussi des butées à billes à double effet pouvant supporter des charges axiales dans les deux sens : séries 52200, 52300. Attention, pour celles-ci, le code d'alésage ne correspond pas à l'alésage réel de la rondelle arbre (voir les dimensions normalisées dans les catalogues).

Pour maintenir le contact des billes avec leur chemin, une charge axiale doit être appliquée en permanence. C'est le poids de l'arbre dans le cas d'un pivot vertical, ou bien ce sont des ressorts dans certains arbres de machines-outils.

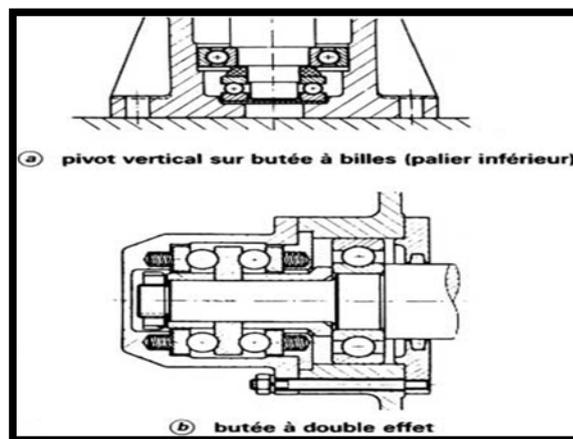


Figure (31) : Butées à billes.

#### 4-9-Butée à rouleaux :

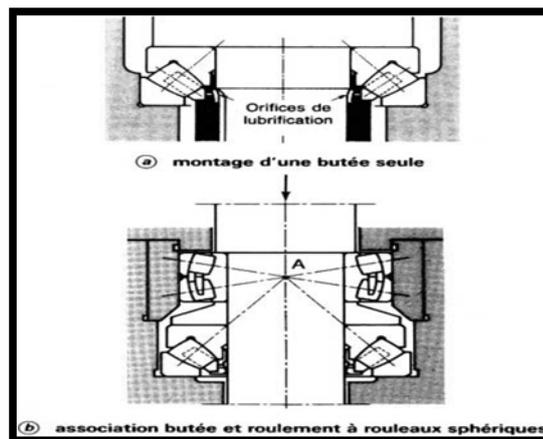
Contrairement à celle de la butée à billes, la conception de la butée à rouleaux sphériques apporte les caractéristiques de forte capacité axiale et d'auto-alignement, grâce à un chemin sphérique sur la rondelle-logement. Celle-ci est séparable de la rondelle-arbre sur laquelle sont maintenus les rouleaux par une cage en laiton usiné ou en acier embouti. Ceux-

ci ont une forme très particulière conico sphérique qui permet la rotulation de la rondelle-arbre par rapport à la rondelle-logement autour d'un point de l'axe situé sur la ligne de charge avec un angle de contact voisin de  $50^\circ$ . Le désalignement possible entre rondelle-arbre et rondelle-logement peut atteindre  $2^\circ$ .

Grâce à leur angle de contact, les butées à rouleaux sphériques peuvent encaisser des charges radiales sous certaines conditions de charge axiale minimale et constituer ainsi à elles seules un palier, palier d'arbre vertical (pivot de grue, palier supérieur de gouvernail, etc.). Mais pour les paliers fortement chargés, tant radialement qu'axialement, la butée est associée à un roulement à rotule ( : palier de vis de presse à injecter ; dans ce cas, leurs points d'application des charges (point A de rotulation) doivent coïncider.

On trouve même des paliers constitués de deux butées en opposition associées à un roulement à rouleaux sphériques qui les Rendent capables d'encaisser les charges axiales dans les deux sens (palier de ligne d'arbre de navire).

Les éléments séparables de ce type de butée ne sont interchangeables que dans la même marque. [3]



**Figure (32) : Butées à rouleaux sphériques.**

### 5-Défaillance du roulement :

La plupart des machines contiennent des roulements, dont la durée de vie peut aujourd'hui être calculée assez précisément. Dans deux tiers des cas, la défaillance d'un roulement est toutefois due à une autre cause que la fatigue normale du matériau. Ces causes peuvent souvent être repérées en inspectant soigneusement le roulement. Il ne faut donc pas le jeter directement. Toute forme de détérioration laisse, en effet, ses traces spécifiques.

Les détériorations au niveau des roulements ont toujours une cause primaire. Nous entendons par là la détérioration constituant la base du problème et nous disant ce qu'il faut changer sur la machine pour éviter un tel problème à l'avenir. Ce n'est pas toujours évident à repérer, vu que les roulements peuvent souvent continuer à fonctionner un moment.

Il est donc essentiel de détecter les détériorations assez tôt afin de pouvoir procéder à une analyse correcte. Un entretien régulier peut aider. Mais même lorsque le problème n'est pas signalé à temps, les roulements défectueux peuvent généralement encore nous en dire long sur ce qui s'est passé. La norme ISO distingue ici six causes principales reconnaissables: fatigue du matériau, usure, corrosion, érosion électrique, déformation plastique et cassure.

### **5-1-La Fatigue du matériau :**

#### **-Sous-surface :**

Lorsque la fatigue du matériau se situe sous le chemin de roulement, il s'agit d'une évolution normale. Après un certain temps, le roulement atteint, en effet, la fin de sa durée de vie. A ce moment, le matériau flanche et de petites microfissures apparaissent, juste sous le chemin de roulement. Le matériau commence alors à s'effriter jusqu'à ce que le roulement rende définitivement l'âme.

#### **-Surface :**

Lorsque la fatigue se développe cependant au-dessus du chemin de roulement, cela indique une anomalie. Les tensions les plus fortes se forment, en effet, alors sur le chemin de roulement, ce qui n'est pas le but. Cela est généralement imputable à des problèmes de lubrification. Lorsque le film d'huile dans les zones de contact devient insuffisant (lubrification insuffisante, mauvais lubrifiant), cela donne des contacts métal sur métal. De petites particules se détachent alors et des micro-fissures apparaissent dans le matériau. Cette forme de détérioration se reconnaît à son effet luisant. Au début, les rugosités de surface des chemins de roulement sont, en effet, poncées. De ce fait, le roulement a même l'air de mieux fonctionner. Mais ce processus se poursuit, de sorte que de plus en plus de particules s'effritent, entraînant à leur tour de plus en plus de contamination dans le roulement. Ce processus peut provoquer de nombreuses détériorations secondaires, comme notamment des cassures.



**Figure(33) : Phénomène de Fatigue du matériau des roulements.**

### **5-2-L'Usure :**

Tout objet est sujet à l'usure. Pourtant, dans certaines circonstances, cette usure survient plus tôt ou est plus importante. Il y a différentes raisons pour cela.

#### **-Abrusif :**

Lorsque des particules abrasives se retrouvent dans le roulement, cela entraîne une usure. A cause des particules, pouvant provenir de l'extérieur comme de l'intérieur, le film d'huile n'est plus constitué. Cela donne lieu à des contacts métal sur métal. Les particules abrasives poncent le matériau des chemins et éléments de roulement, qui prennent un aspect mat. Si les particules abrasives sont très petites, comme la poudre de ciment, la surface peut toutefois aussi être très brillante en raison d'un effet de polissage. Cette détérioration peut aussi toucher d'autres parties du roulement, comme les cages. Les particules responsables peuvent atteindre le roulement en raison d'un mauvais étanchement. Une mauvaise lubrification peut aussi être une cause. Pour avoir une meilleure idée de la détérioration, il est donc possible de procéder à une analyse d'huile ou de graisse. Ce, tout en étant toujours conscient que les résultats d'une telle analyse peuvent varier selon l'endroit où l'échantillon est prélevé.

#### **-Mouillage :**

Ici, un mouvement glissant génère au lieu d'un mouvement roulant des contacts métal sur métal. Un mouvement glissant peut apparaître d'une part lorsqu'un élément roulant accélère trop lors du passage d'une zone non chargée à une zone chargée. Cela se produit

surtout sous une charge trop légère. Le glissement génère de la chaleur à micro-échelle. La chaleur peut néanmoins être telle que le matériau fonde à l'échelle microscopique, se ressoude lors du refroidissement et soit ensuite arraché. Du matériau des chemins de roulement peut ainsi être transféré sur les éléments roulants, ou l'inverse. L'échauffement et le refroidissement soudains vont de pair avec un durcissement du matériau, qui devient très cassant. Il s'effrite dès lors facilement.



**Figure(34) : Phénomène d'usure des roulements.**

### **5-3-La Corrosion :**

#### **-Infiltration de liquide :**

La corrosion peut endommager sérieusement le roulement. Par rapport à d'autres processus de détérioration, elle peut pénétrer rapidement et profondément dans le matériau. Elle peut être due à la présence d'eau, de liquides corrosifs, ou même de vapeur (condensation). Nous retrouvons dès lors souvent cette forme de détérioration dans l'industrie du papier. La corrosion à l'arrêt est caractérisée par des traces apparaissant à distance d'élément roulant ou de bille. Lors de la mise en marche de cette machine, ces traces visibles risquent à nouveau de disparaître, mais la détérioration reste. Après un certain temps, la corrosion se traduit par des traces de rouille profondes favorisant rapidement l'effritement.

#### **-Rouille d'ajustage :**

Cette forme de corrosion n'est pas liée à l'eau. Elle a cependant un lien avec les micromouvements du matériau dans l'ajustage. Lorsqu'un ajustage n'est pas parfait, de l'air peut être retenu, ce qui donne lieu à de la rouille de contact. Les particules rouillées sont poncées par les micromouvements et de la nouvelle rouille de contact apparaît. La rouille a un

volume plus élevé que l'acier pur et cela peut générer des tensions élevées dans le matériau et une déformation. Les micromouvements sont causés par un mauvais siège d'arbre ou boîtier, une charge trop lourde ou la flexion de l'arbre sous la charge. Il s'agit d'une forme de détérioration très courante dans le cas d'applications avec de lourdes charges et elle peut souvent entraîner une cassure de la bague.



**Figure(35) : Phénomène de corrosion des roulements.**

#### **5-4-La Déformation Plastique :**

##### **-Surcharge :**

Une déformation plastique du roulement a souvent un lien avec une surcharge. Nous parlons de surcharge statique lorsque le problème est causé par l'application même. Il faut alors regarder sur place quels réglages de la machine doivent être adaptés pour éviter cette détérioration.

Il est essentiel de monter et de démonter les roulements avec le bon outillage afin d'éviter toute détérioration. On reconnaît une surcharge aux enfoncements généralement situés à distance de bille ou de rouleau les uns des autres.

##### **-Enfoncement :**

Lorsque des particules pénètrent dans le roulement et se fraient un chemin jusqu'à la zone de contact, elles peuvent s'imprimer dans les chemins de roulement, les éléments roulants ou la cage. Le matériau est pour ainsi dire repoussé. De ce fait, la géométrie est abîmée et des tensions se forment autour.

Juste après l'enfoncement, cela se traduira par un effritement. Celui-ci se poursuit

progressivement, typiquement en triangle dans un roulement à billes. La vitesse à laquelle cela se produit dépend de la forme et de la dureté des particules. L'enfoncement est principalement dû à des problèmes d'étanchéité.



