

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE CONSTANTINE 1
FACULTE DES SCIENCES DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



N° d'Ordre : 18 / DS /2014
N° de Série : 01/ GM /2014

THESE

Présentée pour l'obtention du Diplôme de

DOCTEUR EN SCIENCES

En Génie Mécanique

Option : Construction

Par :

MENASRI NOUREDDINE

THEME

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DES PROCESSUS D'USURE DEVELOPPES
A L'INTERFACE DES CONTACTS GLISSANTS SANS PASSAGE
DU COURANT ELECTRIQUE DES MACHINES TOURNANTES.**

Soutenue le : 13 / 02 / 2014

Devant le jury composé de :

Président	Mr. BESSAIEH. R	Professeur Univ. Constantine 1
Rapporteur	Mr. BOUCHOUCHA. A	Professeur Univ. Constantine 1
Examineur	Mr. MILI. F	Professeur Univ. Constantine 1
Examineur	Mr. HAIACHEM. A	Professeur Univ. Badji Mokhtar. Annaba
Examineur	Mr. BOUCHELAGHEM. A	Professeur Univ. Badji Mokhtar. Annaba

ملخص :

الآلات الدوارة تلعب دورا استراتيجيا في عملية التصنيع، وذلك هو الحال بالنسبة لطاحونة الأسمنت وتتكون هذه الآلات من عناصر هشة (المحامل والتروس، وغيرها) يتعرضون لإجهاد ميكانيكي كبير وبيئات صناعية قاسية. هناك أسباب متعددة لتدهور عنصر الآلة: التآكل العادي، الإجهاد الزائد (أو نقصانه)، وسوء التشحيم، ومشكل تركيب، وما إلى ذلك. وفق لمدى التدهور تكون الأسطح المتلامسة أكثر أو أقل تآكلا.

بشكل عام، يمكن أن ينظر إلى الارتداء على انه تضايف مجموعة آليات القطع إلى ظواهر تفاعلية مثل التأثيرات الحرارية وظواهر الحجم كالتشوه البلاستيكي وتأثير الأسطح بشكل طبيعي.

في هذا العمل من جهة، أجريت دراسة لتعيين ارتداء الدرجات SKF 22248 CC / N1W33C3 لترس QJ1244N2MA لطاحونة الأسمنت الأفقية.

و من جهة أخرى يمكن النظر إلى الارتداء كفقدان وظيفة من نظام ما، الأمر الذي يؤثر على الصورة الاهتزازية لمكونات هذا النظام. في الواقع، سوف يستخدم هذا التغيير في الصورة الاهتزازية كمؤشر على عيوب من شأنها أن تجعل تشخيص النظام الصناعي ممكنا.

إلا أن العديد من التقنيات المتاحة في الوقت الراهن تتطلب خبرة كبيرة للنجاح في التنفيذ: لذا فإنه يتطلب تقنيات جديدة تسمح للعمال غير المهرة نسبيا على اتخاذ قرارات موثوق بها دون معرفة آلية عمل النظام وتحليل البيانات. إنه ضمن هذا السياق يندرج بحثنا. من جهة فقد تم تخصيص الدراسة الأولى لتأثير الارتداء على الصورة الاهتزازية لمكونات هذا النظام.

من ناحية أخرى إتباع نهج للتشخيص و ذلك بتطبيق الشبكات العصبية الاصطناعية. حيث لتشخيص نظام ما فقد تم التقليل من حالات الفشل، ونعتبر نوعين من العيوب: ارتداء الحلقة الخارجية للدرجة QJ1244 و كسر لسنة من أسنان ترس العمود الوسيط لدراسة أداء الشبكات العصبية متعدد الطبقات من خلال القياسات التي أجريت على ترس أفقي DMGH25.4 حيث أظهرت فعليتها.

الكلمات الرئيسية : الارتداء، الجسم الثالث، درجة، تعشيق، التشخيص، التحليل الاهتزازي، والشبكات العصبية اصطناعية متعددة الطبقات.

Résumé :

Les machines tournantes jouent un rôle stratégique dans un procédé de fabrication, c'est le cas d'un broyeur d'une cimenterie. Ces machines sont composées d'organes fragiles (roulements et engrenages, notamment) soumis à des contraintes mécaniques importantes et à des environnements industriels difficiles. Il existe de multiples facteurs de dégradation d'un élément de machine : son usure normale, une surcharge (ou une sous-charge), une mauvaise lubrification, un problème de montage, etc. Suivant l'ampleur de la dégradation, les surfaces en contact présentent un écaillage plus ou moins important.

D'une façon générale, l'usure peut être considérée comme association des mécanismes de rupture (cisaillement de jonctions, fatigue,...) à des phénomènes interactifs tels que les effets thermiques, des phénomènes volumiques (déformations plastiques, changement de phase, diffusion) et naturellement des effets de surface (réaction, adsorption, ségrégation...).

Dans ce travail d'une part, une étude de la caractérisation de l'usure des roulements (QJ1244N2MA et SKF 22248 CC / N1W33C3) du réducteur DMGH 25.4 d'un broyeur ciment horizontal a été effectué.

D'autre part l'usure peut être vue comme étant une perte de fonctionnalité d'un système, ce qui influe sur l'image vibratoire des éléments constituant le système. En effet, ce changement de l'image vibratoire sera utilisé comme indicateur de défauts qui permettra d'effectuer un diagnostic d'un système industriel.

Afin d'étudier les performances des réseaux de neurones vis-à-vis des problèmes de diagnostic de système à engrenage et roulements, les cas de défaillances ont été réduits au minimum, deux types de défauts sont considérés : usure de la bague extérieur QJ1244 et détérioration d'une dent du pignon de l'arbre intermédiaire. Ils ont montrés leurs capacités supérieures et ont été avec succès appliqué pour le diagnostic en utilisant la méthode de classification.

Mots clés : usure, troisième corps, roulement, engrenage, diagnostic, analyse vibratoire, réseaux de neurones artificiels multicouches.

Abstract:

Rotating machines play a strategic role in a manufacturing process; it is the case of a cement mill. These machines are made of fragile organs (bearings and gears, etc.) subjected to mechanical stress and harsh industrial environments. There are multiple causes of deterioration of a machine element: normal wear and tear, overload (or under load), poor lubrication, mounting problems, etc... Depending on the extent of degradation, the surfaces in contact present spalling a more or less important.

In general, the wear can be seen as associating failure mechanisms (shear joints, fatigue ...) to interactive phenomena such as thermal effects, volume phenomena (plastic deformation, phase change, diffusion) and naturally surface effects (reaction, adsorption, segregation ...).

In this work the one hand, a study of the characterization of the bearing wear (QJ1244N2MA and SKF 22248 CC / N1W33C3) of the gear unit DMGH 25.4 of a horizontal cement mill was made.

On the other hand, the wear can be seen as a loss of functionality of a system, which affects the image of the components of the vibratory system. Indeed, this change of image vibration will be used as an indicator of defects that will make a diagnosis of an industrial system.

However, many currently available techniques require considerable expertise for successful implementation: it requires new techniques that allow relatively unskilled operators to make reliable decisions without knowing the mechanism of the system and analyze the data. The artificial neural networks (ANN) are suitable for this kind of problem.

It is within this context that our investigations. On the one hand a first study is dedicated to an overview of more detailed knowledge about the wear and tools to understand this phenomenon, especially the concept of third body as the medium at the interface between two bodies in contact, in which wear can be considered as a complex competition between the phenomena of detachment of particles of the contact surfaces and final ejection of these particles out of contact. On the other hand, a diagnostic approach to implementing multilayer artificial neural networks from measurements performed on a horizontal gear DMGH 25.4.

To study the performance of neural networks vis-a-vis the problems of system diagnostic gear and bearings, cases of failures have been minimized, two types of defects are considered: wear the ring and outside QJ1244 breaking of a tooth of the intermediate gear.

Keywords: wear, the third body, bearing, gear, diagnosis, vibration analysis, neural networks artificial multilayer.

*****Remerciements*****

Je remercie Monsieur le Professeur **Bouchoucha Ali** qui a dirigé ce travail, soit assuré de ma profonde et sincère reconnaissance.

Je remercie également Monsieur **BESSAIEH Rachid** Professeur de l'Université Constantine 1, pour m'avoir fait l'honneur d'être le président du jury, ainsi que **MILI Fayçal** Professeur de l'Université Constantine 1, **HAIEHEM Ammar** Professeur de l'Université Badji Mokhtar Annaba et **BOUCHELEGHEM Abdelaziz** Professeur de l'Université Badji Mokhtar Annaba pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail et pour avoir accepté de l'examiner en tant que examinateurs.

Je tiens à remercier les membres du service maintenance de l'algérienne compagnie cimenterie (**A.C.C**) de M'sila pour leurs disponibilités et la qualité de leurs aides apportées lors des expériences de vibration.

Mes remerciements vont également au membre du laboratoire de métallurgie de la société Maintenances des équipements industrielles (**M.E.I**) M'sila.

Que tous les membres du laboratoire de physique et de mécanique des matériaux métalliques LPMMM et laboratoire d'analyse radio-cristallographique de l'université Ferhat Abbas setif 1.

Que tous les membres du hall technologique de la faculté de technologie de l'université de M'sila.

J'adresse tout mes remerciements à Monsieur Chaouffa Malek chef service du laboratoire central de spectrométrie **ARCELOR MITTAL ANNABA**.

Je n'aurais garde d'oublier Messieurs mes collègues pour leurs soutiens et leurs sincères encouragements.

Enfin, merci à ma famille pour son soutien et pour m'avoir permis de réaliser mes études dans les meilleurs conditions...

Table des matières

Introduction générale.....	09
Chapitre I : Etat de l’art sur l’usure	
I.1 La tribologie	13
I.2 La surface.....	14
I.3 Mécanismes de dégradation des surfaces	15
I.4 Les principaux modes d'usure	16
I.5 Modèles d’usure	18
I.5.1 Approche quantitative d’usure	20
I.5.1.1 Classement des modèles d’usure	20
I.5.1.2 Usure abrasive	20
I.5.1.2.1 Quantification de l'usure abrasive	20
I.5.1.2.2 Influence de l'angle d'attaque sur l'usure abrasive	23
I.5.1.2.3 Aspect Métallurgique de l'usure abrasive des aciers	24
I.5.1.3 Usure par fatigue	26
I.5.1.3.1 Types de fatigue	27
I.5.1.3.2 Usure par fretting	27
I.5.1.3.2.1 Endommagements causés en fretting	27
I.5.1.3.2.2 quantification du fretting	28
I.5.2 Approche quantitative d’usure (Le concept de troisième corps)	29
I.5.2.1 Le triplet tribologique	29
I.5.2.2 Mécanismes d’endommagement des surfaces frottantes	30
I.5.2.3 Dynamique du contact	32
I.5.2.4 Modèle d’usure	35
I.5.2.4.1 Evolution dans le temps des débits de troisième corps selon le modèle analytique	36
I.5.2.4.1.1 Contact fermé	36
I.5.2.4.1.2 Contact ouvert	37
I.6 Conclusion	39

Chapitre II : Influence de défauts sur les signaux vibratoires d'accélération

II.1 avaries rencontrées sur les roulements et les engrenages	41
II.1.1 Avaries rencontrées sur les roulements	42
II.1.2 Avaries rencontrées sur les engrenages.	43
II.1.2.1 Défauts répartis sur toute la denture.....	43
II.1.2.1 Défauts localisés	43
II.2 Structure des signaux vibratoires	45
II.3 Influence des défauts sur la structure des signaux.....	45
II.3.1 Influence des défauts de roulement sur la structure des signaux.....	45
II.3.2 Influence des défauts d'engrènement sur la structure des signaux.....	47
II.3.2.1 Engrenage sans défauts	47
II.3.2.2 Engrenage avec défauts	47
II.3.2.3 Spectre d'engrenage	48
II.4 Outils de traitements adoptés aux recherches de défauts	50
II.4.1 Analyse spectrale.....	51
II.4.2 Analyse d'enveloppe	53
II.4.3 Analyse cepstre	55
II.5 Techniques de détection utilisée dans l'industrie.....	56
II.5.1 Niveau global	56
II.5.2 Facteur de crête	57
II.5.3 Kurtosis	58
II.6 Conclusion	58

Chapitre III Automatisation de diagnostic par de réseaux de Neurones

III.1 Introduction	60
III.2 Les réseaux de neurones biologiques	61
III.3 Les neurones artificiels	63
III.4 Description des réseaux de neurones artificiels.....	67
III.4.1 La nature des cellules	67
III.4.2 Les mécanismes d'apprentissage	67
III.4.2.1 Définition	67

III.4.2.2 Les algorithmes avec apprentissage supervisé	68
III.4.2.3 Les algorithmes avec apprentissage non supervisé	68
III.4.2.4 Les principales règles d'apprentissage.....	68
III.4.3 Les mécanismes de classification	69
III.4.4 Les mécanismes de mémorisation	70
III.4.5 La structure des connexions	71
III.4.5.1 Les réseaux bouclés	71
III.4.5.2 Les réseaux non bouclés (réseaux à couches)	72
III.4.5.3 L'algorithme de rétro propagation	75
III.5 Les applications des réseaux de neurones.....	77
III.6 Application des réseaux de neurones pour le diagnostic des défaillances des machines tournantes.....	77
III.6.1 Analyse de la problématique et Choix du type de RNA	78
III.6.2 Choix du type d'algorithme d'apprentissage	78
III.7 Conclusion.....	78
 Chapitre IV Caractérisation de l'usure de roulements d'un réducteur DMGH 25.4 du broyeur ciment horizontal	
IV.1 Principe de fabrication du ciment.....	80
IV.2 Constituants principaux du ciment et additions.....	81
IV.2.1 Constituants principaux.....	81
IV.2.2 Les additions du ciment.....	82
IV.3 Broyeur ciment.....	83
IV.3.1 Description du broyeur ciment.....	83
IV.3.1.1 Moteur principal.....	84
IV.3.1.2 Broyeur DMGH.....	85
IV.3.1.3 Réducteur DMGH 25.4.....	86
IV.3.2 Fonctionnement.....	90
IV.4 Compagnies d'essais et discussion.....	90
IV.4.1 Description de roulements.....	90
IV.4.1.1 Roulement SKF QJ1244 N2MA.....	90
IV.4.1.2 Roulement SKF22248 CC/N1W33C3	92
IV.4.2 Identification des matériaux des roulements et l'arbre d'entrée (analyse chimique)	93

IV.4.3 Analyse des états de surfaces d'éléments de roulements (rugosité).....	96
IV.4.4 Analyse par diffraction de rayons X DRX.....	102
IV.4.5 La micro-dureté.....	111
IV.4.5 Examen métallographique.....	114
IV.4.5.1 Observations macrographique.....	114
IV.4.5.2 Observations micrographique.....	117
IV.5 Conclusion.....	123
 Chapitre V Diagnostic des défauts par un Couplage analyse vibratoire-réseaux de neurones artificiels. Application à un réducteur d'un broyeur horizontal.	
V.1 Compagnes de mesures et interprétations	124
V.1.1 Le suivi de tendance	128
V.1.2 L'analyse spectrale	134
V.2 Automatisation du diagnostic par réseaux de neurones	142
V.2.1 Architecture du système automatique de diagnostic des défaillances	142
V.2.1.1 Sous-système d'acquisition et de traitement de l'information	143
V.2.1.2 Sous-système d'interprétation de l'information	143
V.2.1.2.1 système d'aide à la décision	143
V.2.1.2.2 Construction du bloc de RNA	144
V.2.2 Apprentissage et test du réseau de neurones sélectionné	146
V.3 Conclusion	151
Conclusion générale	152
Perspectives	153
Bibliographie	154
Annexe I	159
Annexe II	165
Annexe III	177

Introduction générale

Les machines tournantes jouent un rôle stratégique dans un procédé de fabrication, c'est le cas d'un broyeur d'une cimenterie. Ces machines sont composées d'organes fragiles (roulements et engrenages, notamment) soumis à des contraintes mécaniques importantes et à des environnements industriels difficiles. Les roulements sont des organes de transmission d'efforts et de mouvement par contact. Ce sont des éléments de machine de haute précision, dont la durée de vie détermine directement les performances de la machine. Il existe de multiples facteurs de dégradation d'un roulement : son usure normale, une surcharge (ou une sous-charge), une mauvaise lubrification, un problème de montage, etc. Suivant l'ampleur de la dégradation, les surfaces en contact présentent un écaillage plus ou moins important.

L'**usure** est un ensemble complexe de phénomènes difficiles à interpréter, amenant une émission de débris avec perte de masse, de cote, de forme, et s'accompagnant de transformations physiques et chimiques des surfaces. La compréhension d'un phénomène d'usure nécessite que l'on puisse enregistrer, si possible en continu, les divers paramètres permettant de caractériser l'état du système étudié au fil du temps. Tout ceci n'est réalisable que pour des essais en laboratoire mais se révèle en général impossible pour un mécanisme réel en fonctionnement.