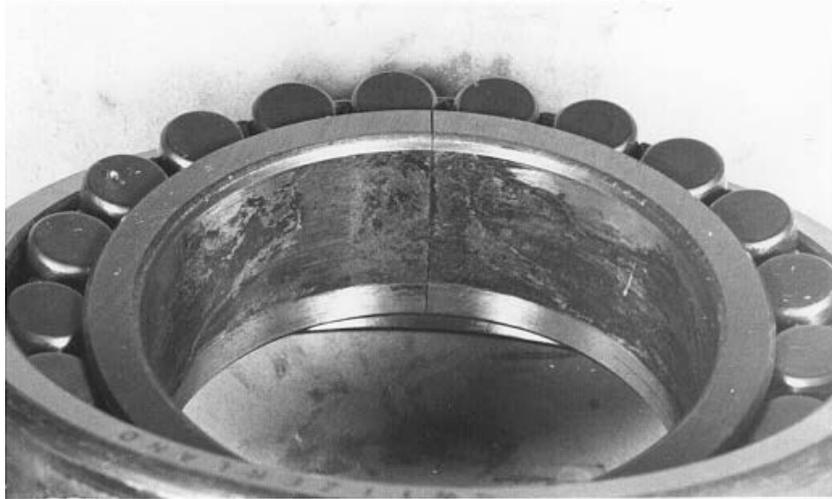
**Figure(36) : Phénomène de Déformation Plastique des roulements.**

### **5-5-Cassure :**

En cas de cassure, il s'agit généralement d'une forme de détérioration secondaire. Avec le processus progressif, la détérioration primaire se poursuit et l'accumulation de détériorations et de tensions provoque finalement la cassure. Les causes possibles sont une mauvaise charge ou une surcharge, la fatigue ou des tensions thermiques.

Une mauvaise charge est souvent liée à un mauvais montage. Le roulement peut ainsi être monté autour d'un arbre trop grand ou le boîtier peut ne pas avoir la bonne forme pour le mouvement devant être effectué.

En cas de fatigue du matériau, cela commence généralement par de petites microfissures à la surface, qui se propagent vers l'intérieur du matériau et entraînent brusquement à un moment donné la cassure du roulement. La tension thermique, enfin, ne donne pas lieu à une décoloration.



**Figure(37) : Phénomène de Cassure des roulements.**

### **5-6-Erosion électrique :**

#### **-Tension trop élevée :**

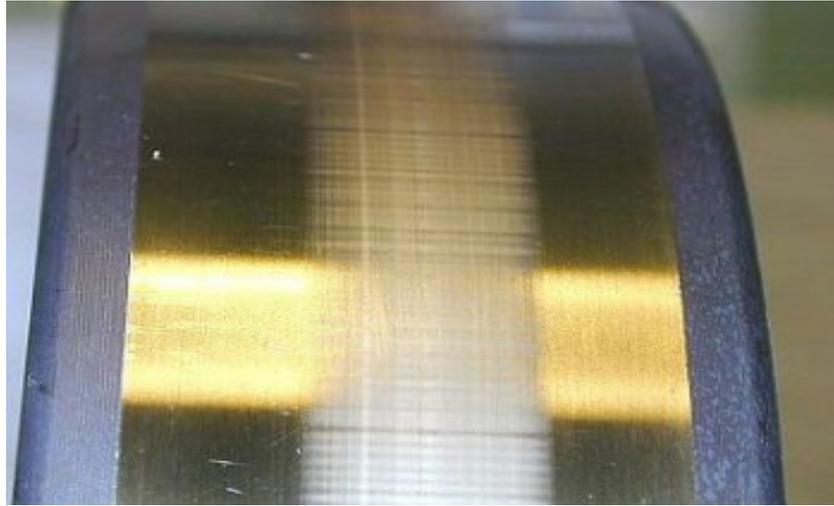
Lorsqu'un courant électrique passe par le roulement en raison d'une mauvaise isolation ou d'une isolation insuffisante, il risque de provoquer des dommages. Lorsque le courant passe par la petite surface des points de contact, cela va de pair avec des températures très élevées qui font fondre le matériau au niveau des points de contact.

Lors du refroidissement, les points de contact sont soudés puis arrachés. Cela cause l'apparition de gros cratères généralement visibles à l'œil nu (de 0,1 à 0,3 mm).

#### **-Courants de fuite :**

Les courants de fuite et de cheminement passant par le roulement peuvent aussi endommager ce dernier. Ce problème est courant lors de l'utilisation de variateurs de fréquence. Ici aussi, les points de contact dans le roulement sont soudés puis arrachés.

Le passage de courant produit toutefois de nombreux petits cratères invisibles à l'œil nu. La fusion et le refroidissement font durcir le matériau, qui devient très cassant. Ultérieurement, cela provoque une usure dans les lignes axiales sous la forme d'un genre de tôle ondulée. [4]



**Figure(38) : Phénomène d’Erosion électrique des roulements.**

### **6-Conclusion :**

La norme ISO distingue ici six causes principales reconnaissables: fatigue du matériau, usure, corrosion, érosion électrique, déformation plastique et cassure, Mais il ya aussi d’autre cause comme : Cannelures, Criques, Coloration, Usure par abrasion, Détérioration des cages.....etc.

L’expertise aussi nous montre que les ruptures de roulement peuvent être évitées. Montages, lubrification inadéquate et pollution.

## **1-Définition de Courants de Foucault :**

On appelle courants de Foucault les courants électriques créés dans une masse conductrice, soit par la variation au cours du temps d'un champ magnétique extérieur traversant ce milieu (le flux du champ à travers le milieu), soit par un déplacement de cette masse dans un champ magnétique constant. Ils sont une conséquence de l'induction magnétique. Ce phénomène a été découvert par le physicien français Léon Foucault en 1851.

Les courants de Foucault sont responsables d'une partie des pertes (pertes par courants de Foucault) dans les circuits magnétiques des machines électriques alternatives et des transformateurs. C'est la raison pour laquelle les circuits magnétiques sont feuilletés : on cherche à limiter ces courants pour éviter trop de pertes par effet Joule. On améliore ainsi le rendement des transformateurs.

## **2-Principe de Courants de Foucault :**

Le feuilletage permet de réduire les pertes par courants de Foucault. Le champ magnétique variable au cours du temps est responsable de l'apparition d'une force électromotrice à l'intérieur du milieu conducteur. Cette force électromotrice induit des courants dans la masse. Ces courants ont deux effets :

- ils provoquent un échauffement par effet Joule de la masse conductrice ;
- ils créent un champ magnétique qui s'oppose à la cause de la variation du champ extérieur (loi de Lenz).

Lorsque la variation de flux est due à un déplacement du milieu devant un champ magnétique constant, les courants de Foucault sont responsables de l'apparition de forces de Laplace qui s'opposent au déplacement, d'où l'effet de freinage observé.

Pour un circuit magnétique composé d'un empilage de tôles, il convient d'ajouter un coefficient de remplissage inférieur à 1 : une partie du volume du circuit magnétique correspond à la résine qui isole les plaques les unes des autres et qui ne doit pas être pris en compte pour le calcul des pertes.[5]

## **3-Description de phénomène des courants de Foucault :**

Les courants de Foucault sont des courants induits qui prennent naissance par exemple dans un conducteur en mouvement dans un champ magnétique constant ou encore dans un solide métallique immobile soumis à une variation de champ magnétique.

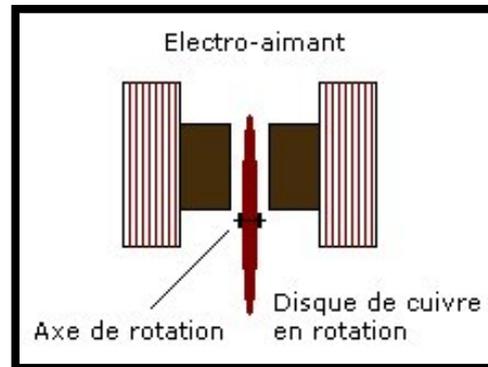
Toute variation de flux magnétique traversant la masse métallique produit des courants de Foucault.

**Exemple n°1 :**

Un disque de cuivre tourne entre les pôles d'un électro-aimant.

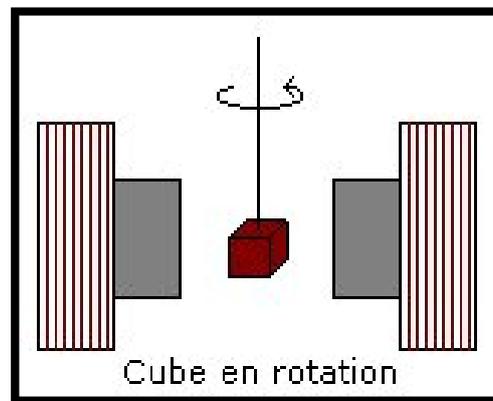
-Si l'électro-aimant n'est pas parcouru par un courant, le disque tourne librement.

-Si l'électro-aimant est parcouru par un courant, le disque est freiné et s'échauffe.



**Figure (39) : Un disque de cuivre tourne entre les pôles d'un électro-aimant.**

**Exemple n°2 :** un cube de cuivre tourne entre les pôles d'un électro-aimant, Le cube est accroché à un fil de torsion que l'on tord. Quand il est abandonné, il tourne s'il n'est pas soumis à l'action de l'électro-aimant, Le cube s'arrête immédiatement si un courant passe dans l'électro-aimant.



**Figure (40) : un cube de cuivre tourne entre les pôles d'un électro-aimant.**

### 3-1-Les courants de Foucault dans la vie courante :

#### 3-1-Les courants de Foucault favorables:

-Le four à induction est constitué d'une pièce métallique soumise à un champ magnétique variant à fréquence élevée. Les courants de Foucault s'établissant dans la pièce métallique immobile provoquent un échauffement par effet joule.

-Le freinage des camions s'effectue grâce aux courants de Foucault. Un disque de cuivre est fixé sur la roue du camion en rotation. Si on veut freiner le véhicule, on fait passer un courant électrique dans l'électro-aimant qui est placé près du disque.

Les courants de Foucault s'opposent à la cause qui leur donne naissance : le mouvement de la roue. La force de Laplace  $\vec{F} = I \vec{l} \wedge \vec{B}$  exercée par le champ magnétique de l'électro-aimant s'oppose au mouvement de la roue. Ce type de freinage ne peut être que complémentaire à un freinage classique, car lorsque la roue est ralentie, les courants de Foucault diminuent.

### **3-1-Les courants de Foucault défavorables:**

- Ils sont à l'origine d'échauffement dans les transformateurs.
- Ils provoquent de pertes d'énergie dans les installations électriques. [6]

## **4-Applications des courants de Foucault :**

### **4-1-Freinage :**

Des systèmes de freinage à courants de Foucault sont utilisés notamment sur les véhicules poids lourds<sup>1</sup> et sur les autocars sous le nom de « ralentisseur », ou sous le nom commercial Telma, marque d'un important fabricant de ce système de freinage. Le premier brevet de ralentisseur électromagnétique a été déposé par Steckel en 1903. Raoul Sarazin a réalisé en 1936 la première application pratique sur véhicule d'un ralentisseur utilisant le principe des courants de Foucault.

Des disques solidaires des roues sont encadrés par des électroaimants fixés au véhicule. Lorsque ceux-ci sont mis sous tension, les courants induits dans les disques vont générer un couple de freinage. Ces freins sont intéressants du fait des économies d'entretien : rareté des réglages et quasi absence d'usure (pas de contact, pas de frottement mécanique). Néanmoins ce type de freinage n'est efficace que si la vitesse est élevée et ils ne peuvent en aucun cas permettre le blocage d'un véhicule à l'arrêt. C'est pour cela qu'ils sont doublés de freins classiques, à frottement, et que les roues ne peuvent se bloquer (comme dans le cas d'ABS). L'inconvénient est que l'énergie est dissipée par effet Joule sous forme de chaleur et donc non récupérée.

Dans les chemins de fer, la rame à grande vitesse ICE 3 de la Deutsche Bahn utilise un système de freins à courant de Foucault comme système de frein de service sur certaines lignes nouvelles, et comme système de freinage d'urgence ailleurs.



**Figure (41):Frein à courants de Foucault sur un train rapide japonais Shinkansen.**

#### **4-2-Chauffage :**

Le chauffage par induction est produit par les courants de Foucault induits dans la pièce à chauffer. Ce type de chauffage est donc réservé aux matériaux conducteurs. Il est par exemple utilisé dans les plaques de cuisson à induction, et également en métallurgie avec les fours à induction qui chauffent le minerai jusqu'à sa température de fusion.

#### **4-3-Brasage :**

Dans le cas du brasage par induction, on place les éléments à braser dans un champ électromagnétique puissant pour chauffer les pièces ainsi que le métal d'apport.

#### **4-4-Séparateur à courant de Foucault :**

On utilise les courants de Foucault pour le tri et la séparation des matériaux hétérogènes en vrac.

Le premier séparateur fut réalisé en 1984 par le thermodynamicien Hubert Juillet, inventeur du procédé, pour le compte de l'usine verrière B.S.N de Wingles (Gervais-Danone) pour le recyclage du verre, afin de séparer les métaux non-ferreux (dont les capsules) du verre<sup>2</sup>.

Actuellement de très nombreux séparateurs sont en service de par le monde, principalement dans les domaines du recyclage et de la minéralurgie.

#### **4-5-Autres applications :**

Les compteurs EDF ancien type (à roue dentée) utilisent le principe des courants de Foucault.

On utilise les propriétés des courants de Foucault pour réaliser des capteurs de distance sans contact. Ils sont généralement constitués d'une bobine excitée à haute fréquence

(200 kHz à 2 MHz), la proximité d'une pièce conductrice en modifie l'inductance, la mesure de cette inductance permet de déterminer la distance de la pièce mesurée.

Les courants de Foucault sont également utilisés en contrôle non destructif, par exemple pour la détection des fissures dans les pièces métalliques comme les rails ferroviaires. En effet, en cas de défaut internes, les courants de Foucault sont différents, ce qui se traduit par une modification du champ magnétique induit. Ce principe de détection est utilisé pour le contrôle de la qualité de fabrication des lames des armes d'escrime sportive<sup>3</sup>.

Certains compteurs de vitesse à aiguille utilisent également les courants de Foucault : un aimant est relié à une roue, cette roue est entourée par un tube métallique sur lequel est fixé une aiguille, le tube pivotant autour de son axe est retenu par un ressort en spirale, lequel est chargé de ramener l'aiguille à zéro. Plus la roue tourne vite, plus la force exercée sur le ressort est grande, et plus l'aiguille s'éloigne de sa position initiale. [5]



**Figure (42) : Ancien compteur électrique français (EDF).**

### **5-La fiabilité des moteurs électriques et le courant de Foucault :**

La fiabilité des moteurs électriques est un objectif important pour les concepteurs des chaînes de traction. Elle est justifiée dans un premier temps par un désir de fournir au client le maximum de qualité de service et dans un deuxième temps de garder les coûts de maintenance dans des limites les plus basses possibles. En résumé, un moteur fiable est un moteur dans lequel l'utilisateur a confiance. Il a été observé, dans des études, que la cause principale des défauts sur les moteurs électriques est la défaillance des roulements. Ces défauts ont des origines mécaniques, mais aussi électriques.

L'analyse des causes électriques de la défaillance des roulements a débuté dès les années 1920 on retrouve ainsi les phénomènes électrostatiques ou les non symétries du flux dans la machine pour expliquer les passages de courant. Ces phénomènes ont été étudiés et classés comme des phénomènes de basse fréquence, c'est-à-dire liés au fondamental du

courant statorique. L'analyse de ces phénomènes s'est affiné depuis et maintenant des correctifs sont mis en place dans la phase de conception. A ce titre, tous les alternateurs de centrales électriques sont équipés de dispositifs permettant d'éviter les passages de courant dans les paliers.

Dans les années 1980, l'avancement dans le domaine des semi-conducteurs et de l'électronique de puissance a conduit à l'apparition des alimentations à modulation de largeur d'impulsion (MLI). Ces alimentations ont permis d'obtenir la flexibilité du couple en fonction de la vitesse nécessaire pour la traction ferroviaire.

Un effet secondaire des alimentations MLI est que des fronts de tension de plus en plus raides arrivent aux bornes des machines. Ces fronts excitent des capacités parasites qui se trouvent entre les composants du moteur ; en régime sinusoïdal ces chemins étaient beaucoup trop impédants pour être traversés par des courants significatifs. Les fronts de tension ( $dV/dt$ ) des MLI utilisées dans la traction ferroviaire aujourd'hui sont au niveau moyen de  $3.5kV/\mu s$  ( $10kV/\mu s$  niveau maximal), ce qui se traduit par des fréquences équivalentes de front de l'ordre de la centaine de kHz. Par rapport aux phénomènes expliqués précédemment, on se retrouve sur des problématiques hautes fréquence. Par des différents couplages (capacitifs et inductifs) et différents cheminements du courant dans la machine, ces fronts de tension excitent des courants parasites qui traversent les machines et qui se retrouvent finalement dans les roulements.

## **6- la défaillance des roulements due au passage du courant:**

Les chaînes de motorisation asynchrone de forte puissance ont rentrées dans une phase de maturité depuis quelques années, néanmoins quelques problèmes subsistent liés à l'alimentation de ces moteurs par des convertisseurs statiques dont les commutations sont de plus en plus rapides. Les fronts de tension engendrés par les commutations de l'électronique de puissance sont à l'origine du développement de courants parasites se propageant dans toute la machine. Leur circulation est liée à des phénomènes complexes tant d'un point de vue électrostatique que magnétique et ce dans le domaine des hautes fréquences. Les ordres de grandeurs actuels nous conduisent couramment à des phénomènes dans la gamme de fréquence du MHz. Une partie de ces courants traversent les paliers de la machine et suivant leurs amplitudes sont susceptibles d'occasionner des dégradations à plus ou moins long terme.

Ces phénomènes impactent la durée de vie de l'équipement et impliquent d'importants coûts de maintenance. De fait il paraît fondamental pour le concepteur d'une part de mieux

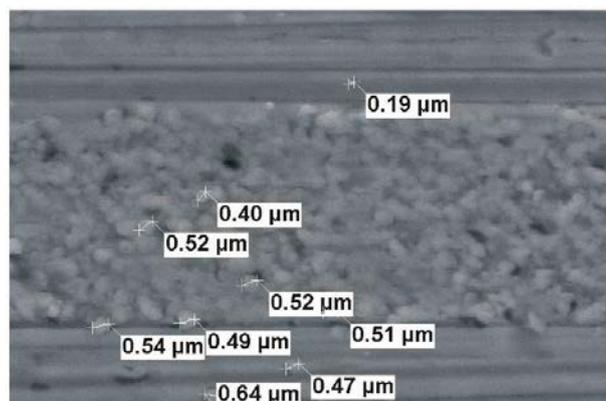
comprendre l'origine de ces phénomènes et d'autre part de mieux les quantifier lors de la phase de la conception.

L'évaluation des courants de paliers en phase de conception, permet d'agir sur des paramètres système ou de mettre en œuvre des solutions afin de les réduire.

L'étude des courants de palier est assez ancienne. Elle a commencé il y a plus de 50 ans par les travaux d'Alger [Alger Thèse, 1950] et a été poursuivie jusqu'à présent par des chercheurs Européens et Américains. A l'origine, les préoccupations concernaient principalement l'écoulement de courantes basses fréquences liées à des imperfections constitutives de la machine elle-même.

Les articles trouvés dans la littérature nous montrent que les effets des courants de palier sur les roulements engendrent deux types de dommage. Le premier concerne la dégradation de l'état de surface des billes et des chemins de roulement et le second, la dégradation chimique du lubrifiant des roulements. Ces deux phénomènes ne sont pas sans interaction l'un par rapport à l'autre. Les courants de palier peuvent se manifester sous la forme d'arcs électriques qui se déchargent entre une bague et une bille ou rouleau. Ce phénomène se manifeste si la bague et la bille ne sont pas en contact, ce qui est le cas dans le fonctionnement du moteur tournant au-delà d'une certaine vitesse. L'arc électrique, ayant une température de plusieurs milliers de degrés, fond le métal sur la bague et la bille au point de contact. Ce phénomène, appelé « piquage », engendre des micro-cratères dans les parties roulantes : bagues et billes. La figure(43) montre un exemple de vue microscopique sur une bague de roulement affectée par le piquage. Les micro-cratères sont une des causes de la fatigue prématurée du métal.

Des particules métalliques peuvent aussi se retrouver en suspension dans le lubrifiant.



**Figure (43) : Exemple de piquage sur une bague de roulement suite aux décharges.**

L'autre cause d'usure accélérée des roulements, est la dégradation chimique du lubrifiant]. Le lubrifiant se dégrade à cause des arcs qui apparaissent en son sein, mais aussi à cause de l'échauffement excessif engendré par les courants qui le traverse, La dégradation du lubrifiant induit également une usure prématurée du roulement.

## **7-Origines des courants dans les paliers :**

Les courants qui s'écoulent à travers les paliers des moteurs ont de multiples origines et ne dépendent pas seulement de la machine ou de son alimentation électronique. On peut lister ci-dessous, différentes causes de ces courants de circulation :

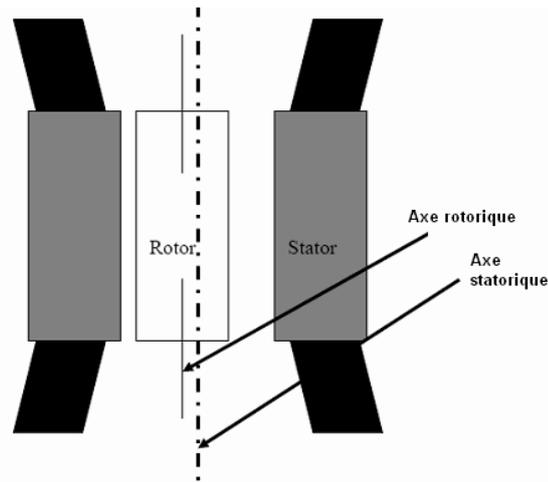
1. dissymétries dans le flux magnétique de la machine (excentricité du rotor, saturations locales, etc...). Les courants qui en résultent sont plutôt basse fréquence.
2. phénomènes électrostatiques provoqués par le frottement des parties tournantes dans l'air
3. phénomènes hautes fréquences provoqués par l'alimentation électronique
4. courants injectés dans l'arbre de la machine par la charge entraînée.

### **7-1-Dissymétrie dans le flux magnétique :**

Plusieurs aspects constructifs de la machine peuvent amener à créer une dissymétrie du flux magnétique dans la section radiale. Parmi les plus importants et qui peuvent concerner les moteurs, on peut citer : l'excentricité du rotor par rapport au stator et les saturations magnétiques locales. Les courants de paliers induits dans ce cas sont basse fréquence.

### **7-2-Excentricité du rotor par rapport au stator :**

Les roulements des moteurs sont dimensionnés dans la phase de conception avec un jeu pour absorber les phénomènes de dilatation qui se produisent en état de marche. Quand le moteur est froid, le jeu dans les roulements est maximal et le rotor se retrouve de fait excentré. Lors de fonctionnement, la température du roulement et de l'arbre augmente, ce qui produit une dilatation qui recentre l'arbre. Le jeu est ainsi calculé pour que le roulement ne se bloque pas en fonctionnement nominal.



**Figure (44) : Excentricité du rotor par rapport au stator.**

Le phénomène présenté par la figure 6, l'axe de symétrie du rotor est excentré par rapport à l'axe de symétrie du stator), La diminution de l'entrefer sur une partie du moteur et l'augmentation de l'entrefer sur la partie diamétralement opposée modifie la répartition du flux magnétique. Cette dissymétrie dans le flux donne naissance dans l'arbre de la machine à une source de tension ce qui peut générer des courants de palier.