D'une façon générale, l'usure peut être considérée comme associant des mécanismes de rupture (cisaillement de jonctions, fatigue,...) à des phénomènes interactifs tels que les effets thermiques, des phénomènes volumiques (déformations plastiques, changement de phase, diffusion) et naturellement des effets de surface (réaction, adsorption, ségrégation...). De nombreuses classifications d'usure existent depuis longtemps et plusieurs types sont reconnus : adhésion, délamination, abrasion, érosion, usure par petits débattements (fretting), par impact, par corrosion et par oxydation, par diffusion... Il faut toutefois reconnaître que la détermination des mécanismes de base est difficile à cerner en raison de la complexité des phénomènes rencontrés en pratique. D'une manière générale, les modes de dégradations par usure peuvent être considérés comme la résultante de trois mécanismes de base incluant l'adhésion, l'abrasion et la délamination. Dans tous les cas, les modes de dégradation conduisent à l'émission de particules.

L'objectif de ce travail d'une part, est de caractériser l'usure des roulements (QJ1244N2MA et SKF 22248 CC/N1W33C3) du réducteur DMGH 25.4 d'un broyeur ciment horizontal.

D'autre part, les exigences de haute sécurité et la maîtrise de la disponibilité des équipements donnent à la maintenance des systèmes un rôle prépondérant. Elle doit permettre de n'intervenir

qu'en présence d'éléments défectueux et de fournir un diagnostic fiable et facilement interprétable malgré la complexité des équipements.

Toutes les machines en fonctionnement produisent des vibrations, images des efforts dynamiques engendrés par les pièces en mouvement. Ainsi, une machine en excellent état de fonctionnement produit très peu de vibrations. Les avaries principales apparaissant sur ces machines sont les défauts d'engrenages et roulements (usure de la bague extérieure de roulement, usure des dents d'engrènement, ...etc.) conduisent le plus souvent à un accroissement significative du niveau des vibrations. En observant l'évolution de ce niveau, il est par conséquent possible d'obtenir des informations très utiles sur l'état des éléments de la machine. Ces vibrations occupent une place privilégiée parmi les paramètres à prendre en considération pour effectuer un diagnostic. La comparaison des signaux d'une machine fonctionnant en conditions normales et défectueux, permet de détecter les défauts comme l'usure de roulement, usure d'engrènement ...etc.

Cependant, beaucoup de techniques disponibles exigent actuellement de beaucoup d'expertise pour les appliquer avec succès : on exige de nouvelles techniques qui permettent aux opérateurs relativement non qualifié de prendre des décisions fiables sans connaître le mécanisme du système et analyser les données.

Les réseaux de neurones artificiels (RNA) conviennent à ce genre de problème. Ils ont montré leurs capacités supérieures et ont été avec succès appliqué pour le diagnostic en utilisant la méthode de classification. C'est dans ce contexte que s'inscrivent nos investigations.

Le document de thèse est structuré en cinq chapitres :

Chapitre I : Etat de l'art sur l'usure

Le premier chapitre est dédiée à un état des lieux plus détaillé de nos connaissances sur l'usure et des outils pour appréhender ce phénomène ; par le passé, l'usure a été classiquement définie comme une perte de masse pour l'un et /ou l'autre des solides en contact. De cette approche un certain nombre de lois d'usure ont vu le jour, souvent seulement valides sur les essais mêmes qui les ont vues naître. Le nombre conséquent de paramètres mis en jeu dans ces lois et la présence de coefficients de calage variant d'une dizaine d'ordres de grandeur ne permettent pas d'appréhender le phénomène d'usure dans sa globalité, et moins de manière prédictive.

A la suite de Godet, qui définit en 1974 le concept de troisième corps comme étant le milieu à l'interface entre deux corps en contact, Berthier propose de considérer l'usure comme une compétition complexe entre les phénomènes de détachement de particules des surfaces en contact et d'éjection définitive de ces particules hors du contact. L'usure n'est plus considérer

comme une perte de masse pour un matériau, mais comme une perte de masse pour le système global, ce qui correspond à une perte de fonction pour le mécanisme puisque le troisième corps ainsi évacué ne peut plus supporter la charge et participer à l'accommodation de la vitesse relative entre les deux premiers corps.

Chapitre II : Influence de défauts sur les signaux vibratoires d'accélération

L'usure peut être vue comme étant une perte de fonctionnalité du système, ce qui influe sur l'image vibratoire des éléments constituant le système. En effet, ce changement de l'image vibratoire sera utilisé comme indicateur de défauts qui permettra d'effectuer un diagnostic d'un système industriel.

Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude de l'influence de défauts (usure) isolés des éléments des machines tournantes sur les signaux vibratoires, afin d'être utilisés comme signatures pour le diagnostic ultérieurement.

Chapitre III : Automatisation de diagnostic par de réseaux de Neurones

Un système expert de suivi de comportement est notamment constitué d'un outil d'automatisation du diagnostic évitant à l'utilisateur d'interpréter en permanence les signaux de mesures. L'étude bibliographique a montré l'efficacité des réseaux de neurones pour répondre à cette fonction. Ce chapitre a pour but d'exposer les éléments nécessaires à la compréhension de la théorie et de la pratique des réseaux de neurones, qui seront réalisés ultérieurement (Chapitre V), en vue d'élaborer le système automatique de diagnostic des défaillances du réducteur horizontal d'un broyeur DMGH 25.4.

Chapitre IV Caractérisation de l'usure de roulements d'un réducteur DMGH 25.4 du broyeur ciment horizontal.

Le quatrième chapitre sera consacré à la caractérisation de l'usure des roulements (QJ1244N2MA et SKF 22248 CC / N1W33C3) du réducteur DMGH 25.4 d'un broyeur horizontal d'une cimenterie. Nous présentons en premier lieu le processus de fabrication du ciment et le réducteur d'un broyeur horizontal DMGH 25.4). En suite nous présentons les compagnies d'essais, et discussions.

Chapitre V Diagnostic des défauts par un Couplage analyse vibratoire-réseaux de neurones artificiels. Application à un réducteur d'un broyeur horizontal.

Le cinquième chapitre sera consacré à l'application de diagnostic des défauts isolés par un Couplage analyse vibratoire-réseaux de neurones artificiels. Nous décrivons en premier lieu le système à surveillé (réducteur d'un broyeur horizontal DMGH 25.4). En suite nous décrivons le

déroulement de la campagne de mesures et nous donnerons les principaux résultats montrant l'influence de défauts isolés sur les signaux d'accélération.

Enfin, une démarche de diagnostic mettant en application de réseaux de neurones artificiels à partir des mesures effectuées sur le réducteur d'un broyeur horizontal DMGH 25.4.

Chapitre I : Etat de l'art sur l'usure

Après une présentation de la tribologie et les éléments constituant un système tribologique. Nous aborderons l'étude des modèles d'usure existants. Les modèles présentés ont été choisis pour la diversité des approches qu'ils proposent.

I.1 La tribologie

Un système tribologique se définit comme un système mécanique, formé de deux matériaux antagoniste en contact, animés de mouvements relatifs. Ces deux solides évoluent dans un milieu ambiant et peuvent être séparés par un film intercalaire appelé troisième corps [1].

Sur le plan tribologique, le troisième corps [2] est un opérateur qui transmet la charge (ou portance) d'un premier corps sur l'autre et accomode en s'écoulant (débit) d'une façon dissipative (frottement) l'essentiel de la différence de vitesse entre deux corps. Les troisièmes corps séparent partiellement ou entièrement les premiers corps. Ils sont introduits dans le contact ou bien par entraînement cinématique (lubrifiants solides ou liquides) ou par formation (particules détachées) (Figure I.1). L'interface d'un tel système devient alors le siège de phénomènes dissipatifs d'énergie, regroupés sous le terme générique de frottement (Tableau I.1).

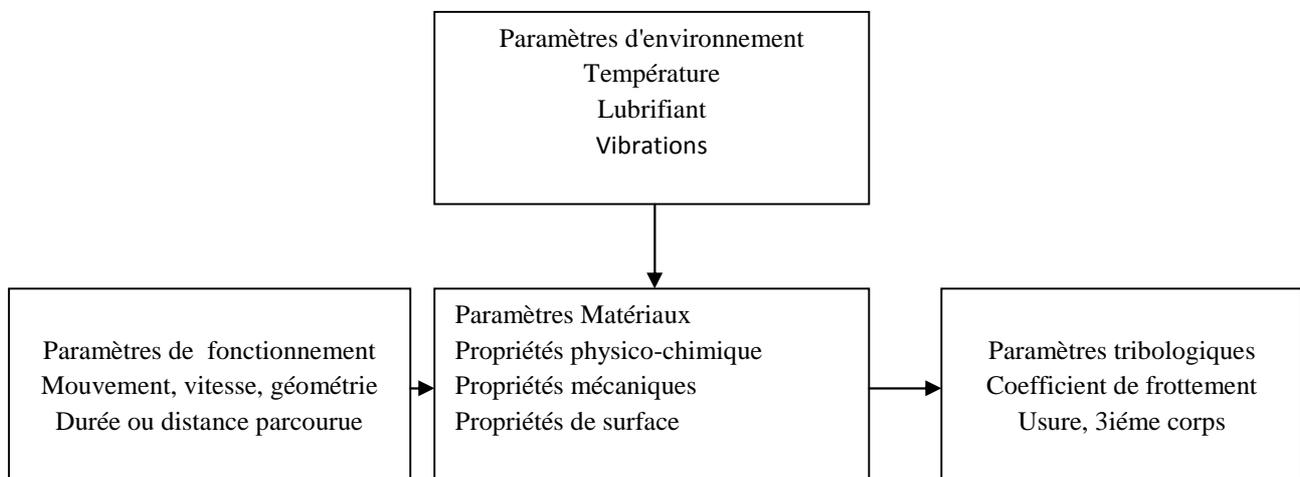


Figure I.1. Synoptique général d'un système tribologique [1].

Energie dissipée	Mode de dissipation
Energie de déformation	Déformations élastiques et plastiques
Energie de rupture	Fissuration, formation de débris, arrachements, écaillages
Energie thermique	Echauffements
Energie chimique	Adhésion, oxydation
Energie acoustique	Vibration, bruits

Tableau I.1 : Différent modes de dissipation d'énergie en frottement.

La quantification de ces énergies est d'un intérêt capital car elles conditionnent les échauffements, elles modifient la micro et la macro géométrie du contact.

I.2 La surface

La surface d'un corps est le lieu des points séparant ce corps du milieu environnant. Elle représente une couche d'épaisseur comprise entre 10^{-2} et 10^{-6} mm. La composition chimique et les propriétés mécaniques de cette zone peuvent être très différentes de celles du cœur du matériau. La surface peut être recouverte de films contaminant d'oxydes et dans le cas de métaux, peut être écrouie. La présence de ces écrans modifiés le comportement tribologiques des corps en contact (Figure I.2).

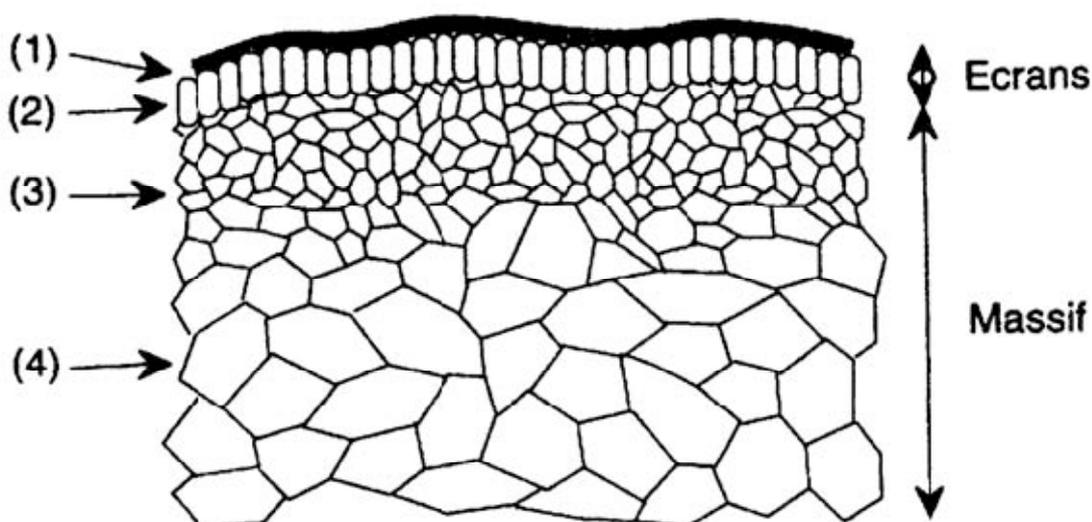


Figure I.2. Vue théorique en coupe d'une surface [1].

La zone (1) est un film de contamination (0.3 à 3 nm) constitués de couches absorbées. La zone (2) est un film d'oxydes (1 à 10 μ m). La zone (3) est une zone mécaniquement perturbée

(1 à 50 μm) de structure écrouie ou structure de couche de diffusion. La zone (4) partant de 100 μm est le matériau massif. Lorsque l'usure est limitée à l'enlèvement des films de surface, elle est appelée (usure douce). Lorsque l'usure s'étend au massif, elle est appelée usure (destructrice) ou (sévère).

Les surfaces de contact de deux corps frottant peuvent ne pas jouer des rôles symétriques. Par exemple, dans le cas du glissement d'un pion sur un disque : un point de la surface de contact du pion est constamment sollicité, alors qu'un point de la piste du disque ne l'est qu'au passage du pion. Les distances cinématiques sont alors différentes. L'exposition au champ de contraintes développées dans le pion et le disque ne sera pas la même. Le contact peut être selon les géométries des corps :

- ponctuel (sphère/sphère, sphère /plan,...)
- linéaire (cylindre/plan)
- surfacique (rotule dans sphère)
- conformel (cylindre/cylindre) ou contra-formel (cylindre dans cylindre creux).

Le contact statique entre deux solides ne s'effectue donc pas sur la surface apparente commune aux deux solides, mais sur un ensemble de zones discrètes appelées aspérités, dont la somme des aires donne la surface réelle de contact. Dans le cas d'un frottement de glissement, les zones de contact sont sans cesse renouvelées. Le rapport aire réelle sur aire apparente peut varier de façon significative : il est alors plus facile de raisonner en terme de force appliquée plutôt que de pression. La surface réelle de contact est sensible à la charge appliquée.

I.3 Mécanismes de dégradation des surfaces

L'usure est un ensemble complexe de phénomènes, amenant une émission de débris avec perte de masse, de côtes, de forme, et s'accompagnant de transformations physiques et chimiques des surfaces. Elle ne varie généralement pas de manière progressive en fonction de paramètres comme la vitesse, la température ou le temps. L'usure est généralement combattue à cause de ses effets négatifs, mais elle présente aussi des aspects favorables. La plupart du temps, l'usure globale d'un mécanisme est due à plusieurs processus qui agissent simultanément, plus rarement à un processus bien défini et identifiable. L'effet de ces actions simultanées est souvent plus important que la somme des effets que l'on produirait en faisant agir séparément les divers processus, on parle parfois de (sur additivité).

Dans les premiers instants du frottement, ce sont les écrans superficiels qui subissent l'ensemble des mécanismes inhérents au frottement (effets thermiques, mécaniques ou

chimiques). Ensuite, ces mécanismes se relaient ou s'interpénètrent en fonction des multiples conditions présentes. En général, une pièce subit tout au long de sa vie trois étapes d'usure [3] :

- Rodage : usure rapide avec une vitesse d'usure régulièrement décroissante
- Marche normale : durée de vie (usure faible et constante).
- Vieillesse et mort : vitesse d'usure croissante.

I.4 Les principaux modes d'usure

Un certain nombre de classifications des modes d'usure sont disponibles dans la littérature. Aucune norme n'existant à l'heure actuelle sur le sujet, nous choisirons d'utiliser une classification inspirée de celle de Stachowiak et al. [4], [5]. Elle distingue : l'usure due à l'action d'une particule sur la surface d'un solide (usure par abrasion, érosion ou cavitation), l'usure due au passage répété d'un solide sur une surface (usure par fatigue), et l'usure due aux forces d'attraction entre les atomes de deux surfaces (usure adhésive). Viennent ensuite des modes d'usure plus spécifiques, comme l'usure corrosive ou l'usure par fretting.

Usure abrasive : L'usure abrasive est due au contact entre une aspérité et la surface d'un solide. Cette aspérité peut être un pic de rugosité sur une des surfaces, une particule ayant été détachée de l'une des deux surfaces, ou bien un troisième corps introduit dans le contact. Cette aspérité peut dégrader la surface du solide selon différents mécanismes présentés sur la figure I.3. La sévérité du contact dépend des propriétés et de la géométrie des matériaux en contact. L'aspérité peut [6] :

- couper, si elle est suffisamment (aiguisée) (i.e. si elle a un angle d'attaque suffisamment grand),
- repousser la matière en surface (labourage),
- provoquer une fracture, si le solide est fragile,
- enlever des grains, si le matériau est insuffisamment homogène.

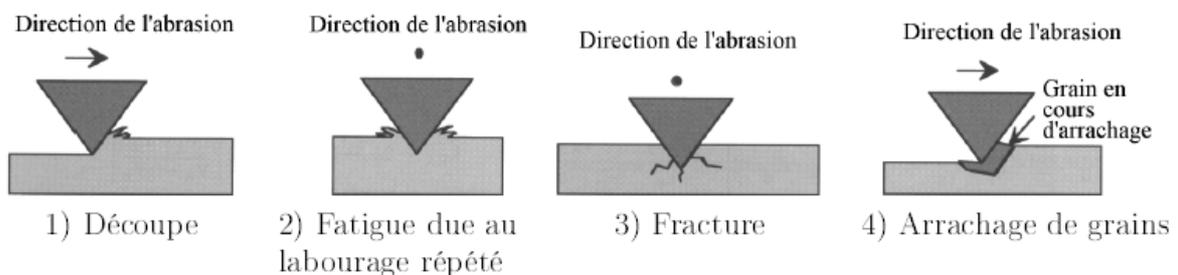


Figure I.3. Schémas des quatre modes d'usure abrasive : découpe, fatigue, fracture et arrachage de grain, extraits de [6].