### **7-3-Saturations locales :**

Des saturations locales en cours de fonctionnement peuvent provoquer le même type de conséquences que l'excentricité du rotor. En effet, le circuit magnétique statorique n'est pas toujours parfaitement symétrique ; des trous de ventilation, de fixation ou autre raison peuvent modifier la section de passage du flux magnétique à certains endroits. En cas de haut niveau de flux dans la machine, des saturations partielles apparaissent entraînant la création d'un flux circonférentiel et des tensions d'arbre.

### **7-4-Phénomènes électrostatiques :**

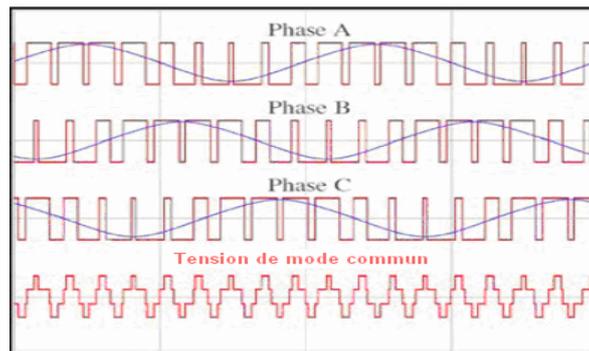
L'étude des courants de palier d'origine électrostatique ne va pas être traitée dans cette thèse car ils ne concernent pas les moteurs et cela du fait de leurs dimensions. Le phénomène est rencontré dans les générateurs de grandes dimensions qui sont reliés à une turbine à vapeur par un arbre qui est évidemment conducteur.

### **7-5-Phénomènes hautes fréquences :**

L'introduction de l'alimentation des moteurs électriques par des onduleurs (MLI) dans la traction ferroviaire, a permis de remplacer les moteurs à courant continu par des moteurs asynchrones à cage. Ces derniers présentent des avantages en termes de coût de fabrication et

par coût d'exploitation bien inférieur vue l'absence de balais. L'alimentation par onduleur MLI a donné aux moteurs asynchrones la flexibilité du couple moteur dont ils avaient besoin pour être une solution valide pour la traction.

L'utilisation des pilotages qui gardent le flux constant dans la machine (donc le rapport  $U/f$  constant) permet aux moteurs de traction de démarrer en basse fréquence en gardant un glissement correspondant au couple nominal du moteur. Par contre l'alimentation par MLI induit de fait une tension de mode commun dans l'enroulement statorique (Fig45)



**Figure (45) : Forme d'onde d'un MLI à deux niveaux.**

Une analyse fréquentielle des formes d'onde de tension utilisées, nous montre que la fréquence maximale générée par ces fronts peut aller au delà d'1 MHz. La tension de mode commun de haute fréquence excite les capacités parasites de la machine et les courants qui apparaissent se referment en partie par les roulements.

La tension de mode commun aux bornes du moteur ( $V_{com}$ ) est calculée de la manière suivante :

$$V_{com} = \frac{U_a + U_b + U_c}{3}$$

Avec  $U_a + U_b + U_c$  les tensions simples appliquées respectivement aux phases A, B et C.

### **7-6-Courants injectés par le système :**

Dans un système embarqué et selon le schéma d'impédance du circuit électrique mis en jeu, des courants peuvent être injectés dans les roulements des moteurs de traction via l'arbre accouplé à la transmission. Ce type de courants n'est pas traité dans ce travail. [7]

### **8-conclusion :**

L'érosion électrique provoque des cavités microscopiques relativement profondes. Elle est due à des courants électriques intenses qui traversent le roulement et créent de petits arcs accompagnés d'une fusion locale et d'une trempe. En général, le défaut provient de ce que l'on a utilisé l'arbre comme masse lors d'une opération de soudage.

## **Etude de cas de défaillance de roulement :**

### **1-Introduction :**

Dans le cas des avaries de roulements, il est parfois compliqué pour l'utilisateur de déterminer précisément l'origine de la défaillance dans un système composé de divers éléments qui peuvent entraîner une sollicitation d'ordre mécanique ou électrique. En effet, les premières constatations visuelles peuvent souvent orienter l'expertise vers une origine mécanique du problème (vibrations, chargement, défaut de lubrification, problème d'ajustement...), or dans certain cas, il peut s'agir d'une conséquence dont l'origine est tout autre.

Prenons le cas d'un roulement à billes pour matériel roulant sur Moteurs de Pompage anormalement endommagé après la durée de vie de service de roulement. [8]



**Figure (45) : Le Moteur de Pompage.**

### **2-Objet :**

Identifier la cause qui est à l'origine de la défaillance sur les roulements de moteurs de pompage pour la centrale SKD Après avoir identifié la cause, Il est établi un plan d'action pour résoudre le problème de façon à garantir la totale fiabilité de l'installation.

### **3-Situation :**

Lors de la mise en marche du central, les 6 moteurs de pompes correspondants au pompage de la centrale ont subi des défaillances au niveau des roulements du côté opposé. Ces anomalies/défaillances se sont produites tout au long des mois de Décembre 2012 et

Février 2013, et nous ont obligés à arrêter les moteurs/pompes pour pouvoir analyser les causes de cette défaillance.

**3-1-Les ratings du moteur sont les suivants:**

Puissance	2600	[kW]
Tension	6600	[V]
Courant	274,8	[A]
Fréquence	50,0	[Hz]
Vitesse	495	[rpm]
Facteur de puissance	0,864	[p.u.]
Rotation	CW	seen from DE
Duty	S-1	
Fourniture	Sinus wave	
Class thermique:	F	
Augm. Temperature :	B	
Température ambiante max.:	46	[°C]
Code montage:	IM-3011	
Niveau Protection:	IP-55	
Code Cooling:	IC-611	

**3-2- La plaque signalétique du moteur :**



#### 4-Le placement des moteurs dans la centrale :

Ligne 1		Ligne 2		Ligne 3	
Pos.1	Pos.2	Pos.3	Pos.4	Pos.5	Pos.6
Moteur n°403	Moteur n°405	Moteur n°404	Moteur n°402	Moteur n°406	Moteur n°407



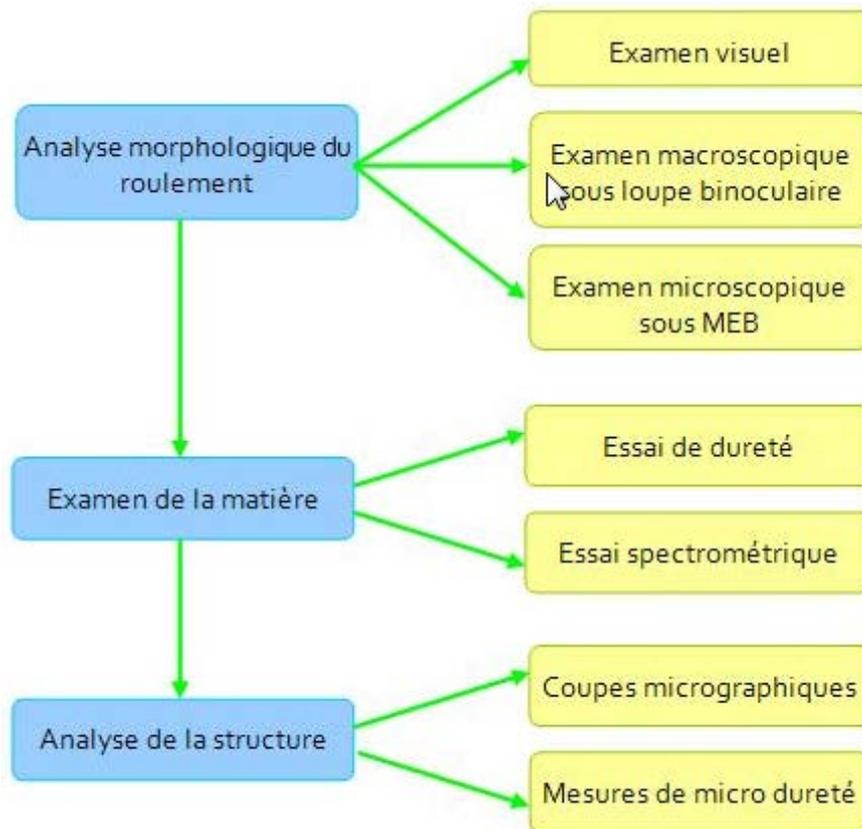
**Figure (46) : Le placement des moteurs dans le central. [1]**

#### 5-Analyse de la défaillance des roulements :

##### 5-1-Démarche :

En dehors des vérifications matières "conventionnelles" (essais de dureté, essais spectrométriques...), une analyse morphologique du roulement est réalisée, à l'aide de moyens macroscopiques (microscope binoculaire) et microscopique (Microscope Electronique à Balayage), afin d'analyser les défauts les plus caractéristiques. Pour compléter ces examens, des coupes micrographiques sont réalisées sur certains éléments du roulement, afin d'observer des phénomènes métallurgiques particuliers. Ces observations sur coupe sont complétées par des mesures de micro dureté très localisées.

Cependant, pour orienter au mieux l'expertise et permettre des pistes de réflexion ou de recherche, une parfaite connaissance des conditions d'exploitation du matériel roulant concerné est nécessaire.



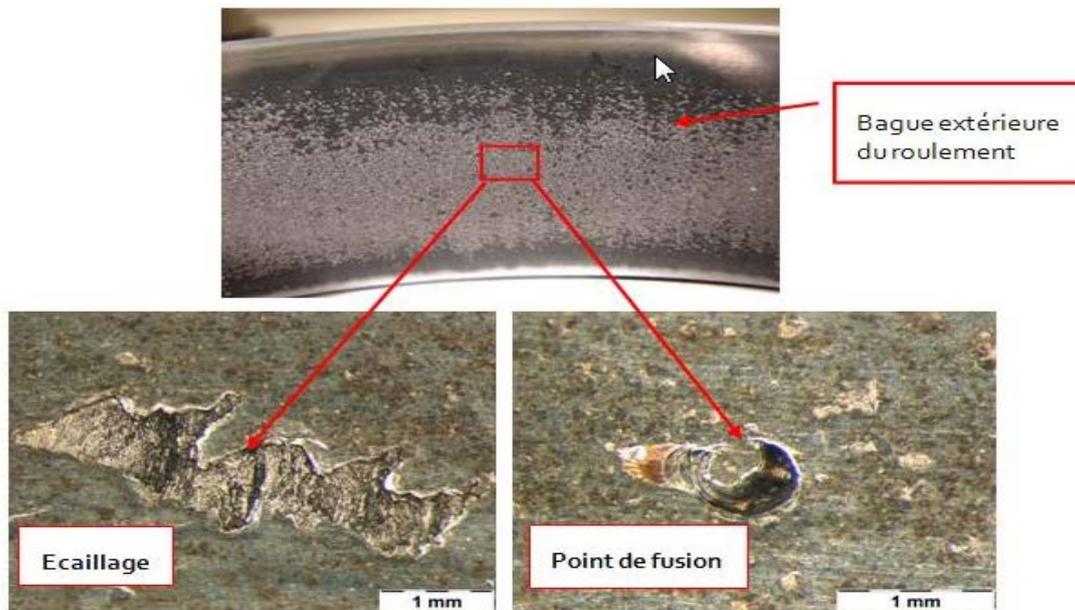
**Figure (47) : Diagramme de la démarche d'analyse (d'expertise).**

### 5-2-Expertise :

Les surfaces de roulement de bague extérieure présentent un aspect écaillé. Certains écaillages sont de grande dimension (>1 mm), et certains défauts, de forme circulaire, présentent un aspect proche d'un "point de fusion" (Figure48).