La nature de l'usure abrasive est précisée par le mode d'acheminement de l'aspérité dans le contact : soit l'aspérité est fixée à l'une des surfaces, et l'on parle alors d'abrasion à deux corps, soit l'aspérité est mobile par rapport aux deux surfaces, et l'on parle alors d'abrasion à trois corps. Le passage de l'aspérité sur la surface peut produire : soit un copeau qui enlève de la matière c'est l'abrasion par coupe, soit un bourrelet plastique sur les bords de la rayure qui va peu à peu disparaître sous le passage répété des aspérités c'est l'abrasion par fatigue. Dans ces deux cas, le faciès d'usure est constitué de rayures fines parallèles à la direction de glissement. Un mécanisme de fracturation peut se produire lors du frottement, surtout si l'un des matériaux en contact est fragile. Cette fracturation est initiée par la contrainte de traction présente à l'arrière du contact, et se produit en surface ou en sous-couche.

Usure par érosion : L'usure par érosion est causée par des impacts de particules solides ou liquides contre une surface solide. Ce mécanisme dépend des propriétés des matériaux en présence, de l'angle d'impact, de la vitesse d'impact, et de la taille de la particule. Plusieurs types d'érosion sont observés [4], [6] :

- découpe,
- fatigue,
- repoussage ou fissuration,
- fusion,
- érosion à l'échelle atomique.

Ce mode d'usure a de nombreuses similitudes avec l'usure abrasive.

Usure par cavitation : La cavitation est un phénomène apparaissant lorsqu'un liquide atteint au voisinage d'une surface solide sa pression de vapeur saturante. Il se crée alors une cavité instable qui implose et induit une onde de choc près de la surface du solide.

Cette implosion augmente localement le niveau de contrainte à la surface du solide, laissant le plus souvent une empreinte en forme de cratère.

L'usure par fatigue: elle est liée à l'action d'un mouvement cyclique et à la capacité des matériaux à absorber les énergies de déformation et les contraintes thermiques générées par frottement. L'usure par fatigue se manifeste par des fissures, des écailles et des changements de structure métallurgique.

L'usure par transfert ou adhésion : elle se caractérise par un transfert de débris d'un des deux antagonistes vers l'autre soit par un mécanisme d'origine purement mécanique, soit suite à une

réaction physico-chimique. Pour le transfert mécanique, plusieurs hypothèses ont été développées. Les micro-aspérités présentes dans le contact peuvent conduire à la diminution des zones en contact et générer aux jonctions des énergies très élevées qui peuvent favoriser les réactions physicochimiques (micro-soudage des aspérités en contact). Lors du frottement, il existe entre les matériaux antagonistes une multitude de microcontacts qui supportent l'ensemble de la charge normale. En effet, dans ces régions, une constriction des lignes de forces engendre des concentrations de contraintes et l'augmentation de la température. L'évolution de ces aspérités dépend des conditions de sollicitations et de l'environnement. Un équilibre est atteint dès que l'adhérence des films de transfert est supérieure à la force de frottement. Sinon, les contraintes de cisaillement générées provoquent la rupture à l'interface surface/film transféré et forme des débris.

Ces derniers peuvent être progressivement évacués du contact en laissant une surface très réactive siège d'un nouveau processus de dégradation. Si les débris restent piégés dans le contact, les aires réelles de contact s'accroissent et assurent un rôle de portance (effet de séparation des antagonistes, les débris supportent les pressions, l'usure et le coefficient de frottement sont moindres).

L'usure par corrosion ou tribochimique : Ce type de dégradation résulte d'une seule ou de plusieurs réactions chimiques sous l'effet d'agent corrosif (environnement, lubrifiant) et des contraintes mécaniques pendant le frottement. Suivant l'état structural superficiel, il se crée des oxydes réactionnels dépendant de l'environnement. Suite au frottement entre les surfaces, la rupture des aspérités.

Usure par fretting : Le fretting est un mouvement oscillatoire de faible amplitude qui peut se produire entre deux surfaces en contact. Le contact est souvent en glissement partiel, c'est à dire que les deux solides n'ont pas de mouvement relatif dans la partie centrale du contact, mais ils glissent sur un anneau en périphérie du contact [5], [7]. Les cycles de sollicitation provoquent la fissuration des matériaux et la formation de débris qui peuvent accélérer l'usure quand ils restent dans le contact.

I.5 Modèles d'usure

Sous l'effet du frottement, une surface subit des modifications et des endommagements. Cartier et Kapsa [8], [9] résument ces endommagements suivants les phénomènes mécaniques, physiques ou chimiques associés. Ils distinguent :

- *des déformations plastiques*, lorsque les contraintes générées dans le contact glissant dépassent la limite d'élasticité d'un des matériaux. Ces déformations plastiques induisent des modifications de la morphologie des surfaces frottantes.
- *des transformations physicochimiques* de surface concernant soit des transformations tribologiques superficielles (Tribologically Transformed Structures ou TTS) sans intervention de l'environnement soit des réactions (tribo-chimiques entre les corps frottants et cet environnement).
- *des phénomènes d'adhésion* entre les corps frottants, conduisant au transfert d'un des matériaux vers l'antagoniste.

Par conséquent, les paramètres à prendre en compte pour étudier l'usure sont extrêmement nombreux. La principale difficulté à surmonter dans l'analyse de l'usure réside dans la phase de hiérarchisation de ces paramètres et à la définition des facteurs prépondérants, pour la situation de frottement concernée. L'usure demeure alors difficile à modéliser compte tenu des différents aspects à prendre en compte lors du frottement, tels que :

- la modification importante de l'interface et de la géométrie du contact due à l'usure ;
- la formation d'une couche inter faciale ;
- le flux de débris ;
- le couplage des aspects mécaniques, thermodynamiques et physicochimiques.

L'absence d'un modèle d'usure universel a donc conduit à deux approches :

- **Approche quantitative (globale) :**

La méthode globale la plus classique [10] permet de déterminer le volume usé comme fonction d'une constante d'usure, de la force normale et de la distance de glissement. Ce type de méthode conduit naturellement à utiliser un critère énergétique, dans lequel l'énergie dissipée est le paramètre critique gouvernant l'usure, sous une forme globale [11], ou locale [12], [13].

- **Une approche qualitative (locale) :**

Dans l'approche locale, la force de contact est remplacée par la pression de contact, la distance de glissement imposée au loin est remplacée par les glissements relatifs des points initialement en regard, et le volume d'usure par une profondeur locale d'usure. L'approche locale offre donc l'occasion de prendre en compte le profil de la pièce. On obtient ainsi des réactions de contact plus réalistes. Certains auteurs considèrent la détérioration du matériau comme un phénomène dissipatif associé à un détachement de particules le long de l'interface. Fillot et al. [13] caractérisent le troisième corps comme

un milieu granulaire. Dragon-Louiset [14] modélise le détachement de particules du corps sain vers le troisième corps en utilisant une analyse thermodynamique.

I.5.1 Approche quantitative d'usure

I.5.1.1 Classement des modèles d'usure

H.C. MENG, K.C. LUDEMA ont dénombré plus de 300 lois relatives au frottement et à l'usure sur une période allant de 1947 à 1992 [15], [16]. Ils remarquent que beaucoup de lois sont dérivées des méthodes de la mécanique des solides en incluant les propriétés des matériaux, des quantités thermodynamiques ou bien encore des variables supposées fondamentales pour les auteurs de ces lois. Ils arrivent à un classement chronologique de ces lois en trois catégories :

- Les lois à caractère empirique ont vu le jour entre les années 1950 et 1970. Elles prennent en compte principalement des paramètres relatifs aux conditions de tests. Il est impossible de transposer de telles lois à d'autres essais que ceux pour lesquels elles ont été établies.
- Les lois basées sur la mécanique du contact sont apparues principalement entre les années 1970 et 1980. Certaines d'entre elles tiennent compte des propriétés des matériaux. Un des précurseurs les plus connus est J.F. Archard a défini l'usure de la manière suivante [10] :

$$W = K_A d \frac{P}{HB} \quad (1.1)$$

Où W est le volume perdu exprimé en m^3 , K_A une constante mesurée expérimentalement, d la distance (m) parcourue pendant le glissement, P est la charge appliquée (N) et HB est la dureté du matériau (N/m^2). Le rapport $\frac{P}{HB}$ introduit une grandeur qui fait intervenir les effets de structure.

La simplicité de ce modèle traduit également ses limitations. Par exemple, pour un même couple de matériaux testés dans différentes conditions de charge et de vitesse, le coefficient d'usure K_A peut varier dans un rapport 100.

- Enfin, les lois basées sur les mécanismes d'endommagement se sont développées depuis les années 1980. Elles incluent les mécanismes des dislocations, les propriétés en fatigue, la rupture en cisaillement. Dans ce qui suit, des exemples de ces lois selon le mode de dégradations sont présentés.

I.5.1.2 Usure abrasive

I.5.1.2.1 Quantification de l'usure abrasive

Une loi généralisée d'usure par abrasion a été proposée sous la forme suivante [17] :

$$W = \frac{KPL}{3H} \quad (1.2)$$

Avec :

$$K = K' \lambda \left[1 - \exp \left(- \ln 2 \left(\frac{H_a}{mH} \right)^{1+2m} \right) \right] \quad (1.3)$$

W : Le volume enlevé du matériau par abrasion	[m ³]
H_a : La dureté de l'abrasif	[N/m ²]
H : La dureté du matériau soumis à l'abrasion	[N/m ²]
m : Le coefficient légal d'abrasion	constant
L : La longueur du contact	[m]
P : La charge appliquée	[N]
λ : Le facteur de l'angularité de l'abrasif	constant

K' : (Constant), est un coefficient caractéristique de l'écoulement du matériau soumis à l'abrasion.

Actuellement la plupart des spécialistes s'accordent pour considérer que le taux d'usure abrasive d'une surface métallique peut s'exprimer par la relation suivante :

$$\frac{dW}{dl} = K_{abr} \frac{P}{H} \quad (1.4)$$

$\frac{dW}{dl}$: Le taux d'usure en volume par unité de longueur de glissement,

P : La charge appliquée,

H : La dureté de la surface la plus tendre,

K_{abr} : Coefficient d'abrasion.

L'équation 1.4 est identique à l'équation d'ARCHARD, mais ici K_{abr} est une constante indépendante du matériau et ne dépendant que de la géométrie des aspérités ou des grains abrasifs. Le tableau I.2 présente une série de mesures de K_{abr} :

Références	Type d'usure abrasive	Taille moyenne des débris	Matériaux	K_{abr} (10^{-3})
Spur et al. (1957)	2 corps	110	Différents	150
Avient et al. (1960)	2 corps	40 – 150	Différents	120
Lopa. (1956)	2 corps	260	Acier	80
Kruschov et al. (1958)	2 corps	80	Multiples	24
Samuels. (1956)	2 corps	70	Laiton	16
Toporov. (1958)	3 corps	150	Acier	6
Rabinowicz et al. (1961)	3 corps	80	Acier	4,5
	3 corps	40	Multiples	2

Tableau I.2 : Série de mesure de K_{abr} [18].

Du tableau I.2, on déduit que le coefficient K_{abr} de l'usure pour le cas de deux corps est plus important que dans le cas d'usure à trois corps. En effet, dans ce dernier cas (trois corps), environ 90% des particules abrasives ont un mouvement de roulement entre les surfaces alors que seulement 10% d'entre elles glissent et contribuent à l'abrasion des surfaces. Ceci est aussi justifié par la différence qui existe entre les coefficients de frottement où $m = 0,25$ dans le cas de trois corps et $m = 0,6$ dans l'autre cas.

L'un des plus simples et plus anciens modèles d'usure par abrasion considéré est le cas du rayage de la surface par un unique cône rigide (Figure I.4). Toute la matière déplacée par le cône est arrachée sous forme de débris d'usure.

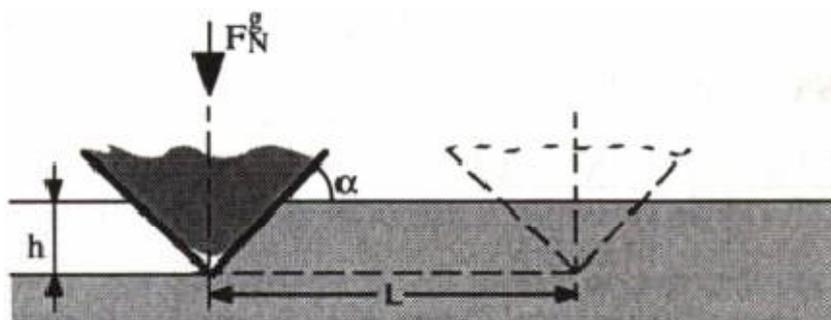


Figure I.4. Modèle d'usure abrasive pour un unique cône rigide [19].

Dans ce modèle [18], la force individuelle agissant sur le cône (grain abrasif) F_N^g est comme suit :

$$F_N^g = 0.5\pi(h\cot\alpha)^2 H \quad (1.5)$$

Avec h est la profondeur de pénétration, α est l'angle d'attaque du cône de rayage et H la dureté de surface la plus tendre.

Le volume approximatif de matière enlevée W_g est donné par :

$$W_g = Lh^2 \cot \alpha \quad (1.6)$$

Où L est la distance de rayage. Si on remplace h dans l'équation 1.6 par son expression dans l'équation 1.5 on aura :

$$W_g = \frac{2 \cdot L \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\pi \cdot H} \cdot F_N^g \quad (1.7)$$

L'usure totale W_t est la somme des volumes arrachés par chaque grain abrasif est :

$$W_t = \frac{2 \cdot L \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\pi \cdot H} \cdot F_N \quad (1.8)$$

I.5.1.2.2 Influence de l'angle d'attaque sur l'usure abrasive

La particule ou le grain abrasif doit avoir des angles aigus et être convenablement orienté. Cette condition est mise en évidence par l'expérience suivante :

Une tige à pointe pyramidale raye sous une charge donnée la surface plane d'un échantillon métallique (Figure I.5).

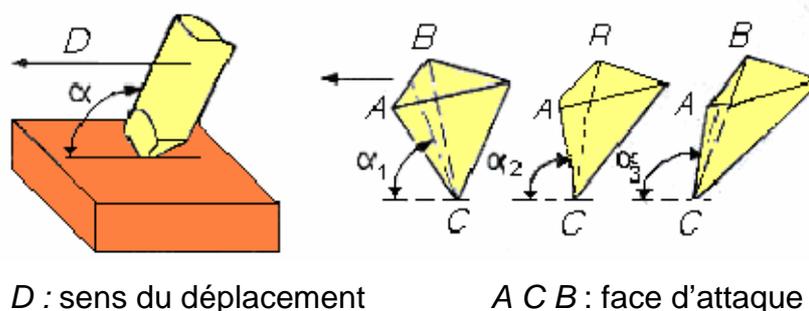


Figure I.5. Angle d'attaque α d'une particule [20].

Le déplacement de la tige est parallèle à la surface. Les courbes indiquées sur la Figure I.6 montrent l'évolution de la section droite de la rayure en fonction de l'angle d'inclinaison α de la face d'attaque du frotteur par rapport au plan. On remarque, qu'à partir d'un angle critique α_c , la largeur de la rayure s'augmente et correspond à l'apparition d'un copeau, c'est-à-dire le passage de la déformation par rayure à la production d'un copeau.

Si l'angle d'attaque α est inférieur à α_c , il n'y a pas de copeau.

Si l'angle d'attaque α est supérieur à α_c , il se produit de copeau.

Les deux courbes I et II représentent la formation d'une rayure par enlèvement de métal, par contre, la courbe III donne la production d'une rayure sans enlèvement de métal. Les paramètres

(facteurs) de l'usure appliqués sont : la charge est 2 N, la vitesse d'abrasion vaut 0,5 mm / s, la nature du matériau de frotteur est le carbure de tungstène et la piste est en plomb.

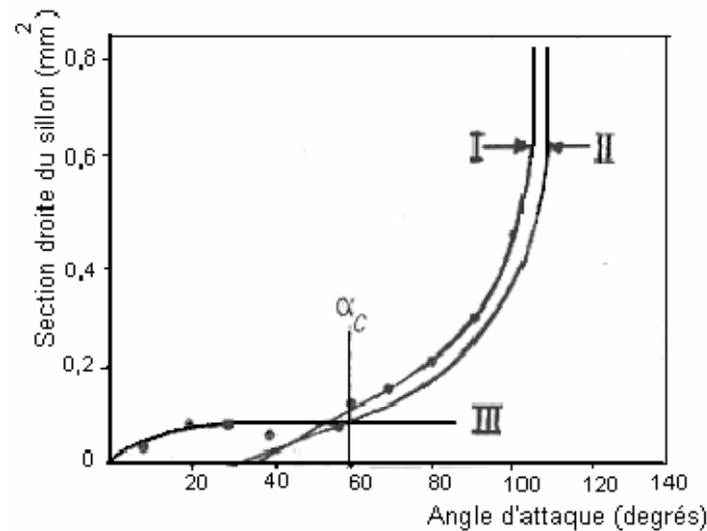


Figure I.6. Section droite du sillon en fonction de l'angle d'attaque [20].