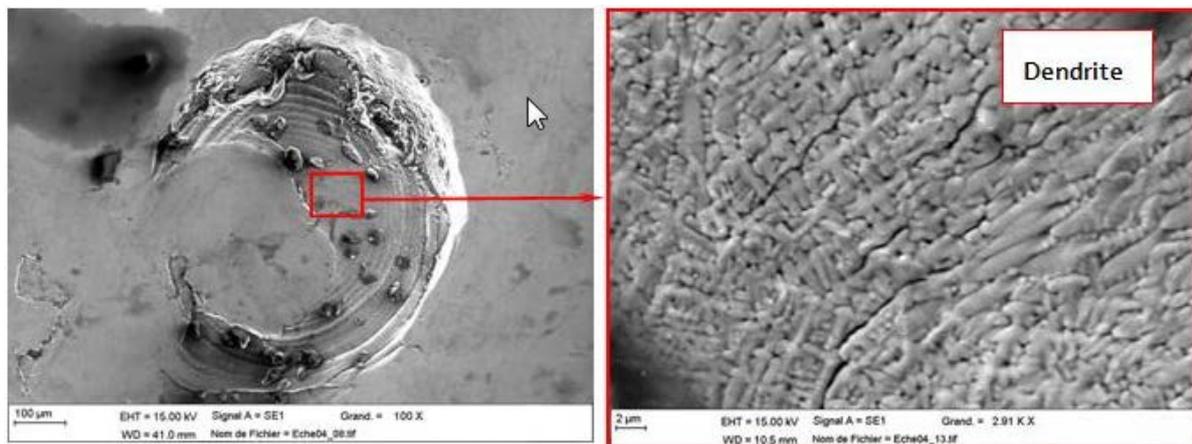


**Figure (48) : Vue générale du roulement défectueux.**



**Figure (49) : Vue de la surface intérieure de la bague extérieure de roulement.**

Afin de caractériser plus précisément chaque type de défaut, l'observation est poursuivie à l'échelle microscopique à l'aide d'un MEB (microscope électronique à balayage). L'observation sous fort grossissement (X 2900) du défaut d'aspect "point de fusion" révèle une surface dendritique qui confirme une fusion localisée du métal. Ces défauts sont également observés sur la surface des rouleaux coniques (Figure50).



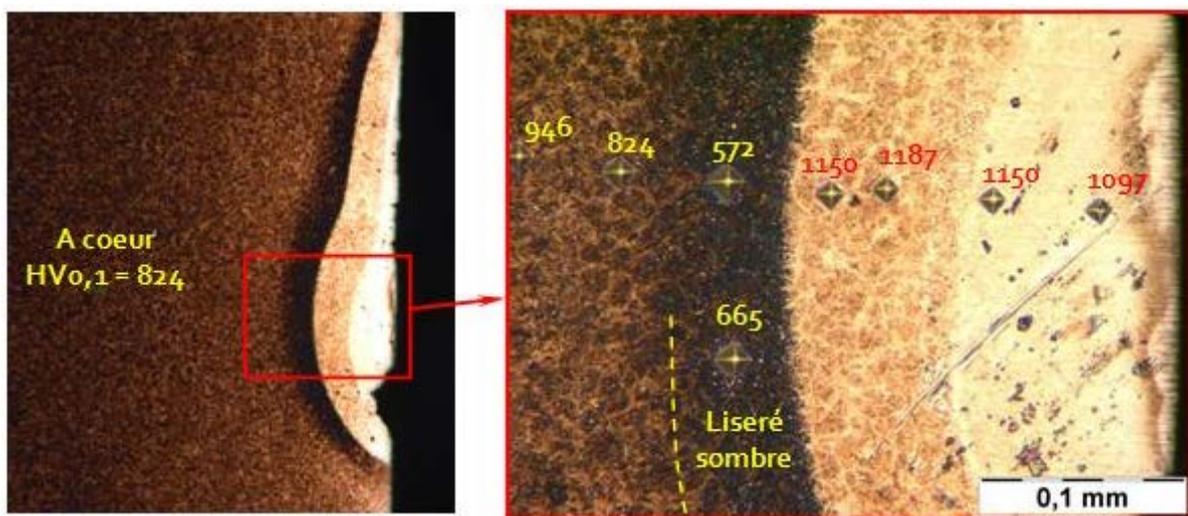
**Figure (50) : vue au MEB d'un point de la fusion x 2900.**

Dans le cas présent, il n'a pas été décelé au niveau matière, d'écart pouvant avoir un lien avec les détériorations constatées.

Une coupe est ensuite réalisée sur le roulement, au niveau du "point de fusion". La structure examinée présente la structure martensitique revenue, avec des carbures globulaires,

habituelle d'un acier à roulement. Cependant, les pistes des bagues du roulement présentent également des zones blanches en surface, en forme de lunule. Ces zones matérialisent de la martensite d'écroissage provoqué par les contraintes tribologiques liées à l'écrasement de particules arrachées ou de défauts de surface générés lors de la fusion localisée. Ces dégradations liées au passage de courant électrique sont à l'origine de l'écaillage mécanique observé également sur le roulement. En effet, les points de fusion, outre leur zone thermiquement affectée, génèrent des particules qui se détachent et qui sont ensuite écrasées entre les surfaces de roulement, générant ainsi des zones mécaniquement affectées (martensite d'écroissage), qui dégènèrent rapidement en écaillage.

La dimension importante du défaut permet de réaliser des essais de dureté Vickers HV 0,1, afin de mieux caractériser les différentes zones visibles (Figure 51).



**Figure (51) : coupe micrographique transversale à un défaut et micro dureté.**

La zone blanche présente des duretés très élevées (écrouissage). En revanche, le liseré plus sombre qui borde les zones claires, et qui présente une chute relative de dureté, est plus caractéristique d'une origine thermique.

Une fois les roulements du moteur n°403 démontés, nous procédons à l'analyse pertinente. Dans l'analyse du roulement (type 7338), nous observons les dommages produits sur la bague extérieure sous forme de fissures dus au passage continu de courant par roulements.



**Figure (52) : Détail des dommages produits.**

Pour le reste de moteurs, après avoir démonté les roulements LO (type 7338), nous observons également le même type de détérioration causé par le passage de courants induits.

Sur le roulement radial Côté O (type 6240) et le roulement Côté A (type 6044), nous n'observons aucun problème. [8]

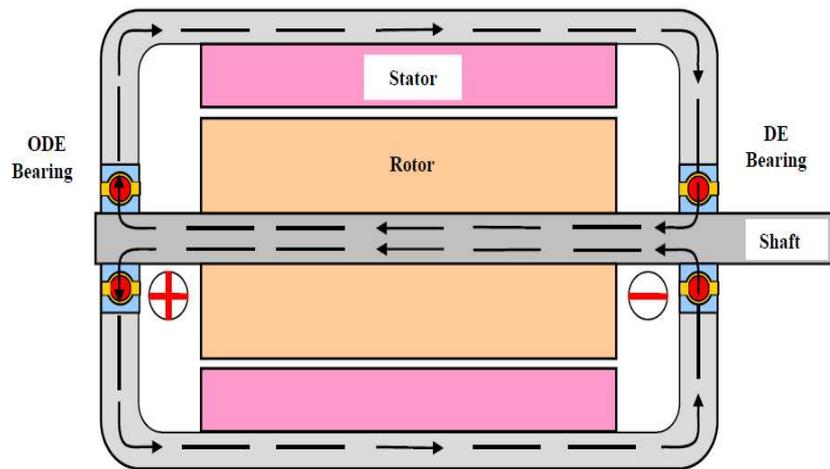
## **6-Description de ce type de défaillance :**

### **6-1-défaillance due au passage contenu de courant par roulements:**

L'érosion électrique est la cause de cette défaillance prématurée. Cet effet est connu, documenté et facilement identifiable lors de l'inspection d'un roulement démonté, ce qui est habituel sur les moteurs avec des variateurs de fréquence et moins commun sur les moteurs de ce type.

L'absence d'isolation sur les appuis de la carcasse facilite l'établissement d'un circuit électrique entre la carcasse et l'axe du moteur où le courant circule à travers les roulements.

Les décharges électriques qui se produisent à l'intérieur du roulement sont préjudiciables aux éléments roulants, aux pistes de roulement et lubrifiant. La formation de fissures et les piqûres électriques (petits cratères) ainsi que le lubrifiant brûlé et un haut niveau de vibration sont certaines des caractéristiques de l'érosion électrique. [1]



**Figure (53) : Situation d'origine : circulation de courant par roulements.**

### 6-2-Comportement électrique des roulements :

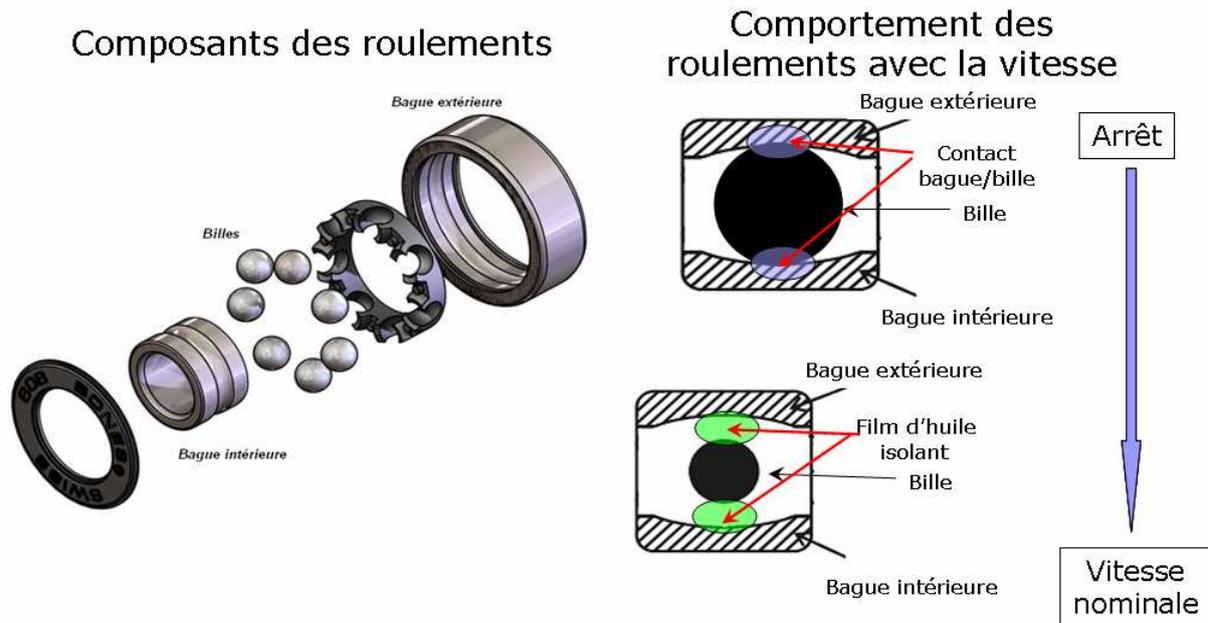
Les effets des courants de palier dépendent de plusieurs conditions mécaniques au niveau des roulements. D'une manière générale, deux situations peuvent se rencontrer :

1- au démarrage d'un moteur, l'épaisseur du film de lubrifiant qui s'interpose entre les billes/rouleaux et les bagues est de quelques nanomètres. Si une tension est appliquée entre les bagues du roulement, celles-ci sont facilement mises en contact par des électrons qui se déplacent d'une bague à l'autre par effet tunnel.

Dans ce cas, le roulement se comporte du point de vue électrique comme une résistance pure. Des échauffements sont à prévoir à cause du faible nombre de points de contact au sein du roulement.

2- après le démarrage, le moteur commence à monter en vitesse et progressivement, le film d'huile, qui au début ne faisait que quelques nanomètres, voit son épaisseur augmenter.