On peut apprécier expérimentalement et évoluer analytiquement l'aire de la section droite de la rayure dans les deux cas :

- Quand il y a création d'un microsillon sans enlèvement de matière (déformation par rayure), la relation analytique entre l'aire A_s de la section droite d'un microsillon et les caractéristiques tribologiques géométriques des matériaux en contact est :

$$A_s = \mu \frac{N}{C} (\tau \cdot \cot \alpha + \delta_{dyn}) \quad (1.9)$$

Avec N : force normale, μ coefficient de frottement, α l'angle d'attaque, δ_{dyn} la contrainte d'écoulement dynamique, C constante géométrique et τ la résistance au cisaillement.

- Quand il y a une production de copeau, la relation analytique exprimant l'aire A_{ry} de la section droite d'une micro rayure est :

$$A_{ry} = \frac{N}{C} \delta_{dyn} \left(\frac{1 + \mu \operatorname{tg} \alpha}{1 + \operatorname{tg} \alpha} \right) \quad (1.10)$$

I.5.1.2.3 Aspect Métallurgique de l'usure abrasive des aciers

Il est à noter que la résistance à l'usure des aciers recuits est proportionnelle à leur dureté, pour chaque type d'aciers trempés, la relation résistance à l'usure-dureté est linéaire mais, possède une pente plus faible que celle des métaux recuit (Figure I.7).

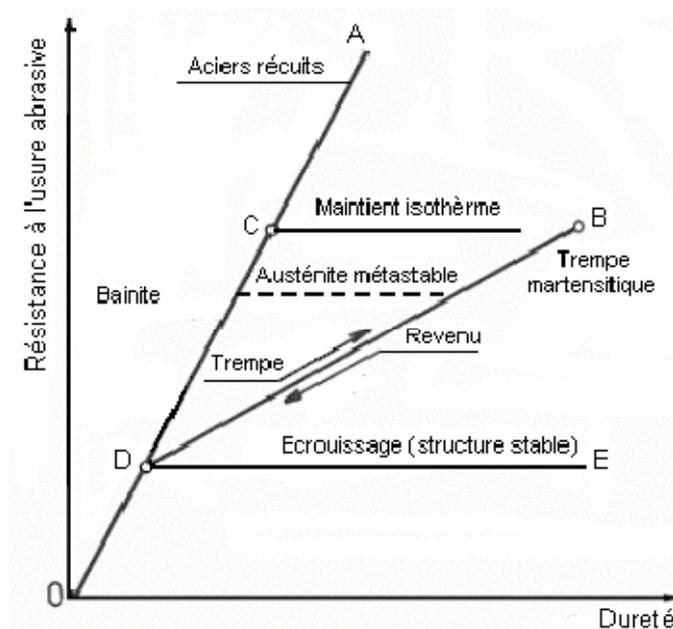


Figure I.7. La résistance à l'usure abrasive en fonction de la dureté due par Traitement thermique des aciers au carbone [21].

La résistance à l'abrasion des aciers au carbone et des aciers faiblement alliés augmente avec la teneur en carbone indépendamment de celle des autres éléments d'alliage. La résistance à l'usure croît proportionnellement avec la teneur en cémentite pour un acier contenant seulement la ferrite et la cémentite. La structure de l'acier est aussi importante, une structure perlitique a une résistance à l'usure supérieure qu'une structure sphéroïdale. Dans les aciers hypoeutectoïdes, la résistance à l'usure augmente, avec la quantité de perlite, c'est-à-dire en carbone et aussi lorsque la distance interlamellaire moyenne de la perlite diminue. Ce qui concerne les aciers hypereutectoïdes, la résistance à l'usure continue son augmentation jusqu'à ce que le réseau de cémentite proeutectoïde inter granulaire ne devienne pas continu et fragile [21].

L'effet des traitements thermiques sur le comportement des aciers au carbone est représenté sur la figure précédente, où il apparaît que la trempe augmente la résistance à l'usure alors que le revenu la diminue. Les traitements thermiques isothermes, tels que la trempe différée martensitique (martempering) et la trempe bainitique (Austempering) améliorent la ténacité des aciers. Le durcissement par écrouissage préalable des aciers ne conduit à aucune amélioration de leur résistance à l'usure bien que des travaux aient montré que l'écrouissage d'une surface métallique par des grains abrasifs améliorant sa résistance à l'usure.

Pour les aciers faiblement alliés, la résistance à l'abrasion s'améliore pour les éléments donnant lieu à des carbures dispersés dans la ferrite. L'addition d'une faible teneur en manganèse améliore la résistance à l'usure d'une structure perlitique mais abaisse celle d'une structure martensitique.

Pour les aciers fortement alliés, la précipitation fine et uniforme de carbures dans la matrice est désirable pour l'augmentation de la résistance à l'usure. La meilleure structure est la structure martensitique. Par contre les aciers possédant une structure austénitique stable et homogène, comme les aciers inoxydables, ne possèdent pas une résistance à l'abrasion très élevée.

L'acier qui résiste à l'abrasion sous des charges importantes est l'acier austénitique à 12% de manganèse (aciers Hadfield) : qui sont des aciers austénitiques hyperboloïdes au manganèse formant une couche martensitique dure par écrouissage). Sous charge modérée, ses performances sont celle d'un acier au carbone ordinaire, mais sous charge élevée, l'écrouissage transforme l'austénite en martensite très résistante à l'usure abrasive. On améliore aussi la résistance à l'abrasion par l'addition de molybdène ou de niobium qui augmente la limite élastique.

I.5.1.3 usure par fatigue

La fatigue est la modification des propriétés des matériaux sous des efforts ou des déformations variables et répétés. En général, ce terme décrit les défaillances qui conduisent à la fissuration et à la ruine des matériaux. La fatigue correspond à une succession de phénomènes complexes: écrouissage, détérioration locale du matériau, l'apparition des premières microfissures, puis la progression lente ou rapide de ces microfissures, qui aboutit à la rupture finale de la structure [22].

On peut distinguer 3 phases dans le phénomène de fatigue: Amorçage, Propagation des fissures, et Rupture brutale de la pièce [23].

- Amorçage des fissures : L'amorçage des fissures est toujours dû à une déformation plastique localement concentrée. Les fissures de fatigue s'amorcent souvent à la surface des métaux (contraintes superficielles plus importantes qu'à cœur, grains plus libres, contact direct avec l'environnement, rayures ...). Jusqu'à un certain seuil d'endommagement, il est possible de faire disparaître l'endommagement et donc de revenir à un état initial non endommagé.

- Propagation des fissures : En phase de propagation, on distingue en général deux stades de développement de fissures :

Stade I : Propagation des microfissures $\frac{da}{dN} < 3.10^{-7}$ (mm/cycle).

Stade II : Propagation d'une des microfissures, qui devient alors la fissure de fatigue et Conduira à la ruine de la pièce

- Rupture brutale de la pièce : A la fin du stade II de la propagation des fissures, la taille d'une Fissure atteint la valeur critique ce qui conduit à une rupture brutale de la pièce en question [24].

I.5.1.3.1 Types de fatigue

On peut classifier différents types de fatigue selon les conditions de sollicitation ou selon le nombre de cycles, comme ci-dessous. Ces classifications ne sont pas absolues. Elles nous permettent juste de mieux comprendre le phénomène de fatigue.

- **Classification selon les conditions de sollicitation:** Fatigue de contact ; Fretting-fatigue; Fatigue-fluage ou fatigue-thermomécanique; Fatigue-corrosion.

- **Classification selon le nombre de cycles à rupture:** Fatigue polycyclique (HCF : High Cycle Fatigue) ; Fatigue oligocyclique (LCF : Low Cycle Fatigue).

I.5.1.3.2 Usure par fretting

Le fretting est un mouvement alterné de faible amplitude qui peut se produire entre deux surfaces en contact. Warlow-Davies envisage le premier, l'effet du fretting sur les propriétés de fatigue [24]. Progressivement, les travaux de McDowell montreront que l'oxydation est une conséquence et non la cause du phénomène et que la formation des débris est induite par le frottement des surfaces et non l'effet de l'oxydation [25]. Parallèlement, Cattaneo [26], Mindlin et Johnson [27] décrivent les sollicitations cycliques de cisaillement imposées en surface de contact et aident à mieux comprendre les mécanismes de la propagation de fissures en glissement partiel. Enfin, le fretting accélère grandement le processus d'amorçage des fissures et l'étude de l'action conjointe du fretting et de la fatigue conduit à un facteur d'abattement de 2 à 5 sur la limite d'endurance suivant les conditions de contact [28].

Le fretting apparaît dans tout assemblage mécanique. Deux cas sont distingués dans la littérature [29-31] :

— *Les pièces assemblées soumises à un environnement vibratoire susceptible d'induire des microglissements entre les surfaces en contact.* Ces micro glissements peuvent aller de quelques micromètres jusqu'à quelques centaines de micromètres. C'est le cas de toutes les liaisons quasi statique à l'instar des assemblages par rivetage, des assemblages par boulonnage ou des assemblages emmanchés... dont les pièces en contact ne sont pas censées subir un déplacement relatif. C'est aussi le cas des mécanismes assurant une transmission de puissance tels que les systèmes d'engrenages ou les roulements à billes lorsqu'ils ne fonctionnent pas.

— *Les pièces assemblées soumises directement à des contraintes variables.* Dans cette situation, les microglissements résultent de la déformation des pièces.

I .5.1.3.2.1 Endommagements causés en fretting

La sollicitation de fretting est à l'origine de nombreuses avaries, de pertes de fonctionnalité et

dans le cas extrême de ruptures catastrophiques. Elle est considérée comme une dégradation critique dans de nombreux secteurs industriels. En effet, le fretting peut conduire à trois types d'endommagement :

— Le *grippage* se traduit par le blocage du mécanisme résultant de l'adhésion des matériaux en contact ou du comblement du jeu de fonctionnement par les débris.

— La *fissuration* qui, non contrôlée, peut entraîner une rupture brutale et catastrophique du mécanisme par fatigue du contact. La prise en compte de la chute de la résistance à la fatigue des matériaux due au fretting est considérée comme indispensable par les industriels en particulier dans l'aéronautique.

— L'*usure* avec formation de débris qui conduit à une perte de côte entraînant un remplacement des pièces ou un blocage des liaisons.

I.5.1.3.2 Quantification du fretting

Dans le cas d'une sollicitation de fretting, différents coefficients d'usure ont été proposés à partir du modèle d'Achard.

Mohrbacher a proposé de relier le volume usé non pas suivant le travail de l'effort normal mais, plus physiquement, suivant le travail de l'effort tangentiel Q [32] (figure I.8).

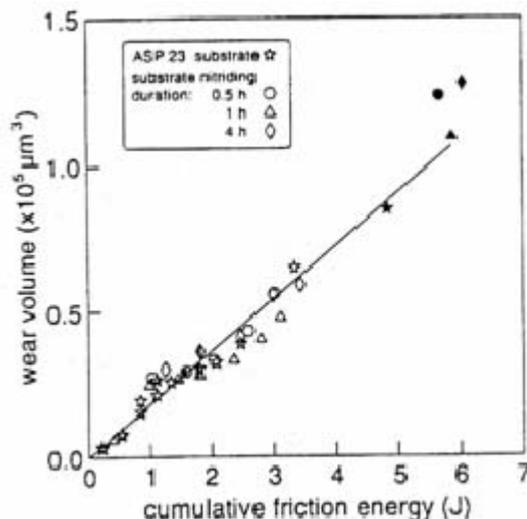


Figure I.8. Evolution du volume usé en fonction de l'énergie dissipée cumulée ($F = 8 \text{ Hz}$, $P = 2 \text{ N}$, $\delta = 50 \mu\text{m}$) [32].

Il définit un coefficient d'usure suivant la relation :

$$\alpha_u = \frac{V}{QL} \quad (1.11)$$

Il démontre que cette relation est équivalente à :

$$\alpha_u = \frac{V}{\sum E_d} \quad (1.12)$$

Où $\sum E_d$ représente l'énergie totale dissipée.

Le coefficient α_u prend ainsi en compte le chargement normal, l'évolution du coefficient de frottement, l'aptitude de débattement et la durée de l'essai. L'énergie dissipée apparaît comme l'activateur principal des processus de dégradation du système tribologique. Les travaux de Ramalho et Miranda ont confirmé ce résultat [33].

I.5.2 Approche qualitative d'usure (Le concept de troisième corps):

Le concept du troisième corps en tribologie a été introduit par Godet au cours des années 70 [34-35]. Le troisième corps est un '*opérateur*' séparant les deux premiers corps et transmet l'effort entre les deux corps en accommodant la plus grande partie de leur différence en vitesse. Ce concept mécanique a été introduit afin de fournir un '*degré de liberté*' (comme une possibilité supplémentaire d'interprétation) permettant d'harmoniser des concepts fondamentaux en science des matériaux. L'approche du troisième corps se base sur la transposition de la lubrification hydrodynamique au frottement sec. Ceci a conduit à la définition, dans un premier temps d'un champ de vitesse qui traduit l'accommodation de vitesse entre deux corps et par la suite d'un ensemble de sites dans lesquels opèrent différents modes d'accommodation.

Le concept du troisième corps a été étendu progressivement à la notion de cinétique des mécanismes d'accommodation [36]. Le but était de localiser, dans l'épaisseur du contact, les sites et les modes par lesquels les premiers et le troisième corps accommodent la différence des vitesses imposée par le mécanisme. En parallèle, la notion du circuit tribologique a été introduite afin de définir les différents écoulements que peut activer le troisième corps.

Cette approche, très similaire à la lubrification, permet de considérer un ensemble de particules comme un fluide jouant le rôle d'un troisième corps, lequel conduit à corrélérer les changements dans le frottement, à la rhéologie à l'écoulement des particules du troisième corps circulant dans le contact. L'expérimentation a confirmé le fondement des notions de rhéologie et d'écoulement du troisième corps dans, ou en dehors du contact [37-38]. Dans ce contexte, nous avons trouvé fort intéressant de détailler l'approche du troisième corps dans ce qui suit.

I.5.2.1 Le triplet tribologique

Le triplet tribologique est constitué par le mécanisme, les deux premiers corps et le troisième corps (Figure I.9). Il permet de décrire les interactions entre les différents éléments qui entourent

le contact, c'est-à-dire la '*boucle*' (ou circuit) qui représente l'équilibre des forces extérieures au contact.

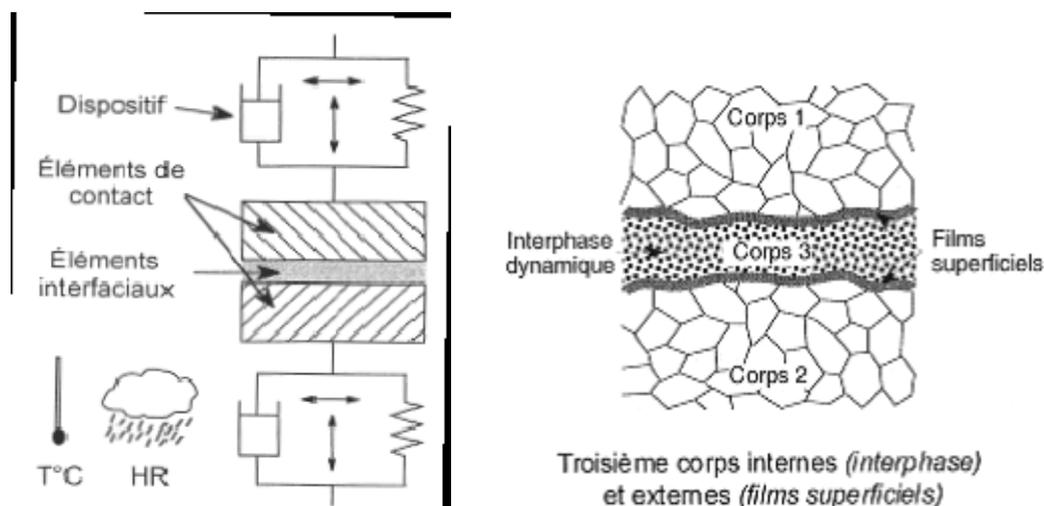


Figure I.9. Le triplet tribologique de Godet et le concept de troisième corps [34], [39].

* Le mécanisme

C'est l'ensemble du système mécanique qui impose les conditions de fonctionnement et via l'équilibre de forces internes (aspect mécanique) et via l'environnement ambiant (aspect physicochimique).

* Les premiers corps

Ce sont les matériaux délimitant le contact et à travers lesquels les efforts sont transmis.

Ils interviennent par leurs structures et leurs propriétés thermomécaniques, en induisant des déformations qui à leur tour définissent la **zone de contact élémentaire**.

Les contraintes locales sont générées par le chargement normal et le déplacement tangentiel imposé, et affectent le volume du matériau. La *profondeur* (pénétration) affectée par ces contraintes locales avoisine en général 50 μm [36-38].

* Le troisième corps

C'est le volume de matière séparant les premiers corps. Des '*particules élémentaires*' sont détachées d'un ou des deux premiers corps et s'agglomèrent. Cet agglomérat de particules constitue le troisième corps. Ces particules peuvent être piégées ou refoulées du contact. Berthier a défini le troisième corps selon deux aspects (Figure I.10) [39]:

- au sens matériaux, comme étant la zone qui marque une nette discontinuité de composition très près de la surface. Cette zone comprend des 'écrans' de faible épaisseur ainsi que des particules solides circulant dans le contact pour former un film continu ou discontinu.

- au sens cinématique, comme étant l'épaisseur au travers de laquelle la différence de

vitesse entre les deux premiers corps est accommodée.

Le troisième corps est dit '*naturel*' lorsqu'il est formé par l'un ou les deux premiers corps. Nous pouvons injecter un troisième corps dit '*artificiel*' comme le graphite par exemple.

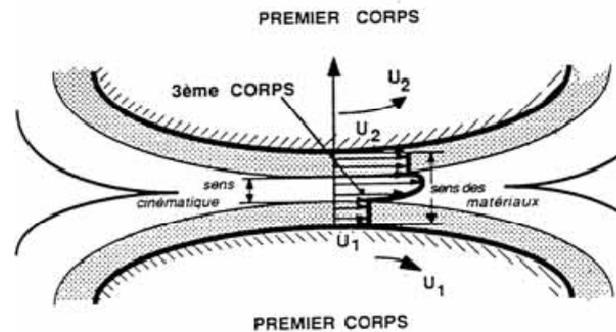


Figure I.10. Définition du troisième corps au sens cinématique [39].

I.5.2.2 Mécanismes d'endommagement des surfaces frottantes

Les premiers corps réagissent aux contraintes locales selon deux types de comportements : des transformations microstructurales et des détachements de particules.

◦ Transformations Tribologiques Superficielles

Sous l'effet des sollicitations mécaniques et thermiques les premiers corps subissent des modifications de leurs propriétés superficielles, conduisant à des transformations de phase et des modifications structurales. L'ampleur de ces changements dépend de la pression (pression hydrostatique et la pression du contact local) et les déformations induites par la température [40]. Ces changements sont connus sous le nom '*Transformations Tribologiques Superficielles*' (Tribologically Transformed Structures ou TTS (Figure I.11)) [36], [41].

◦ Détachement de particules

L'apparition de TTS entraîne une modification du champ de contraintes et des déformations admissibles par le matériau, conduisant à un détachement de particules par '*fragilisation*' des surfaces du matériau (particules dont la taille varie de quelques nanomètres à quelques micromètres) [36]. Les mécanismes d'usure tels que l'abrasion, l'adhésion etc., peuvent être considérés comme des '*réponses spécifiques*' alimentant le troisième corps.

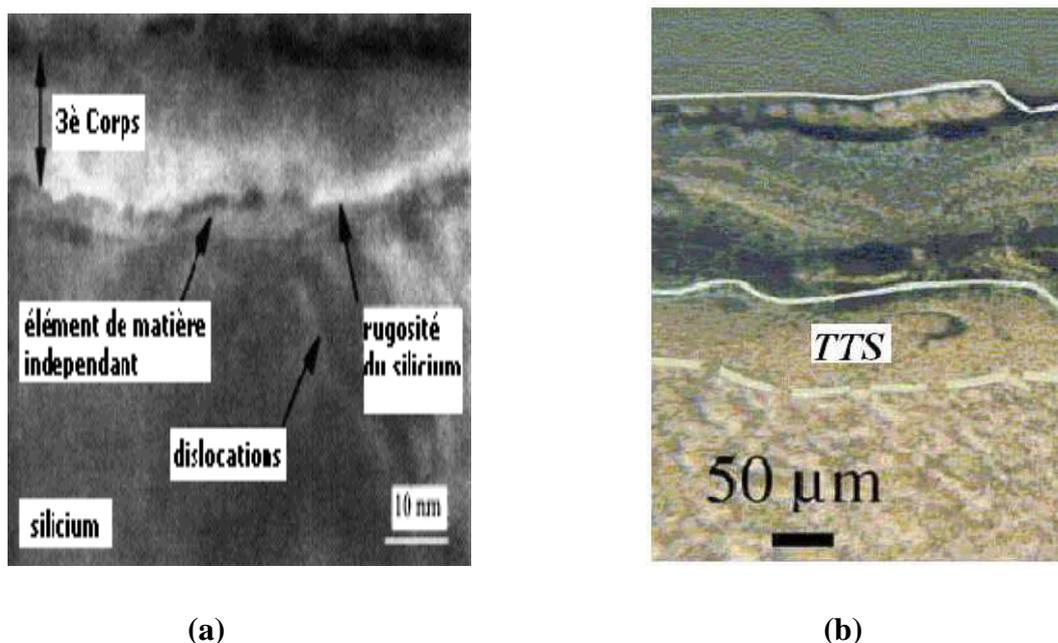


Figure I.11. Visualisation des TTS et du troisième corps, (a) par micrographie MET [33] et (b) Coupe transversale d'une roue de locomotive [41].

La Figure I.11 b montre une épaisseur du troisième corps de 150 µm et en-dessous une couche du premier corps estimée à 50 µm [41].

I.5.2.3 Dynamique du contact

En suivant cette logique d'un système tribologique représenté par un contact à trois corps, Berthier [36-38], considère que l'étude du frottement et de l'usure passe par l'identification des mécanismes d'accommodation de vitesse activés dans le contact ou aux interfaces. Ces mécanismes d'accommodation notés Si Mj, sont définis par des sites Si et des modes Mj qui indiquent respectivement le lieu d'accommodation de vitesse et la manière dont celle-ci s'effectue (Figure I. 12).

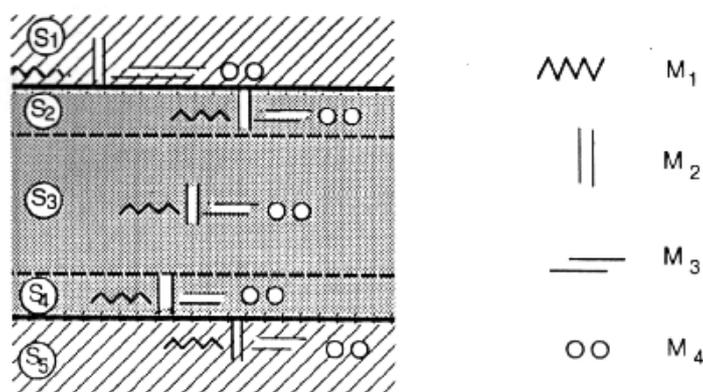


Figure I.12. Sites et modes d'accommodation [36], [38].

Les premiers corps sont notés S_1 et S_5 , alors que la partie volumique du troisième corps constitue le site S_3 . Cette identification introduit également la notion d'écrans notés S_2 et S_4 qui constituent la frontière entre premiers corps et troisième corps.

Les modes élémentaires d'accommodation sont répertoriés selon quatre types de comportements mécaniques : la déformation élastique M_1 , la fissuration ou rupture normale M_2 , le cisaillement M_3 et le roulement M_4 . Si nous définissons donc un mécanisme d'accommodation comme étant l'association d'un site et d'un mode d'accommodation, nous voyons qu'ils sont au nombre de vingt pouvant être activés en différents points de contact. Il faut garder à l'esprit le fait que tous ces mécanismes ne sont pas clairement identifiables (modes élastiques dans le premier corps) bien qu'activés avec certitude. Ils n'aboutissent pas à la formation de débris et ne contribuent donc pas tous à un taux d'usure correspondant à l'évacuation définitive de particules issues des débris hors du contact.

* **Circuit tribologique**

L'ensemble des détériorations de la surface et la perte de matériau donnent les caractéristiques de l'usure. Ce processus se traduit par un enchaînement d'événements liés essentiellement à la présence du troisième corps : détachement des particules, piégeage et formation de débris pour aboutir à l'établissement d'un régime stationnaire traduisant l'équilibre entre détachement et élimination des particules. Cet enchaînement demande de ne pas confondre particules détachées et particules d'usure, et est fortement influencé par la géométrie des premiers corps et la rigidité du mécanisme (signature du tribomètre) [42-44].

Le gradient de vitesse auquel sont soumis les débris qui constituent le troisième corps (adhérent ou non après ouverture du contact) peut se traduire en termes de débits, dont les différentes composantes participent au processus d'usure défini comme le circuit tribologique de Berthier (Figure I.13) [39], [42], [45-46].

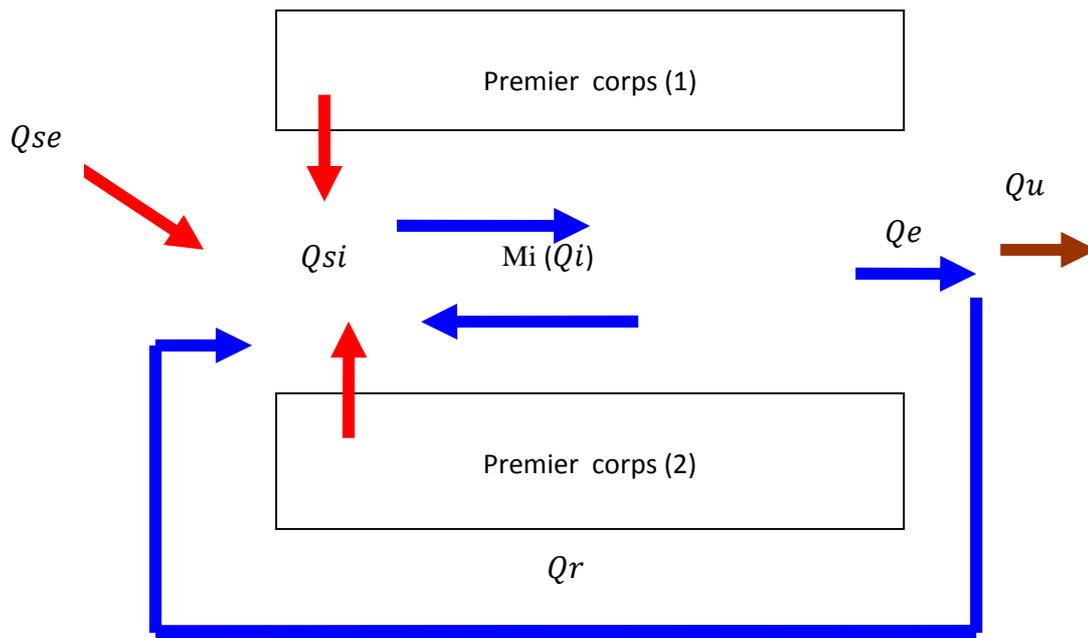


Figure I.13. Circuit tribologique de Berthier [39], [42].

Le détachement de particules ou débit source interne (Q_{si}) alimente le contact en troisième corps dont le mouvement se traduit par le débit interne (Q_i). Les particules éjectées du contact constituent le débit externe (Q_e) qui se partage à son tour en un débit de recyclage (Q_r) qui permet la réalimentation du contact et un débit d'usure (Q_u) qui concerne les particules du troisième corps définitivement perdues par le système tribologique. Dans le cas de la lubrification liquide ou solide, il faut tenir compte de l'élément artificiel apporté au système tribologique que l'on traduit par le débit source externe (Q_{se}). Il apparaît ainsi, qu'en aucun cas la mesure du volume de dégradation des premiers corps n'est représentative de l'usure du couple tribologique testé [42]. Si aucun lubrifiant n'est apporté au contact ce qui se traduit par $Q_{se}=0$, le terme de débit source (Q_s) ne représente que le débit source interne (Q_{si}).

Le Circuit tribologique représente l'équilibre des masses dans le contact. Qui peut être exprimé simplement par ; la variation de masse à l'intérieur du contact égale à la différence entre la masse des nouvelles particules de troisième corps et la masse des particules perdues :

$$\frac{dM_i}{dt} = Q_s - Q_u \quad (1.13)$$

Dans cette approche, nous remarquerons l'aspect novateur de la définition de l'usure. L'usure n'est plus représentée par une masse perdue par les matériaux premiers corps (ce qui correspondrait au débit source interne de troisième corps). Elle est maintenant représentée par la fuite des particules hors du contact, qui deviennent alors des particules d'usure. Tant que les

particules restent dans le contact, elles ont un rôle actif de support de la charge, d'accommodation des vitesses, etc. Ceci va dans le sens de Meng et Ludema ([16], [35]) qui proposent d'abandonner les efforts pour modéliser l'usure en une liste de mécanismes d'usure, mais plutôt de s'intéresser à une description complète des événements macroscopiques sur les surfaces de contacts, qui inclut la description de la formation et du mouvement des particules à l'interface.

I.5.2.4 Modèle d'usure

Afin, d'aboutir à une loi d'usure qualitative, il est intéressant de dissocier le débit source et le débit d'usure séparément, puis regrouper ces deux activations des débits source et d'usure par une équation d'équilibre des masses dans le contact.

Dans un contact on peut distinguer deux phases [42], [47] :

- Phase 1. Dans un premier temps, il n'y a pas d'éjection de particules hors du contact. Il y a seulement production de particules, jusqu'à la formation d'une certaine couche de troisième corps. A partir d'une quantité M_i^{seuil} , le débit d'éjection est activé.
- Phase 2. On atteint alors très vite un état particulier du contact. Chaque particule de troisième corps éjectée est aussitôt remplacée par l'intermédiaire d'un nouveau détachement. La principale conséquence est que la quantité M_i de troisième corps dans le contact est constante, malgré une production et une éjection de particules intense. Cette quantité sera notée M_i^{stab} .

Le débit source, moins important que dans la première phase est maintenant le reflet du débit d'usure. Ces deux débits deviennent égaux, et ils présentent, de façon remarquable, une activation constante au cours du temps ou de la distance de glissement (ce qui donne des débits cumulés linéaires en temps).

Dans un premier temps « naissance » du contact), c'est le mécanisme de détachement des particules qui dicte le comportement du contact en imposant une évolution de la quantité de troisième corps. Mais dans un deuxième temps (pendant la « vie propre » du contact), la quantité de particules détachées est équivalente à la quantité de particules de troisième corps perdue (les débits source Q_s et d'usure Q_u sont égaux). C'est donc maintenant le débit d'usure qui contrôle le débit source.

Naissance	Vie propre
$Q_s^{cum} = M_i$	$Q_s = Q_u = constant$
$Q_u = 0$	$M_i = M_i^{stab} = constant$

I.5.2.4.1 Evolution dans le temps des débits de troisième corps selon le modèle analytique

D'après le Circuit Tribologique (figure I.13) et l'équilibre des masses dans un contact décrit par l'équation (1.13), on peut exprimer la variation dans le temps de la quantité M_i troisième corps dans un contact, comme étant la différence entre le débit de particules créées (Q_s) et le débit de particules éjectées (Q_u).

Il est donc possible d'écrire un système simple, à trois équations et trois inconnues : le débit source de troisième corps (Q_s), le débit d'usure (Q_u) et la quantité M_i troisième corps dans le contact.

$$\begin{cases} Q_s(t) = C_s(M_i^{max} - M_i(t)) & \text{pour } M_i < M_i^{max} \text{ et } Q_s(t) = 0 \text{ sinon} \\ Q_u(t) = C_u(M_i(t) - M_i^{seuil}) & \text{pour } M_i > M_i^{seuil} \text{ et } Q_u(t) = 0 \text{ sinon} \\ \frac{dM_i(t)}{dt} = Q_s(t) - Q_u(t) \end{cases} \quad (1.14)$$

I.5.2.4.1.1 contact fermé

Dans ce cas, l'éjection des particules n'est pas permise (le contact est fermé), correspond au cas où la quantité de troisième corps M_i^{max} , nécessaire pour stopper le détachement des particules, est atteinte avant qu'il y ait une possible éjection des particules : $M_i^{max} < M_i^{seuil}$.

Sur $M_i \in [0, M_i^{max}]$ ($t \in [0, \infty[$) le système devient :

$$\begin{cases} Q_s(t) = C_s(M_i^{max} - M_i(t)) \\ \frac{dM_i(t)}{dt} = Q_s(t) \quad M_i(0) = 0 \\ M_i = Q_s^{cum} \end{cases} \quad (1.15)$$

Donc, l'équation de l'évolution de M_i (qui équivaut donc ici à la quantité totale de troisième corps produit Q_s^{cum}) :

$$M_i(t) = M_i^{max} (1 - e^{-C_s t}) \quad (1.16)$$

Le débit source Q_s est :

$$Q_s(t) = C_s M_i^{max} e^{-C_s t} \quad (1.17)$$

La Figure I.14 montre une représentation graphique de M_i et Q_s en fonction du temps pour un système « fermé » dont les caractéristiques du débit source sont $C_s = 0,2 \text{ s}^{-1}$ et $M_i^{max} = 0,20 \text{ g}$.

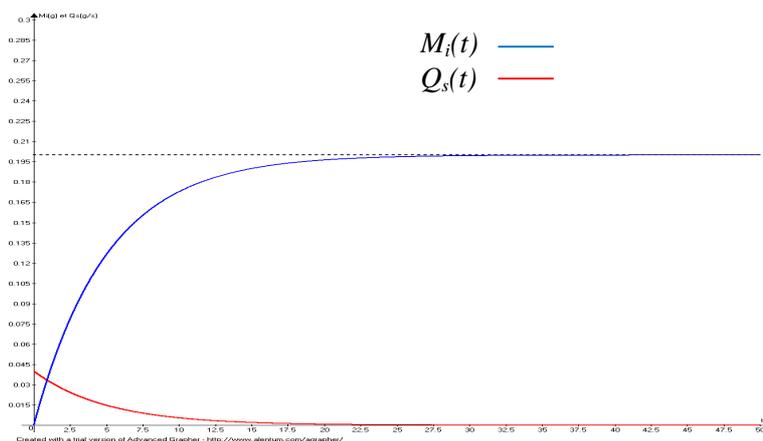


Figure I.14. Evolution dans le temps du débit source et de la quantité de troisième corps dans le contact, selon le modèle analytique (contact fermé).