À partir d'une certaine vitesse, le roulement se comporte du point de vue électrique comme une capacité. Des tensions peuvent apparaître et si la rigidité diélectrique du lubrifiant, qui est en général isolant électrique, est dépassée alors il y a apparition d'arcs électriques qui engendrant des micro-cratères qui se forment sur les parties métalliques des roulements. [7]



**Figure (54) : Comportement des roulements en fonction de la vitesse du moteur.**

## 7-Conclusion :

L'examen matière a éliminé l'hypothèse de dégradations liées à un problème de fourniture.

Dans le cas traité, les points de fusion observés ne peuvent avoir pour origine qu'un phénomène électrique relatif à un passage de courant de forte intensité et exclu donc un phénomène d'origine mécanique.

En effet, sur le matériel roulant sur pneumatique, le retour de courant de traction, ainsi que la mise à la masse du bogie, sont réalisés par l'intermédiaire de frotteurs "négatif" et "de masse", qui frottent sur le rail fer. Un mauvais contact, entre ces frotteurs et le rail, peut générer des différences de potentiel entre la masse et le retour du courant de traction. Ce phénomène peut se manifester lorsque la roue fer entre en contact avec le rail (notamment lors du passage d'appareils de voie), et entraîne alors des passages de courants indésirables dans les roulements.

Ces conclusions vont alors permettre à l'utilisateur d'orienter ses actions correctives plus efficacement et rapidement. [8]

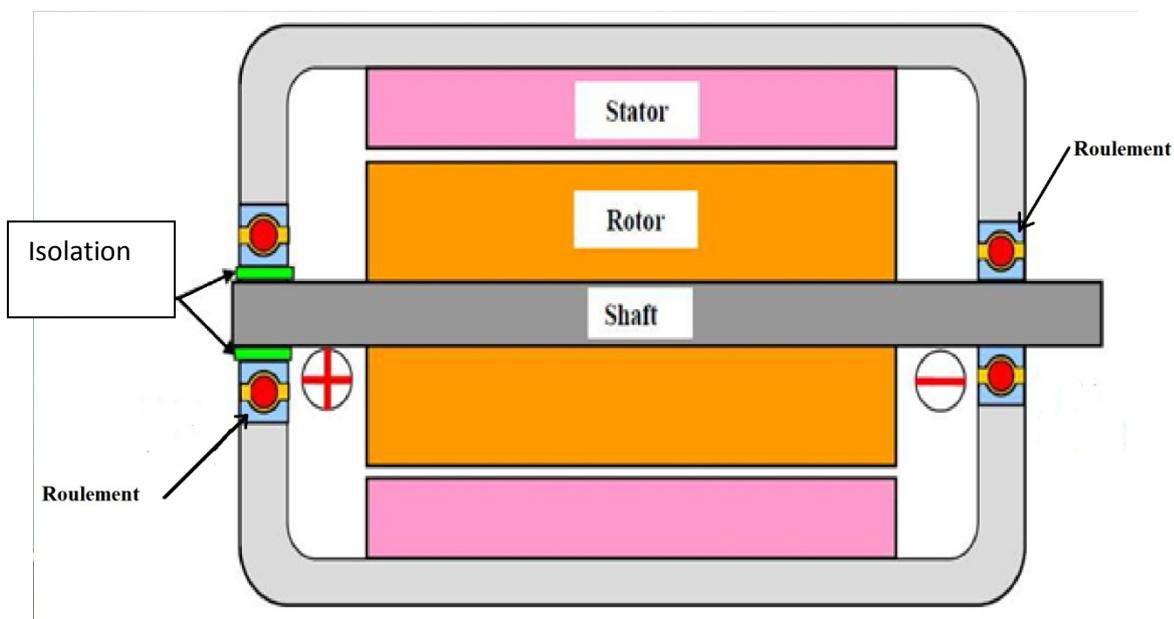
## **-Proposition de solution :**

### **1-solution: Implication du Service Maintenance de l'entreprise SKD :**

#### **1-1-Action corrective:**

Suite à l'analyse de la cause de la défaillance observée sur ces roulements, le service Maintenance propose une action consistant en l'ouverture du circuit, réalisée en annulant toute circulation de courant. Solution qui est effective face à toutes les causes possibles de génération de courants en circulation.

La solution consiste en l'isolation de l'un de deux côtés (partie gauche) et la mise à la terre de la partie droite par des balais, comme indiqué dans la figure suivante.

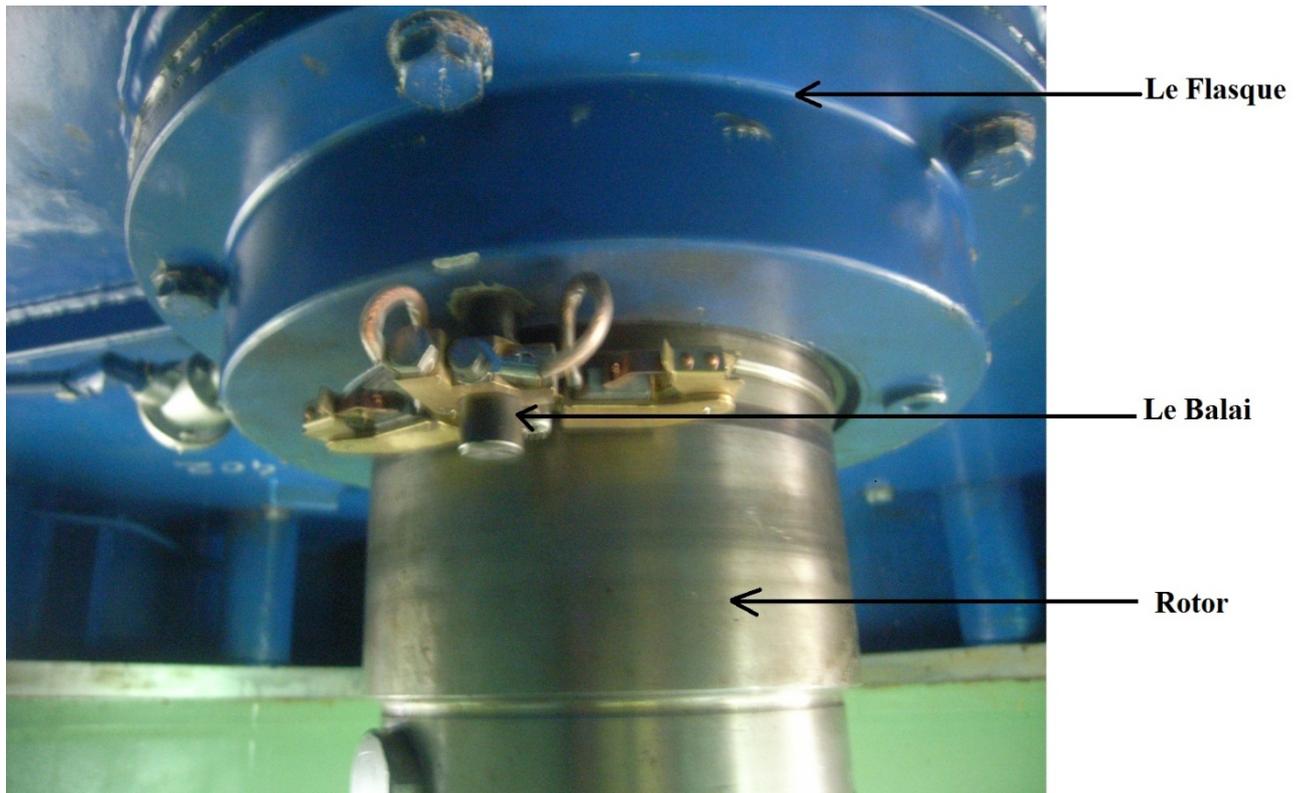


**Figure(55): Solution correctrice: isolé Côté Opposé.**

-Cette mesure corrective est suffisante pour annuler le passage de courant par roulements.

- Isoler l'appui Côté opposé en remplaçant le jeu de flasques d'origine (non isolées) par un jeu de flasques isolées. Voir plans dans la figure suivante. Tous les roulements associés aux flasques (côté opposé) seront remplacés par des roulements neufs.

Voir le schéma suivant :



**Figure(56) : Plan Flasque coté o isolé et Le Balai a la terre sure coté actionnement.**

- Maintenir l'appui Côté actionnement non isolé.
- Installer un balai côté actionnement
- ainsi, le côté A est référencé à la tension de terre.

Nous installons 2 balais de décharge à la terre, montés sur un même porte-balais. La figure (57) montre en détail le montage correspondant.

### **1-2-Action provisoire :**

Comme action provisoire, il a été décidé de disposer, en parallèle aux roulements, des balais de décharge autant sur le côté actionnement qu'opposé. Leur fonction est de conduire la plus grande partie du courant avec une impédance ( $Z$ ) inférieure à celle du roulement.

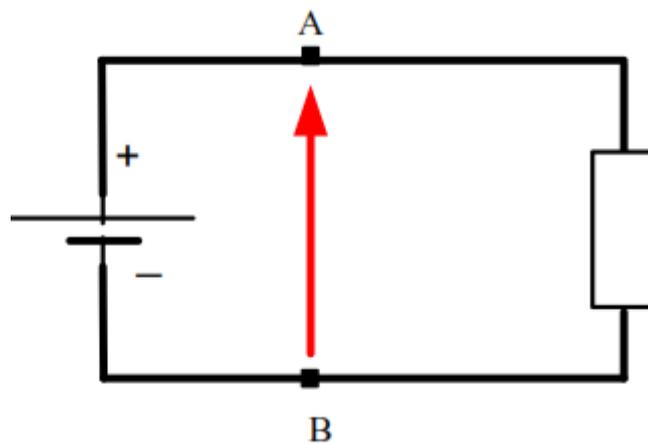
$Z$  : L'impédance est un nombre complexe, en général noté  $Z$ .

L'IEC préconise de nommer le module de l'impédance  $Z$  par le terme impédance apparente, noté  $Z^2$ .

Soit un composant électrique ou un circuit alimenté par un courant sinusoïdal  $I_0 \cos(\omega t + \varphi_i)$ . Si la tension à ses bornes est  $V_0 \cos(\omega t + \varphi_v)$ , l'impédance du circuit ou du composant est définie comme le nombre complexe dont le module est égal au rapport  $\frac{V_0}{I_0}$  et dont l'argument est égal à  $\varphi = \varphi_v - \varphi_i$ .

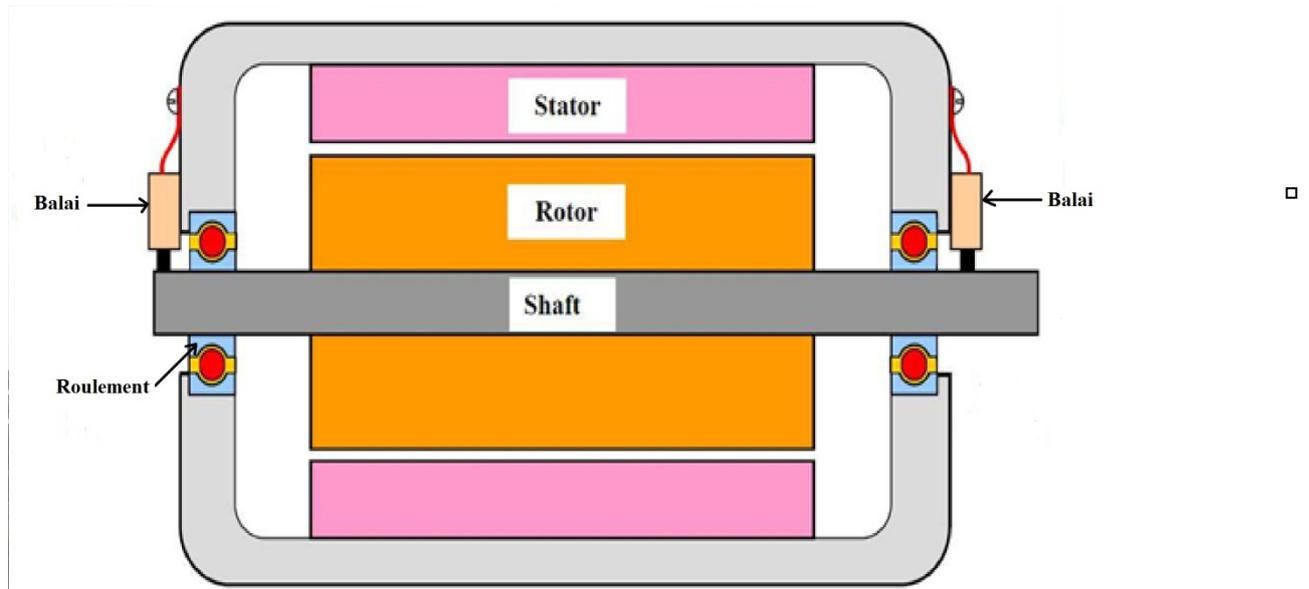
Néanmoins, il est nécessaire de réaliser des mesures sur le terrain afin de vérifier la tension (U) à laquelle est soumis le roulement. Cette configuration est décrite dans la figure suivante :

Tension : On appelle tension électrique ou différence de potentiel (ddp) U entre deux points A et B du circuit, le rapport de la variation de l'énergie électrique sur la quantité d'électricité Q qui est passé entre A et B.



Dans un montage en série, la tension totale est égale à la somme des tensions partielles :  $U_T = U_1 + U_2 + \dots$

Dans un montage en dérivation :  $U_1 = U_2 = \dots$



**Figure(57) : Solution provisoire et temporaire de contingence: installé des balais côté actionnement et côté opposé.**

### 1-3-- Les pas qu'il faut suivre sont:

- Remplacement des roulements par des roulements neufs,
- Avec l'action antérieur, afin de minimiser le passage du courant par les nouveaux roulements installés jusqu'à la mise en place de la solution corrective définitive, il faut également installer les balais de décharge, sur le côté actionnement et également sur le côté opposé.

#### -Conseils d'entretien :

En respectant quelques règles d'entretien simples, la durée de vie d'un roulement peut être prolongée considérablement :

- Respectez les spécifications : Ne dépassez pas les normes de charge, vitesse, rotation,... Il existe des roulements de toutes les dimensions et tous les poids. Choisissez donc le bon selon la fonction et l'application.
- Lubrification : Une lubrification fréquente et efficace est primordiale. Trop peu de lubrifiant ou du lubrifiant de qualité inférieure peut causer de graves dommages dans le roulement. Veillez donc à ce que tous les éléments soient lubrifiés suffisamment.

- Propreté : Un environnement et des outils propres contribuent à protéger le roulement des particules abrasives.
- Entretien : Les raccords et les fermetures doivent évidemment aussi être contrôlés régulièrement, afin qu'ils restent bien ajustés.
- Outillage : Utiliser le bon outillage pour monter et démonter les roulements est un moyen simple pour éviter des détériorations. Sinon, le roulement risque d'être endommagé avant la moindre heure de production. [4]

## **2-Solutions alternatives:**

### **INSOCOAT– la solution SKF pour prolonger la durée de service des roulements dans les machines électriques :**

#### **2-1-Introduction :**

Les moteurs électriques, générateurs et équipements associés peuvent être détériorés lorsqu'un courant électrique traverse un roulement. Ceci peut endommager les surfaces de contact des éléments roulants et des pistes dans le roulement (érosion électrique) et dégrader la graisse rapidement. En outre, les moteurs électriques et générateurs sont exposés à la courante haute fréquence en raison des capacités parasites internes. Le risque de dégâts augmente si l'application utilise un convertisseur de fréquence.

#### **2-2-Sources de courant électrique :**

Le problème du courant électrique qui passe à travers les roulements et endommage les zones de contact entre les éléments roulants et les pistes des bagues intérieures et extérieures est connu depuis près de 70 ans. En outre, on pensait également que le passage du courant entraînait une modification de la structure même du lubrifiant.

Toutes les machines électriques tournantes, à courant continu ou alternatif, peuvent être affectées par ce phénomène.

#### **a)-Pannes classiques :**

Avec les alimentations sinusoïdales, le courant de roulement est généré par des asymétries dans le circuit magnétique du moteur.

La répartition asymétrique du flux dans le moteur induit une tension d'arbre axiale qui génère une courante basse fréquence à travers les roulements. Le courant de roulement peut aussi provenir d'un câblage asymétrique non blindé.

Ces courants "classiques" dans les roulements posent particulièrement problème pour les gros moteurs à faible nombre de pôles (ex. : moteurs à deux pôles), les asymétries de flux y étant plus importantes que dans les moteurs plus petits ou à plus grand nombre de pôles.

### **b)-Courants à haute fréquence :**

En plus des tensions et courants classiques générés par le moteur lui-même, d'autres effets ont été observés sur les moteurs alimentés par un variateur MID à modulation de la largeur des Impulsions (fréquences de 3 à 16 kHz). Il a été constaté que les roulements étaient endommagés par un flux de courant à haute fréquence (gamme de plusieurs kHz –MHz). Le courant provient de ce que l'on appelle la tension de mode commun du variateur de fréquence.

Par ailleurs, la commutation rapide des semi-conducteurs IGBT (transistors binaires à porte isolée) utilisés dans les variateurs est également une source de courants.

Les problèmes rencontrés sont dus à trois types de courants :

- courants de masse HF dans l'arbre
- courants circulants HF
- courants de décharge capacitive.

Les deux premiers types de courants sont dus à la tension de mode commun en sortie du convertisseur.

Elle est produite lorsque la somme des tensions triphasées n'est pas nulle de plus, le variateur de fréquence vise à simuler une alimentation sinusoïdale avec des signaux MID, qui sont des impulsions très abruptes à fréquence de commutation élevée pouvant entraîner des courants de décharge capacitifs.

### **2-3-Définition du roulement INSOCOAT :**

Un roulement INSOCOAT SKF est un roulement standard dont les surfaces extérieures de sa bague intérieure ou extérieure sont recouvertes d'un revêtement d'oxyde d'alumine projeté au plasma. Le revêtement est étanchéiste avec une résine pour protéger contre les effets conducteurs de l'eau et de l'humidité. Le revêtement de base peut supporter des tensions allant jusqu'à 1 000 V CC. Toutefois, Le constructeur est capable de fournir sur demande des revêtements résistants aux courants allant jusqu'à 2 000 ou même 3 000 V CC.

#### **a)-Roulements INSOCOAT avec bague extérieure isolée :**

Le diamètre extérieur et les faces latérales des roulements INSOCOAT sont généralement revêtus d'oxyde d'alumine. Ces roulements sont alors identifiés par le suffixe de désignation VL0241.

**b)-Roulements INSOCOAT avec bague intérieure isolée :**

Les roulements INSOCOAT dont l'alésage et les faces latérales de la bague intérieure sont revêtus, sont identifiés par le suffixe de désignation VL2071. Ces roulements fournissent une plus grande protection contre les courants électriques de haute fréquence, grâce à la surface revêtue plus petite de la bague intérieure par rapport à la bague extérieure.



**Figure(58) : Roulements INSOCOAT.**

**2-4-L'objectif de l'utilisation du roulement INSOCOAT :**

SKF propose un roulement isolant, qui assure une protection contre les dommages dus aux courants électriques. La bague extérieure ou la bague intérieure de ce roulement est revêtue d'un matériau isolant. Le revêtement peut être appliqué sur les bagues, extérieures, (spécification VL0241) d'un diamètre de 80 mm et plus ou sur Les bagues intérieures (spécification VL2071) de 70 mm d'alésage minimum. Pour les plus petits diamètres, nous recommandons d'utiliser des roulements hybrides SKF. Le revêtement est constitué d'une couche d'oxyde d'alumine d'une épaisseur nominale de 100  $\mu\text{m}$  appliquée par un procédé spécial de projection par torche plasma.



**Figure(59) : Roulements INSOCOAT avec revêtement sur la bague extérieure – spécification VL0241.**

## **2-5-Effets du passage de courant électrique dans un roulement :**

Le passage du courant électrique dans la zone de contact des éléments roulants et des pistes génère de la chaleur qui fait fondre localement l'acier en surface. Des cratères se forment et des particules de métal fondu sont partiellement, détachées et laminées.

La matière au niveau du cratère devient plus dure et donc bien plus cassante que la matière d'origine. Sous la couche rendurcie se trouve une couche de matière recuite qui est moins dure que la matière qui l'entoure.

### **a)-Micro-cratères**

Comme l'utilisation de variateurs de fréquence est désormais très commune, les micro-cratères sont de loin le type le plus fréquent des détériorations dues au courant électrique. La surface endommagée a un aspect mat, caractérisé par des marques de métal fondu

De nombreux micro-cratères apparaissent sur les éléments roulants et les surfaces des chemins de roulement. Les cratères ont un petit diamètre, généralement entre 5 et 8  $\mu\text{m}$ , quel que soit leur emplacement (éléments roulants, bague extérieure ou intérieure).

La forme réelle de ces cratères ne peut être observée qu'au microscope à très fort grossissement.



**Figure(60) : L'aspect mat de la surface de la bille signale la présence de micro cratères.**

**b)-Cannelures, ondulations :**

Les cannelures ou ondulations sont des lignes grises en travers des chemins de roulement.

Elles ont un aspect brillant et s'accompagnent de métal fondu. La cause en est une vibration de résonance mécanique générée par le comportement dynamique des éléments roulants à leur passage sur les petits cratères.

Les cannelures ne sont donc pas un mode de défaillance primaire due au flux de courant à travers le roulement, mais plutôt un dommage secondaire bien plus tardif, provoqué par les petits cratères.



**Figure(61) : Cannelures ou ondulations sur le chemin de roulement constituant des dégradations secondaires.**

**c)-Noircissement de la graisse :**

Les décharges électriques modifient aussi la composition du lubrifiant et le dégradent rapidement. Les fortes températures locales entraînent une réaction entre additifs et huile de

base qui peut brûler ou carboniser cette dernière. Les additifs se consomment plus vite. Le lubrifiant devient alors presque dur et noir. La décomposition rapide de la graisse est un mode de défaillance typiquement lié au passage de courant.



**Figure (62) : Graisse noircie par les décharges électriques à hautes fréquences.**

## **2-6-Les avantages de l'utilisation du roulement INSOCOAT :**

### **a)-Avantages pour l'utilisateur :**

Assurent une double fonction :

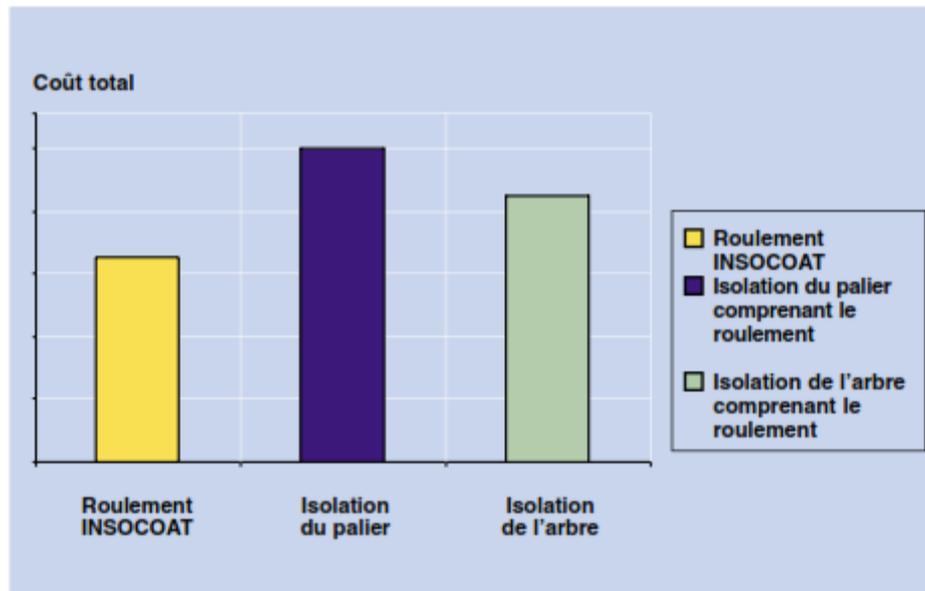
- fonction de roulement
- fonction d'isolation électrique

Permettent de réduire le nombre des pannes et d'augmenter le temps de disponibilité des machines.