I.5.2.4.1.2 contact ouvert

Le système général se décompose en deux parties. Jusqu'à une quantité de troisième corps M_i^{seuil} le débit d'usure est nul. Ensuite, il y a compétition entre le débit source et le débit d'usure.

Sur $M_i \in [0, M_i^{seuil}]$ ($t \in [0, t_1[$) le système devient :

$$\begin{cases} Q_s(t) = C_s(M_i^{max} - M_i(t)) \\ \frac{dM_i(t)}{dt} = Q_s(t) \end{cases} \quad (1.18)$$

Ce qui aboutit à la même solution que précédemment. Cependant l'état stable M_i^{max} , n'est pas atteint. $M_i = M_i^{seuil}$ au bout d'un temps t_1 :

$$t_1 = \ln\left(1 - \frac{M_i^{seuil}}{M_i^{max}}\right) \quad (1.19)$$

Sur $M_i \in [M_i^{seuil}, M_i^{stab}]$ ($t \in [t_1, \infty[$) le système devient :

$$\begin{cases} Q_s(t) = C_s(M_i^{max} - M_i(t)) \\ Q_u(t) = C_u(M_i(t) - M_i^{seuil}) \\ \frac{dM_i(t)}{dt} = Q_s(t) - Q_u(t) \end{cases} \quad (1.20)$$

Avec la condition $M_i(t_1) = M_i^{seuil}$ et $M_i^{stab} = \frac{C_s M_i^{max} + C_u M_i^{seuil}}{C_s + C_u}$

M_i est donc la solution d'une nouvelle équation différentielle :

$$\frac{dM_i(t)}{dt} = C_s M_i^{max} + C_u M_i^{seuil} - (C_s + C_u) M_i(t) \quad (1.21)$$

On trouve : $M_i(t) = M_i^{stab} + (M_i^{seuil} - M_i^{stab}) e^{-(C_s + C_u)(t - t_1)}$ (1.22)

On remarque que M_i est une fonction toujours strictement croissante (puisque

$M_i^{seuil} < M_i^{stab}$ qui possède cette fois une asymptote en M_i^{stab} .

La compétition du débit source et du débit d'usure mène donc à l'établissement d'une couche stable de troisième corps M_i^{stab} .

Puisque $M_i^{stab} < M_i^{max}$, cette couche est toujours moins épaisse que dans le cas du contact fermé où seul le débit source est activé.

Les débits s'écrivent :

$$Q_s(t) = \frac{C_s \cdot C_u}{(C_s + C_u)} (M_i^{max} - M_i^{seuil}) + C_s (M_i^{stab} - M_i^{seuil}) e^{-(C_s + C_u)(t - t_1)} \quad (1.23.a)$$

$$Q_u(t) = \frac{C_s \cdot C_u}{(C_s + C_u)} (M_i^{max} - M_i^{seuil}) - C_u (M_i^{stab} - M_i^{seuil}) e^{-(C_s + C_u)(t - t_1)} \quad (1.23.b)$$

On notera Q_∞ :

$$Q_\infty = Q_s = Q_u = \frac{C_s \cdot C_u}{(C_s + C_u)} (M_i^{max} - M_i^{seuil}) \quad (1.24)$$

Les débits cumulés s'écrivent :

$$\begin{aligned} Q_s^{cum}(t) &= \int_0^t Q_s(\lambda) d\lambda \\ &= M_i^{seuil} + Q_\infty (t - t_1) + \frac{C_s}{(C_s + C_u)} (M_i^{stab} - M_i^{seuil}) (1 - e^{-(C_s + C_u)(t - t_1)}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_u^{cum}(t) &= \int_0^t Q_u(\lambda) d\lambda \\ &= Q_\infty (t - t_1) - \frac{C_u}{(C_s + C_u)} (M_i^{stab} - M_i^{seuil}) (1 - e^{-(C_s + C_u)(t - t_1)}) \end{aligned} \quad (1.25)$$

Avec ; $Q_s^{cum}(t_1) = M_i^{seuil}$, $Q_u^{cum}(t_1) = 0$

La Figure I.15 montre l'allure des courbes de M_i , Q_s et Q_u en fonction du temps pour un système dont les caractéristiques sont les suivantes : $C_s = 0,2 \text{ s}^{-1}$, $C_u = 0,4 \text{ s}^{-1}$,

$M_i^{max} = 0,20 \text{ g}$ et $M_i^{seuil} = 0,15 \text{ g}$.

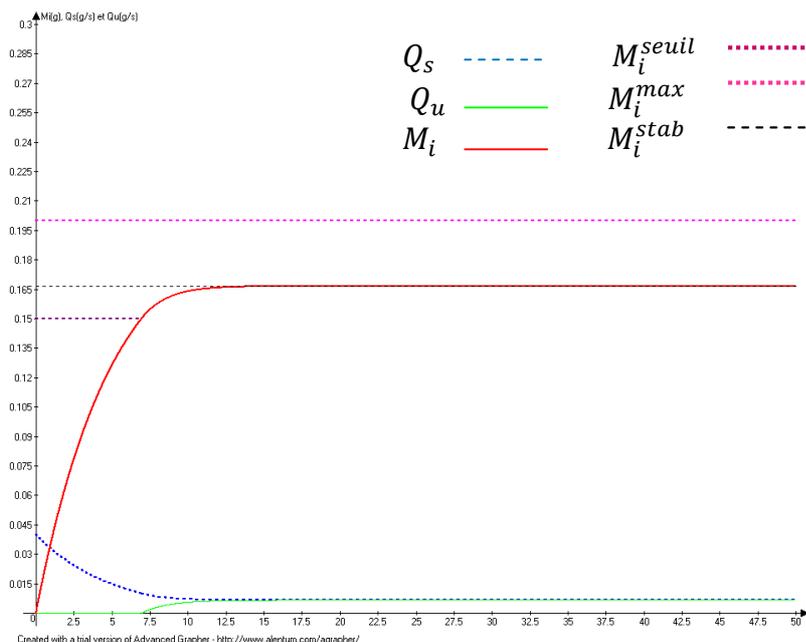


Figure I.15. Evolution dans le temps du débit d'usure, du débit source et de la quantité de troisième corps dans le contact, selon le modèle analytique (contact ouvert).

I.6 Conclusion

La littérature regorge de lois, mais celles-ci sont souvent valides uniquement dans la gamme d'essais qui a permis de les établir. Les paramètres utilisés (les matériaux, la géométrie ou l'environnement du contact) -Meng et Ludema [16] ont recensé plusieurs centaines- sont fonction des moyens d'investigation et de la culture des chercheurs.

Par ailleurs, pour réunir dans une même approche la théorie de la lubrification et les problèmes de frottement et d'usure des contacts secs, Godet [34] proposa d'étudier le contact à travers la notion d'interface entre les deux corps en contact, appelée troisième corps. A sa suite, Berthier [36-40] définit le Circuit Tribologique pour expliquer que l'usure doit être comprise comme une perte de masse, non plus pour les matériaux frottants, mais pour le contact dans sa globalité (en tenant compte du troisième corps). Il a représenté donc l'usure comme un débit d'éjection définitive des particules de troisième corps hors du contact, et il a montré la compétition de celui-ci avec le débit source de troisième corps qui représente la dégradation des matériaux à travers le détachement de particules.

Enfin, l'usure peut être vue comme étant une perte de fonctionnalité du système, ce qui influe sur l'image vibratoire des éléments constituant dans le cas d'un système tournant. En effet, ce changement de l'image vibratoire sera utilisé comme indicateur de défauts qui permettra d'effectuer un diagnostic d'un système industriel.

Le chapitre suivant sera consacré à l'étude de l'influence de défauts (usure) des éléments des machines tournantes sur les signaux vibratoires, afin d'être utilisés pour le diagnostic ultérieurement.

Chapitre II : Influence de défauts sur les signaux vibratoires d'accélération

Les machines tournantes jouent un rôle stratégique dans un procédé de fabrication, c'est le cas d'un broyeur d'une cimenterie. Ces machines sont composées d'organes fragiles (roulements et engrenages, notamment) soumis à des contraintes mécaniques importantes et à des environnements industriels difficiles. Les sources de défaillance sont multiples : l'écaillage de roulement, usure et rupture d'une dent d'un engrenage, le désalignement d'un des axes, etc. Pour éviter des arrêts de productions imprévus et coûteux, il faut surveiller ces organes en permanence. Il existe pour cela plusieurs méthodes à savoir l'analyse vibratoire, l'analyse des lubrifiants, thermographie infrarouge et analyse acoustiques ; l'analyse vibratoire (fréquentielle) est le plus souvent utilisée en exploitant un signal fourni par un accéléromètre. Chaque fois qu'un défaut participe à un contact, il modifie les caractéristiques vibratoires du système. En analysant les mesures d'accélération issues d'un accéléromètre, nous pouvons identifier et quantifier ces modifications afin d'établir une relation entre les mesures et le type de défaut, qui seront utilisées comme signatures de défauts pour un système de diagnostic. Dans un système de transmission de puissance (réducteur d'un broyeur d'une cimenterie) les fréquences d'apparitions de défauts peuvent être connues à partir de la géométrie et de la cinématique du système.

Dans ce chapitre, un récapitulatif des avaries rencontrées sur les roulements et les engrenages est donné dans le paragraphe II.1. Dans le paragraphe II.2 nous donnons l'influence des défauts sur la structure des signaux. Le paragraphe II.3 traite les techniques de diagnostic utilisées dans l'industrie.

II.1 avaries rencontrées sur les roulements et les engrenages

Les statistiques concernant les causes de défaillances et la localisation des défauts dans les transmissions de puissance à engrenages permettent de conclure que les organes les plus sensibles sont les engrenages et les roulements (Tableau 2.1) [48-50].

Localisation des défauts	%
Dentures	60
Paliers	19
Arbres	10
Carters	7
Autres	4

Tableau II.1 : Localisation des défauts dans les transmissions de puissance.

II.1.1 Avaries rencontrées sur les roulements

Les principales avaries peuvent être classées en [50-52] :

- **Avaries de fatigue** : ce type d'avarie se manifeste par l'apparition de fissure qui croît jusqu'à l'écaillage.
- **Usure abrasive** : destruction d'un élément par enlèvement progressive de la matière en surface et formation de particules.
- **Grippage et usure adhésive** : produit lors de fort glissement qui entraîne une soudure localisée, des aspérités de surfaces et un transfert de matière entre les surfaces.
- **Empreintes** : liées au contact hertzien. L'effet de la charge produit une déformation plastique lorsqu'une particule est pincée dans le contact, provoquant des défauts de surfaces.
- **Déséquilibre thermique** : l'élévation de température engendre une destruction du lubrifiant.

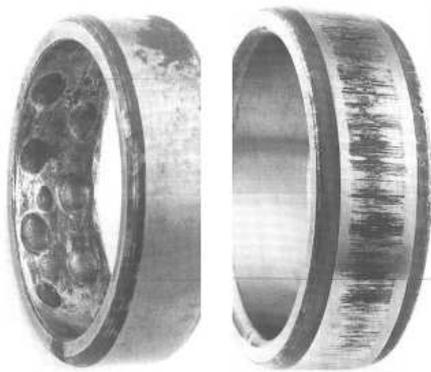


Figure - a - défauts d'usure

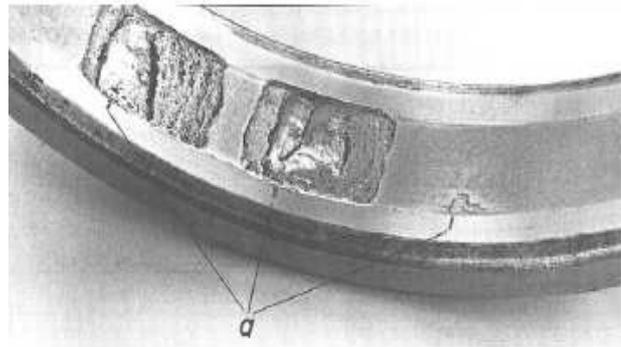


Figure - b - défauts d'écaillage

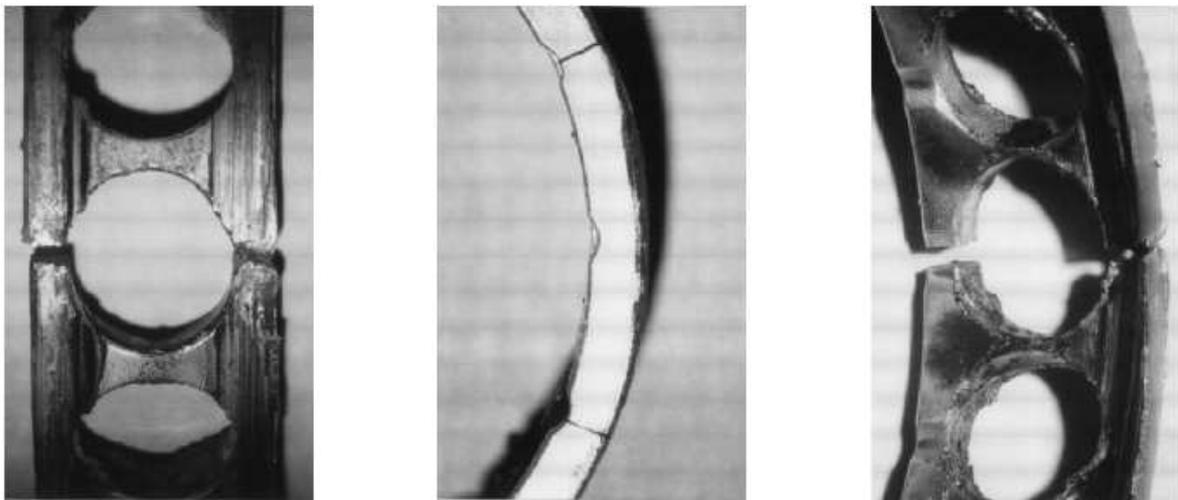


Figure - c - rupture de la cage

Figure II.1. Défauts réels de roulements [52].

II.1.2 Avaries rencontrées sur les engrenages

Les principaux défauts survenant sur un couple d'engrenages sont [53-54]:

- Défauts répartis sur toute la denture
- Défauts localisés sur une partie de la denture.

II.1.2.1 Défauts répartis sur toute la denture

Usure abrasive et adhésive : enlèvement de matière dû au glissement des deux surfaces de contact. Le développement de cette est lié à la charge mécanique à transmettre et à la vitesse de glissement, ainsi qu'à la présence d'éléments abrasifs dans le lubrifiant (troisième corps). L'usure normale est inversement proportionnelle à la dureté superficielle de la denture et elle progresse lentement. Elle est négligeable pour les dentures de petit module et très durcies. Une usure anormale est produite lorsque le lubrifiant est pollué de particules abrasives ou lorsqu'il est corrosif. Elle conduit à un mauvais fonctionnement.

Pitting ou piqûres : Il s'agit de trous plus ou moins profonds qui affectent toutes les dents, en particulier dans la zone du cercle primitif (Figure II.2). Cette avarie se produit surtout sur des engrenages en acier relativement dur. Le pitting est moins lorsque la viscosité du lubrifiant est importante. Cette avarie peut apparaître à la suite d'un désalignement d'axes, à cause de surpression locales.

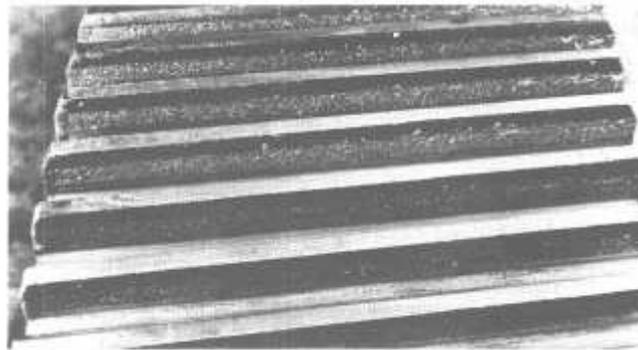


Figure II.2. Pitting réparti sur les dents d'un engrenage [54].

II.1.2.2 Défauts localisés

Écaillage : Il s'agit également de trous mais, moins nombreux, plus profonds et plus étendus que ceux du pitting (Figure II.3). Les dégradations sont produites par fatigue en sous couches, au point de cisaillement maximal. On rencontre ce type d'avarie dans les engrenages cimentés. L'écaillage est le défaut principal, évolue très rapidement vers la

rupture, sans passer par une phase d'usure.

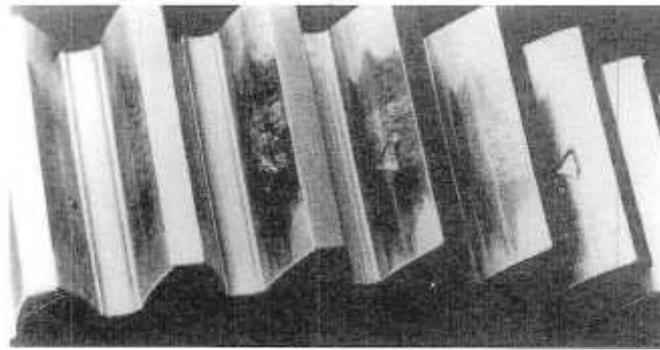


Figure II.3. Défaut local d'écaillage [54].