Réduisent les coûts de maintenance.

Constituent la solution d'isolation la plus économique.

Sont disponibles dans le monde entier grâce à la présence de SKF dans 130 pays, avec 7 000 centres de Distribution Agréés.



**Figure(63) : Les roulements INSOCOAT constituent une solution plus économique que les autres méthodes d'isolation.**

#### **b)-Avantages techniques :**

- Le revêtement standard de 100  $\mu\text{m}$  d'épaisseur permet d'éviter la plupart des problèmes de passage, de courant.
- SKF effectue des essais à 100 % jusqu'à 1 000 V CC. Les essais en laboratoire ont montré que les pannes électriques se produisent à plus de 3 000 V CC.
- Les roulements INSOCOAT assurent une résistance ohmique minimale de 50  $\text{M}\Omega$  à 1 000 V CC.
- Le procédé d'application par la technique de projection plasma avec, pré- et post-traitements sophistiqués des bagues assure une qualité exceptionnelle du revêtement.
- Les roulements INSOCOAT bénéficient d'un matériau d'étanchéité spécial, qui isole contre l'humidité, est insensible à la chaleur et aux produits chimiques.
- Les roulements INSOCOAT procurent de meilleures performances électriques et mécaniques que les autres modes d'isolation.
- SKF peut fournir les caractéristiques et paramètres électriques du roulement (capacité, impédance).

#### **c)-Autres avantages :**

- Montage et démontage faciles. Les roulements INSOCOAT peuvent être manipulés dans les mêmes conditions que les roulements standards.

- Des ajustements jusqu'aux tolérances p6 et P6 (incluses) sont possibles pour les deux versions (VL2071 et VL0241).
- Dimensions d'encombrement normalisées ISO 15 : 1998.
- Respectueux de l'environnement.
- Les roulements INSOCOAT conviennent pour tous types de paliers.
- SKF dispose de plus de vingt ans d'expérience dans les revêtements en céramique.

### **2-7-Procédé d'enduction : technique de la projection plasma :**

Cette technique qui est considérée comme un procédé de traitement de surface présente les avantages suivants :

- La projection plasma est un procédé d'enduction thermique d'une grande souplesse qui produit des revêtements haute performance durables et fiables.
- Le procédé consiste à injecter de la poudre d'oxyde d'alumine dans un flux gazeux à haute température. Le gaz plasma chauffe le matériau en poudre, le fait fondre, puis le projette sur des substrats à grande vitesse.
- La projection plasma est un procédé extrêmement souple qui convient idéalement à la réalisation d'une grande diversité de revêtements fonctionnels.

### **2-8-Comportement électrique des roulements INSOCOAT :**

Il faut distinguer les applications à courant alternatif (CA) de celles à courant continu (CC). Dans les applications CC, le revêtement INSOCOAT se comporte comme une résistance pure, seule la résistance ohmique  $R$  de la couche d'oxyde d'alumine étant importante.

La tension de seuil du revêtement standard est de 1 000 V CC et sa résistance est supérieure à 50 M $\Omega$ , ce qui assure une isolation efficace du roulement.

Dans les applications CA, en particulier avec des variateurs de vitesse, l'impédance du revêtement céramique doit être prise en compte. L'impédance indique le rapport tension-courant dans les circuits CA. Sa hauteur dépend principalement de deux caractéristiques électriques du revêtement : la résistance ohmique et la capacité.

Cette dernière doit être aussi basse que possible pour compenser les effets des courants électriques à haute fréquence.

L'impédance du revêtement d'oxyde d'alumine peut être modélisée comme une résistance et un condensateur en parallèle.

**-Comportement électrique des roulements INSOCOAT dans des applications CC et CA :**

	<b>Courant contenu</b>	<b>Courant alternatif</b>
<b>Rapport tension-courant</b>	<b>Résistance R</b>	<b>Impédance Z</b>
<b>Comportement électrique</b>	<b>Résistance</b>	<b>Résistance et condensateur</b>
<b>Unité</b>	<b>Ohm (<math>\Omega</math>)</b>	<b>Ohm (<math>\Omega</math>), Farad(F)</b>
<b>Courant contenu-résistance</b>	<b>Garantie plus de 50M <math>\Omega</math></b>	
<b>Courant alternatif-impédance</b>		<b>Valeur variable en fonction de la taille du roulement et de la fréquence</b>
<b>Courant alternatif-capacité</b>		<b>Constante sur la gamme de fréquence : valeur absolue selon la taille du roulement</b>

**2-9-Conclusion :**

Dans l'analyse de roulement, nous observons des dommages produits sur la bague extérieure sous forme de fissures dus au passage continu de courant par roulements et la dégradation chimique de lubrifiant.

En reprenant la solution envisagée par l'entreprise, on constate ce qui suit :

- Avec les mesures enregistrées sur les moteurs in-situ, nous avons pu confirmer que le courant circulant a comme fréquence fondamentale 150[Hz] dans tous les moteurs. Ce qui, s'ajuste à la théorie de passage de courant par roulements.
- avec cette mesure, on annule le passage de courant par roulements. L'expérience le confirme également.
- des moteurs en isolant l'appui Coté opposé et en installant le balai sur le côté actionnement.
- , le servisse de maintenance émettrons un procédé de supervision spécifique pour le suivi du correct fonctionnement de la solution appliquée. [1]

En reprenant la solution SKF, les roulements INSOCOAT SKF sont conçus pour empêcher le courant de traverser le roulement. Les roulements représentent une solution très économique comparés à d'autres méthodes d'isolation. En intégrant les propriétés isolantes dans le roulement, les roulements SKF INSOCOAT peuvent améliorer la fiabilité et

augmenter la disponibilité des machines en éliminant pratiquement le problème d'érosion électrique. [10]

## Conclusion générale

Le bon fonctionnement des équipements industriels dépend de plus en plus de la fiabilité des roulements mais, malgré des décennies de recherches, les avaries prématurées sont encore très nombreuses.

On évitera bien des catastrophes en surveillant le fonctionnement des roulements en mesurant la température, le bruit, les vibrations, ou encore en analysant périodiquement le lubrifiant.

La norme ISO distingue ici six causes principales reconnaissables: fatigue du matériau, usure, corrosion, érosion électrique, déformation plastique et cassure, Mais il ya aussi d'autre cause comme : Cannelures, Criques, Coloration, Usure par abrasion, Détérioration des cages.....etc.

L'expertise aussi nous montre que les ruptures de roulement peuvent être évitées, Montages, lubrification inadéquate et pollution.

Mais dans mon cas d'étude de l'origine de défaillance des roulements du moteurs de pompage de la central SKD c'est L érosion électrique, Il provoque des cavités microscopiques relativement profondes. Elle est due à des courants électriques intenses qui traversent le roulement et créent de petits arcs accompagnés d'une fusion locale et d'une trempe. En général, le défaut provient de ce que l'on a utilisé l'arbre comme masse lors d'une opération de soudage.

L'étude des courants de palier est assez ancienne, Les préoccupations concernaient principalement l'écoulement de courants basses fréquences liés à des imperfections constitutives de la machine elle-même.

Nous avant montré que les effets des courants de palier (courant de Foucault) sur les roulements engendrent deux types de dommage. Le premier concerne la dégradation de l'état de surface des billes et des chemins de roulement et le second, la dégradation chimique du lubrifiant des roulements. Ces deux phénomènes ne sont pas sans interaction l'un par rapport à l'autre. Les courants de palier peuvent se manifester sous la forme d'arcs électriques qui se déchargent entre une bague et une bille ou rouleau. Ce phénomène se manifeste si la bague et la bille ne sont pas en contact, ce qui est le cas dans le fonctionnement du moteur électrique- de là d'une certaine vitesse. L'arc électrique, ayant une température de plusieurs milliers de degrés, fond le métal sur la bague et la bille au point de contact. Ce phénomène, appelé « piquage », engendre des micro-cratères dans les parties roulantes : bagues et billes.

Plusieurs solutions sont envisagées :

L'entreprise propose La solution consiste en l'isolation de l'un de deux côtés (côté opposé) et de l'autre côté la décharge à la terre par des balais.

Il a été décidé de disposer, en parallèle aux roulements, des balais de décharge autant sur le côté actionnement qu'opposé. Leur fonction est de conduire la plus grande partie du courant avec une impédance ( $Z$ ) inférieure à celle du roulement.

SKF propose un roulement isolant, qui assure une protection contre les dommages dus aux courants électriques. La bague extérieure ou la bague intérieure de ce roulement est revêtue d'un matériau isolant. Le revêtement peut être appliqué sur les bagues, extérieures, (spécification VL0241) d'un diamètre de 80 mm et plus ou sur Les bagues intérieures (spécification VL2071) de 70 mm d'alésage minimum. Pour les plus petits diamètres, nous recommandons d'utiliser des roulements hybrides SKF. Le revêtement est constitué d'une couche d'oxyde d'alumine d'une épaisseur nominale de 100  $\mu\text{m}$  appliquée par un procédé spécial de projection par torche plasma.

Des propositions retrouvées dans d'autres travaux de [Ben Abdelghani 03] A. Ben Abdelghani – Minimisation des courants de mode commun dans les variateurs de vitesse asynchrone alimentés par onduleurs de tension multicellulaires – Thèse de doctorat, L'institut national Polytechnique de Toulouse, France 2003.

Ce travail traite l'utilisation des degrés de liberté qu'offrent les onduleurs de tension multicellulaires pour la réduction des courants de mode commun dans les variateurs asynchrones. Nous présentons les topologies d'onduleurs multi niveaux les plus utilisées. Nous décrivons les composantes de mode commun, et leurs effets sur les roulements des machines et les solutions matérielles pour palier ces défauts. Un modèle du circuit de mode commun d'une machine asynchrone est ensuite proposé. L'analyse des onduleurs multicellulaires permet la conception de stratégies de commande, qui selon la parité du nombre de cellules, permet d'annuler ou de réduire les courants de mode commun. L'approche proposée est intégrée dans différentes stratégies de commande des machines asynchrones: Elle est validée pour un onduleur à 2 cellules avec une commande vectorielle classique, et est intégrée expérimentalement dans l'algorithme CODIFI avec un onduleur à 3 cellules alimentant une machine asynchrone 22kW.

## **Les références Bibliographiques :**

- [1] Document de l'entreprise sharikat kahrba koudiet eddraouch (SKD).
- [2] Extraits Internet : Livre maintenance complet.
- [3] Document PDF (technique de l'ingénieur).
- [4] Extraits Internet : Article prolongez la vie des roulements examinant les détériorations - motion control, Informations professionnelles pour l'automatisation industrielle.
- [5] Extraits Internet : wékipidia Les courants de Foucault
- [6] Extraits Internet : Les découvertes de Foucault > Les courants de Foucault.
- [7] Thèse doctorat : Dragos Mihai POSTARIU, Contribution à l'étude des courants de palier dans les moteurs de traction Université de Grenoble, 2009.
- [8] Extraits Internet : Expertise de défauts de roulement.
- [9] Extraits Internet : PDF SKF INSOCOAT Roulements électriquement isolés.