Fissuration : elle progresse à chaque mise en charge, et elle est située en pied de dent. Elle apparaît sur des aciers fins et durcis, qui sont sujets aux concentrations de contraintes. Leur apparition est due à un dépassement de la limite élastique au pied de dent du côté de la dent en traction.

En générale, les détériorations superficielles d'engrenages sont le résultat de différents phénomènes pouvant intervenir au cours du fonctionnement du système (Tableau II.2).

USURE	abrasion à 2 corps	<i>usure courante</i>	contact pur glissement métal sur métal
		<i>NA</i>	
	usure par adhésion	<i>strius</i>	charge élevée
		<i>poli miroir</i>	mise en fonctionnement des engrenages sous charge
		<i>NA</i>	
		<i>arrachements</i>	- déformation du support des engrenages - baisse de la viscosité ou insuffisance temporaire de lubrifiant - surcharges occasionnelles imprévisibles et brutales - passage d'un corps étranger
		<i>grippage à chaud</i>	- pression élevée - vitesse de glissement élevée ⇒ surchauffe excessive ⇒ rupture du film d'huile
<i>grippage à froid</i>	- pression élevée - vitesse de glissement faible		
usure à 3 corps	<i>griffures, sillons</i>	- grosses particules de poussières - particules métalliques - parcelles de rouille - sable de moulage	
	<i>usure abrasive</i>	- fines particules abrasives dans le lubrifiant	
usure par interférence	- mauvaise conception - surcharges entraînant une flexion exagérée - profil avec surépaisseur - 1 ou plusieurs dents déformées, abîmées, ou fissurées		
CORROSION	corrosion chimique, rouille	- additif ou acides dans le lubrifiant réagissant en présence d'eau - produits contaminants générant une composition défavorable - association d'une teneur en eau inadmissible	
	pelage	phénomènes d'oxydation produits au cours des traitements thermiques	
	corrosion par contact	arrêts prolongés avec secousses et/ou vibrations ⇒ formation d'oxydes très abrasifs.	
SURCHAUFFE	- surcharge - survitesse - lubrification insuffisante - association des 3 causes précédentes		
EROSION PAR CAVITATION	- grande vitesse - mvt relatif entre les flancs conjugués dans direction ⊥ surfaces (vibrations de services) - présence d'eau ou de gaz dans le lubrifiant		
ETINCELAGE	- passage d'un courant électrique		
USURE PAR FATIGUE	endommagements de faible profondeur	<i>micro-gerçures</i>	- film du lubrifiant un peu faible - rugosité trop importante
		<i>NA</i>	
		<i>micro-piqûres</i>	charge trop élevée en surface
	<i>piqûres</i>	- écarts de distorsion des dents sous charge - écart de profil des dents sous charge - irrégularités locales de surface - erreurs d'alignement des axes	
<i>piqûres en écailles</i>	- défaut de portée - bombé trop important - excès de matière localisé sur la surface de la dent		
écaillage	pression superficielle supérieure à la limite d'endurance du matériau		
dislocation de la couche traitée	profondeur traitée insuffisante		

Tableau II.2 : Causes des avaries de denture (NA : non avarie).

II.2 Structure des signaux vibratoires

Les signaux vibratoires relevés sur les systèmes mécaniques en fonctionnement contiennent l'information nécessaire relative à l'état des éléments de machine, tout le problème consiste à isoler l'information. En effet, les signaux ont une structure complexe, et sont constitués de différentes composantes :

- une partie du signal provient des phénomènes cycliques se produisant dans le système, comme la rotation des arbres, les chocs d'engrènement, les mouvements d'un roulement...
- une partie aléatoire, due aux phénomènes parasites générés lors du fonctionnement du système.

Ces signaux ne sont globalement pas stationnaire [55]. Cette non-stationnarité a plusieurs origines [56] :

- vieillissement du système et dérive progressive,
- excitation du système en vibration due aux chocs internes successifs,
- non-stationnarité des efforts transmis à travers le système,
- imperfection des surfaces de contact, et contact variable entre denture.

Cependant, l'évolution des signaux vibratoires n'est pas aléatoire. Il existe une similitude de la réponse vibratoire d'un cycle de fonctionnement à l'autre. La plupart des procédures de diagnostic néglige la cyclostationnarité, en considère le signal comme stationnaire.

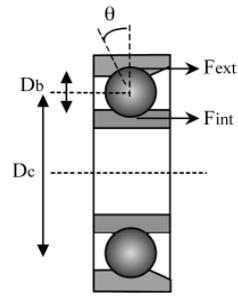
II.3 Influence des défauts sur la structure des signaux

Les défauts de roulements et d'engrènement ont une incidence sur les vibrations du système, car les roulements sont des organes de liaisons et de rigidité et les engrènements constituent les organes de transmission de puissance [57-62].

II.3.1 Influence des défauts de roulement sur la structure des signaux

Les défauts de roulements entraînent d'une manière générale plusieurs effets mécaniques tels que l'apparition de vibrations [50-51], [56] : en cas de défauts se présentant sur une partie du roulement, des vibrations à la fréquence caractéristique associée sont engendrées.

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{b_{int}} = \frac{n_b}{2} * f_r \left\{ 1 + \frac{D_b}{D_c} \cos \theta \right\} \\ f_{b_{ext}} = \frac{n_b}{2} * f_r \left\{ 1 - \frac{D_b}{D_c} \cos \theta \right\} \\ f_c = \frac{f_r}{2} \left\{ 1 - \frac{D_b}{D_c} \cos \theta \right\} \\ f_{bille} = f_r \frac{D_c}{D_b} \left\{ 1 - \left[\frac{D_b}{D_c} \cos \theta \right]^2 \right\} \end{array} \right. \quad (2.1)$$



- $f_{b_{int}}$: fréquence de bague intérieure - $f_{b_{ext}}$: fréquence de bague extérieure
- f_c : fréquence de cage - f_{bille} : fréquence de bille - f_r : fréquence de rotation mécanique
- n_b : nombre de billes - D_b : diamètre des billes - D_c : diamètre moyen du roulement
- θ : l'angle de contact.

Sur les machines tournantes bien des défauts se traduisent par une modulation de l'amplitude du signal vibratoire (figure II.4). Le spectre présente un pic à la fréquence modulée avec des raies latérales espacées de la fréquence de modulation. Des raies spectrales d'amplitude faible au regard des autres peuvent être d'un intérêt primordiale pour le diagnostic des défauts.

Afin de pouvoir les visualiser, on utilise pour la représentation des spectres en fréquences une échelle logarithmique des amplitudes du signal.

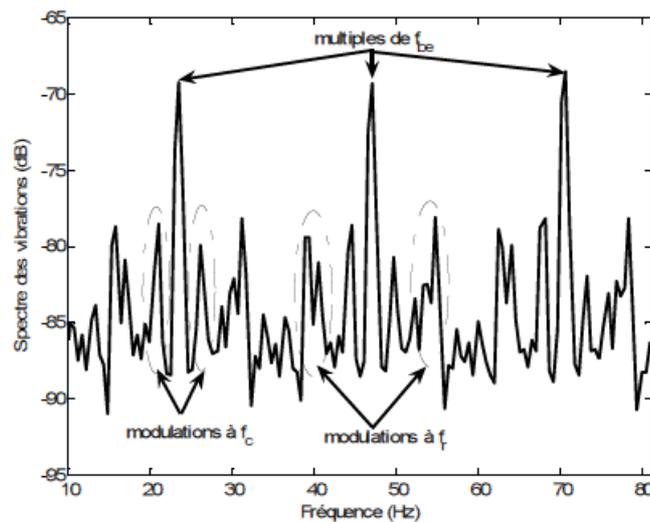


Figure II.4. Spectre vibratoire en cas de défaut bague extérieure [50].

II.3.2 Influence des défauts d'engrènement sur la structure des signaux

Les vibrations d'un engrènement sont produites principalement par le choc entre les dents des deux roues qui le composent. Ce choc est affaibli au maximum par une optimisation de la forme des dents, une développante de cercle légèrement corrigée pour tenir compte de la déflexion sous la charge. Mais cette optimisation n'est valable que pour une charge donnée et de plus, l'usure détériore peu à peu cette forme.

D'autre part, cette vibration appelée signal d'engrènement, qui est la source du bruit rayonné par les machines, subit un filtrage et des déformations causées par la structure de la machine, entre la source et le point d'engrènement.

II.3.2.1 Engrenage sans défauts

Un engrènement avec des dents parfaitement identiques sans défauts. Des excitations se produiront à chaque engrènement d'une paire de dents. Le signal vibratoire engendré par cet effort est recueilli au niveau du palier.

Le signal vibratoire d'un engrènement idéal est de type :

$$x(t) = \sum_{i=1}^N a_i \sin(2\pi Z f_r t + \varphi_i) + e(t) \quad (2.2)$$

Où

$e(t)$: bruit blanc)

φ_i : la phase initiale du mouvement.

f_r : la fréquence de rotation de l'arbre.

Z : nombre de dents d'une roue dentée.

i : nombre des harmoniques.

La fréquence d'engrènement f_e et la fréquence de coïncidence f_c sont données par [58-59] :

$$f_e = Z_1 * f_1 = Z_2 * f_2 \quad (2.3)$$

$$f_c = \frac{f_e}{N_c} \quad (2.4)$$

II.3.2.2 Engrenage avec défauts

Pour tenir compte de l'effet de certains défauts ou de vibration de torsion, le modèle (2.2) va s'écrire en supposant l'existence de modulations d'amplitude et de phase:

$$x(t) = \sum_{i=1}^N a_i(t) \sin(2\pi Z f_r t + \varphi_i(t)) + e(t) \quad (2.5)$$

II.3.2.3 Spectre d'engrenage

Dans un engrenage idéal, chacune des roues est formée de dents identiques et régulièrement espacées. Le signal accélération étant périodique, son spectre est composé d'harmoniques de la fréquence d'engrènement $f_e = Z_i * f_i$ avec f_i la fréquence de rotation de la roue i et Z_i le nombre de dents de la roue. Une périodicité apparaîtra en cas de détérioration d'une dent. Donc les harmoniques de f_i correspondant à la dent défectueuse viennent s'ajouter au spectre précédent [50], [53].

En pratique, un engrenage sain n'est pas idéal en raison de disparités géométriques; il possède un spectre composé des harmoniques d'engrènement. La détérioration de la surface de contact donne naissance à une fluctuation de la charge transmise qui se traduit par une modulation d'amplitude du signal vibratoire. Un défaut de denture rendra l'intervalle entre deux dents irrégulier; ce qui entraîne une fréquence d'engrènement instantanée variant autour de la valeur $f_e = Z_i * f_i$ (figure II.5) [58], [61].

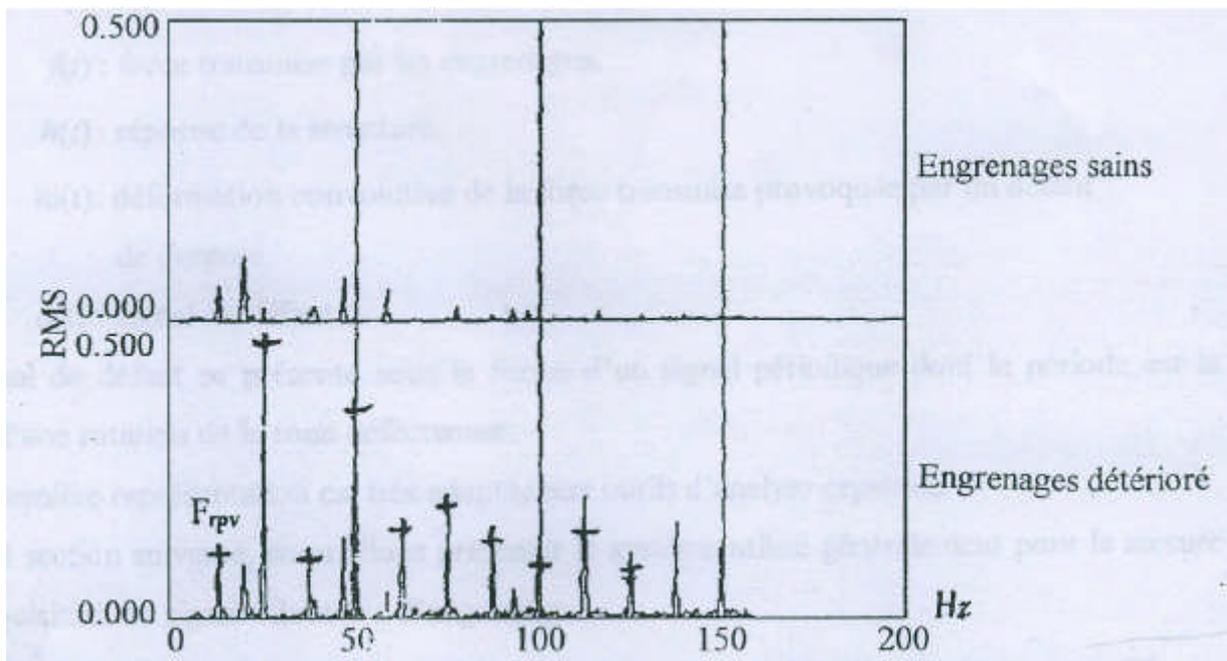


Figure II.5. Comparaison d'un signal d'engrènement sain et détérioré [61].

Parmi les images vibratoires des principaux défauts rencontrés dans les engrenages on trouve [63] :

II.3.2.3.1 La détérioration d'une dent

Lorsqu'une des deux roues possède une dent détériorée, il se produit un choc périodique à la fréquence de rotation de la roue considérée, le spectre correspondant montre non seulement la

fréquence d'engrènement précédemment, mais aussi un peigne de raies dont le pas correspondant à cette fréquence de rotation (Figure II.6).

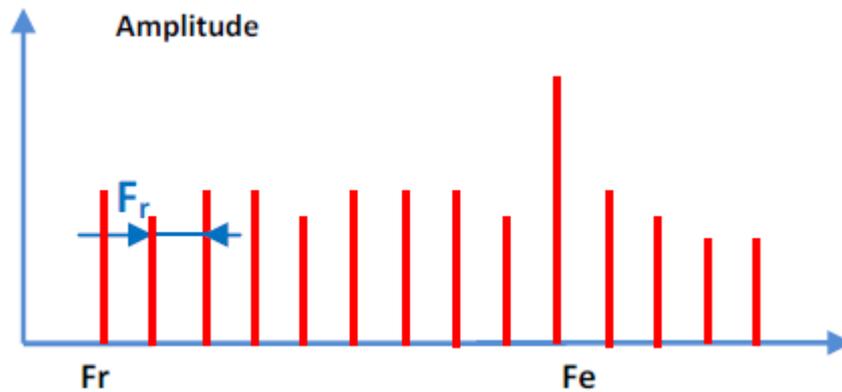


Figure II.6.a. Spectre théorique d'un engrenage présentant une dent détériorée [63].

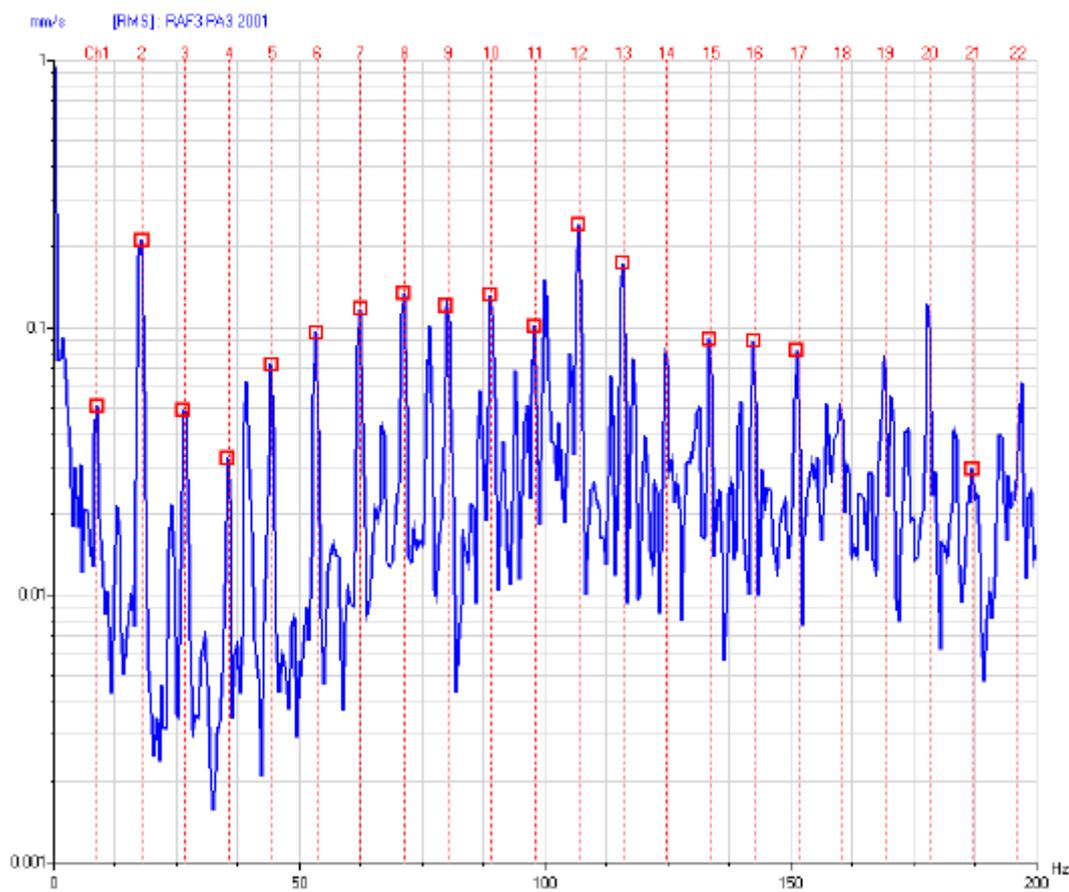


Figure II.6.b. Spectre réel d'un engrenage présentant une dent détériorée [63].

Figure II.6. Spectre d'un engrenage présentant une dent détériorée [63].

II.3.2.3.2 La détérioration de deux dents

Dans le cas où les deux roues dentées présentent chacune une dent détériorée, le spectre montre non les deux peignes de raies correspondant aux fréquences de rotation de chaque roue, mais aussi un peigne de raies de pas, correspondant à une fréquence très basse f_c .

II.3.2.3.3 Un ensemble de la denture détérioré

Dans le cas où l'ensemble de la denture est détérioré les chocs se produisent au passage de chacune des dents. Généralement la fréquence d'engrènement est plus élevée et les raies de la fréquence de rotation correspondent à des équilibres imparfaits (figure II.7) [63].

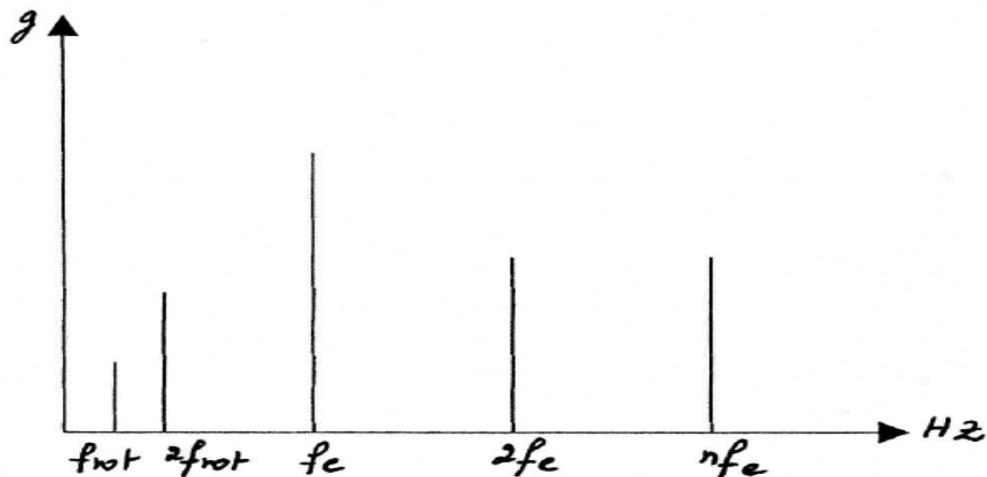


Figure II.7. Spectre théorique d'un engrenage présentant un ensemble de la denture détériorée [62]

II.4 Outils de traitements adoptés aux recherches de défauts

Les capteurs tels que les accéléromètres délivrent un signal composé de N points de mesure à intervalle de temps régulier. La première représentation d'un signal est **la représentation temporelle**. Cet outil est aisé à utiliser lorsque le signal est simple (vibration de type sinusoïdal du balourd), mais devient inexploitable dans le cas de sollicitations multiples et de faibles influence de défauts (Figure II.8).

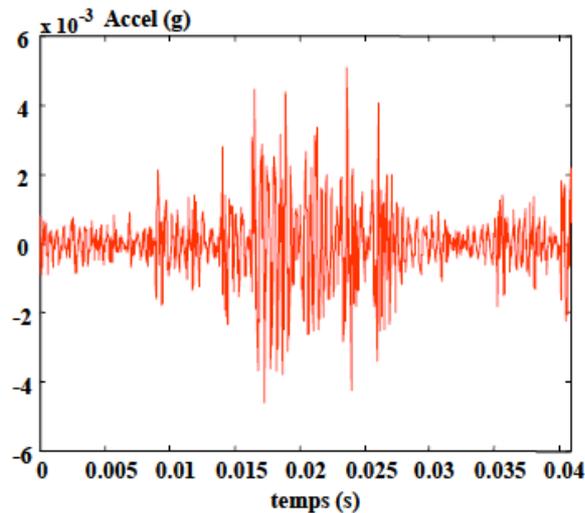


Figure II.8. Signal temporel de mesure d'accélération au palier en présence de défauts multiples de roulement et d'engrenages [50].

II.4.1 Analyse spectrale

Le signal mesuré est considéré comme une combinaison des réponses des composants constituant le système. Les fréquences caractéristiques sont proportionnelles à la fréquence de rotation des arbres. Un signal $s(t)$ peut être décomposé en signaux sinusoïdaux élémentaires. L'analyse spectrale consiste à identifier la fréquence et l'amplitude de ces sinus, ce qui permet de tracer la représentation amplitude / fréquence de $s(t)$. Pour calculer le spectre $S(f)$ de $s(t)$, on applique la Transformée de Fourier :

$$S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.6)$$

Numériquement, la Transformée de Fourier discrète s'exprime :

$$S(k) = \sum_{j=1}^N s(j) \omega_N^{(j-1)(k-1)} \quad (2.7)$$

Elle est calculée à partir d'un signal discret de N points. Elle permet d'obtenir un vecteur de k points, k représente la fréquence la plus haute. La résolution en fréquence est de k/N . Pour une fréquence d'échantillonnage fixée, plus le vecteur signal est grand, plus la résolution en fréquence est fine.

L'interprétation d'un spectre consiste à trouver l'origine cinématique des composantes les plus énergétiques. La lecture d'un spectre nécessite le maximum de renseignements concernant les conditions de fonctionnement (vitesse de fonctionnement, type de roulement...).

Les familles de composantes émergent sous l'influence de défauts peuvent se présenter tant sous forme de peignes de raies que sous forme de bande latérales de modulation autour d'une fréquence cinématique (Figure II.9) [50-51], [63].

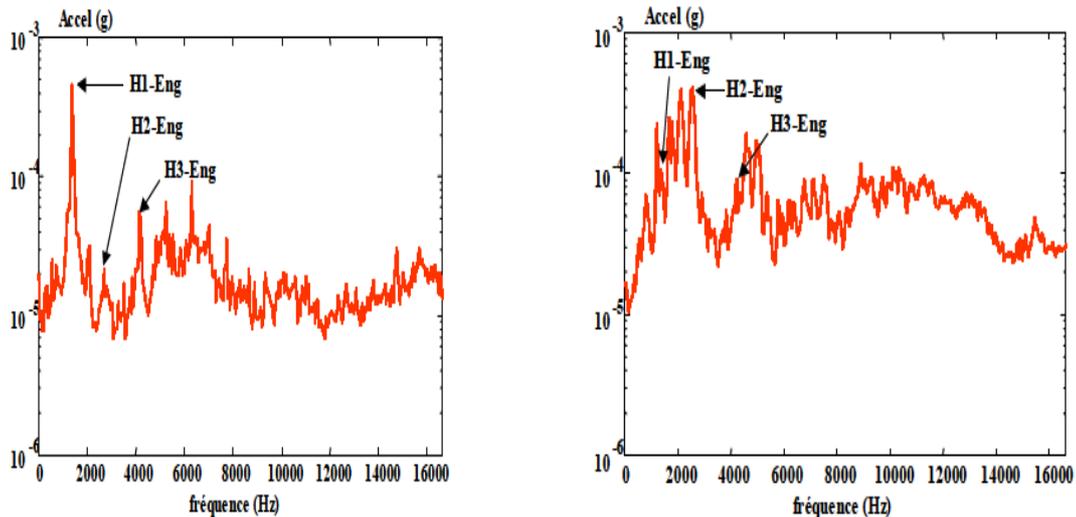


Figure II.9.a. Spectre d'accélération sans défauts Figure II.9.b. Spectre d'accélération avec défauts de roulement

Figure II.9. Spectres caractéristiques de signaux d'accélération aux paliers d'une transmission de puissance par engrenages [50].

Parmi les outils les plus utilisés dans cette technique, on trouve [58], [61] :

- **Numérisation et échantillonnage** : le calcul du spectre s'effectue sur un nombre N d'échantillons. Généralement l'échantillonnage de base se fait sur 1024 échantillons et parfois sur 2028 échantillons.
- **Le temps d'acquisition du signal** : le temps d'acquisition t d'un bloc de N points est inversement proportionnel à la largeur de la plage de fréquence dans la quelle on calcule le spectre (B) :

$$\Delta t = \frac{\text{Nombre de ligne}}{B} = \frac{\text{Nombre de points}}{f_e} \quad (2.8)$$

- **L'effet de repliement et anti-repliement** : avant d'échantillonner le signal temporel, un filtre passe bas (anti-repliement) est appliqué pour éviter toutes les fréquences au-delà de la fréquence d'échantillonnage f_e . Dans la plupart des systèmes cette fréquence est fixée à :

$$f_e = 2,56 \cdot f_{max} \quad (2.9)$$

Avec f_{max} ; la fréquence la plus élevée des composantes élémentaires constituant le signal.

- **Résolution (finesse d'analyse)** : la résolution f dépend à la fois de la largeur de la plage de fréquence dans laquelle on veut calculer le spectre et du nombre de point N nécessaire au calcul d'un spectre, ou ce qui découle du nombre de lignes (canaux) de l'analyseur.

La résolution de base est :

$$R = \frac{\text{fréquence pleine échelle}}{\text{nombre de lignes de l'analyseur}} \quad (2.10)$$

- **Le zoom** : est la technique de calcul qui permet d'améliorer la résolution par deux façons :
 - ✓ Soit en augmentant le nombre de points nécessaires au calcul d'un spectre qui nous donne une finesse d'analyse meilleur que celle du spectre de base.
 - ✓ Soit en réduisant la plage d'analyse d'un facteur p avec le même nombre de points et en centrant autour de la fréquence de la composante que l'on veut analysée d'une manière plus détaillée.

- **Le fenêtrage** : il existe de nombreuses fonctions de fenêtrage, le choix de la fenêtre dépend de la précision recherchée en amplitude ou en fréquence, la fenêtre de Hanning est, dans le cas d'une analyse de vibrations, un bon compromis, compte tenu de la très moyenne précision en amplitude due aux performances des capteurs de mesure de mesure de vibration.

- **Le moyennage** : donne lieu à des résultats plus fidèles dans la collecte des données. Les spectres instantanés sont ajoutés les uns aux autres et la somme est divisée par le nombre total de spectres.

- **La modulation** :

La modulation en amplitude : c'est la variation périodique de l'amplitude en fonction du temps. Le signal vibratoire est donné par :

$$A_{cr} \sin(2\pi ft) + \frac{A_{mod}}{2} [\cos 2\pi(f - f_{mod}) - \cos 2\pi(f + f_{mod})] \quad (2.11)$$

La modulation en fréquence : lorsque les fréquences des composantes deviennent des fonctions périodiques du temps, on dit que ces composantes sont modulées en fréquence.

Le signal est donné par :

$$A_1 \sin(2\pi f_1 t) + A_2 \sin(2\pi f_2 t) \quad \text{avec } f_2 > f_1 \quad (2.12)$$

II.4.2 Analyse d'enveloppe

L'étude du signal enveloppe permet d'analyser la forme du signal, notamment lorsque le défaut recherché excite un mode de résonance de la structure. Elle consiste à filtrer le signal

autour d'une fréquence de résonance identifiable sur le spectre, et à en recherche la modulation provoquée par la répétition des forces générées par le défaut. La détermination des fréquences de modulation, associée à la connaissance de la cinématique de l'installation, permet de localiser l'origine du défaut de façon précoce et rapide, même lorsque l'effet du défaut est noyé dans un bruit de fond. Donc c'est une opération de démodulation de phase consistante à isoler les fréquences modulantes [50], [64-69].

Le calcul numérique de l'enveloppe est : on applique la Transformée de Fourier au signal temporel. Le spectre défini permet d'isoler les résonances du système. Le signal est filtré passe-bande afin d'obtenir un spectre réduit autour de la fréquence principale du système, puis on applique la Transformée d'Hilbert. Par Transformée inverse de Fourier, on obtient le signal enveloppe temporel. Généralement on utilise le spectre d'enveloppe (Figure II.10).

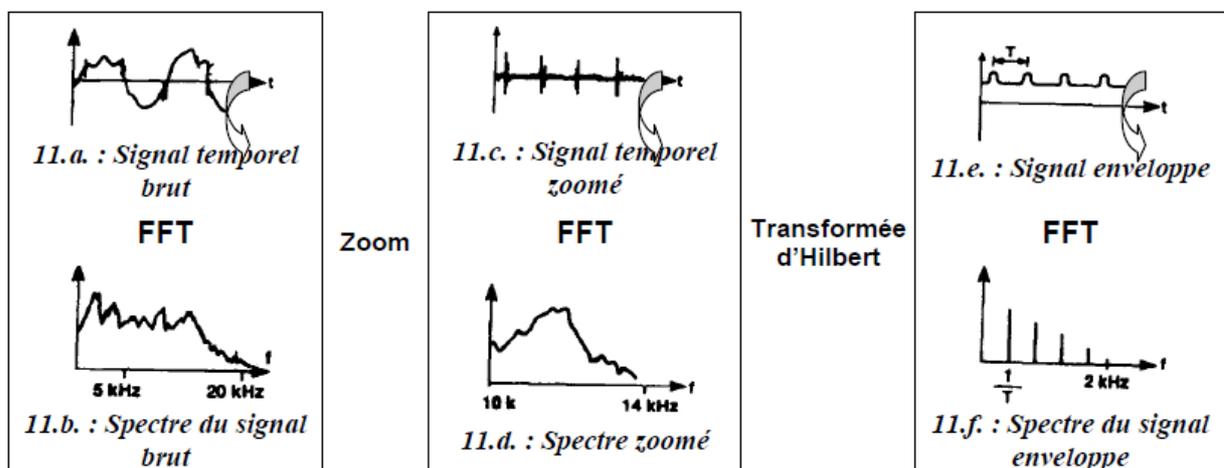


Figure II.10. Principe de calcul de l'enveloppe [50].

L'analyse d'enveloppe filtre les basses fréquences de rotation du signal complexe. Les composantes répétitives de hautes fréquences sont amplifiées et converties en spectre tandis que le bruit est réduit. Si des vibrations apparaissent dans le spectre enveloppe qui est lié aux fréquences de défaut de roulement, on peut en déduire qu'un défaut se développe. La figure II.11 montre clairement les impulsions provoquées par un défaut sur la piste externe d'un roulement. Le premier pic correspond à la fréquence fondamentale et les autres pics sont les harmoniques.

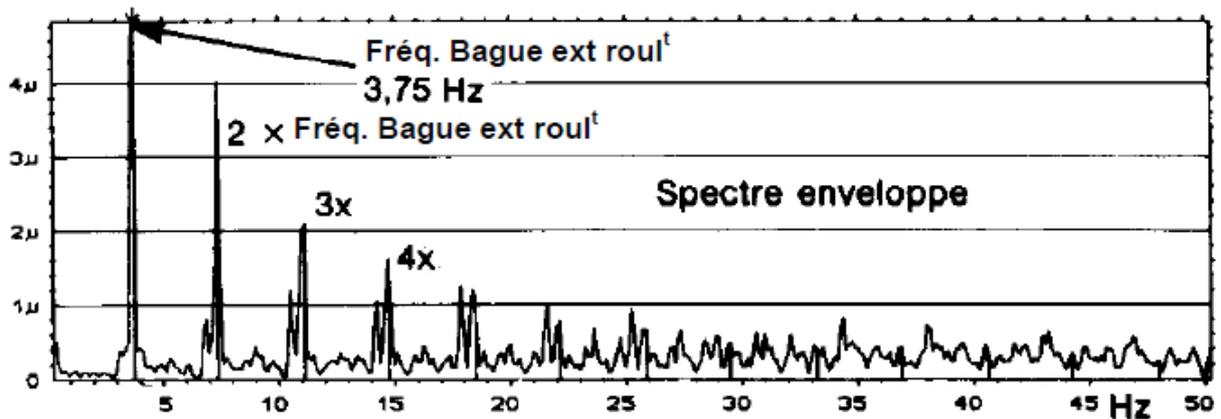


Figure II.11. Spectre enveloppe identification de défaut de roulement [50].

II.4.3 Analyse cepstre

Le cepstre est définie comme étant la Transformée de Fourier inverse du logarithme du spectre de puissance [50], [68-69]:

$$c(\tau) = F^{-1}[\log_{10}(S(f))] \quad (2.13)$$

La variable τ est appelée quéfrence. Une petite quéfrence représente des espacements grands entre les fluctuations dans le spectre et une haute quéfrence des espacements petits.

Le cepstre permet d'avoir des indicateurs de dépistage adaptés à la recherche de défauts dont on connaît la fréquence d'apparition, et qui induisent à des stades plus ou moins avancés, des énergies vibratoires peu importantes (Figure II.12).

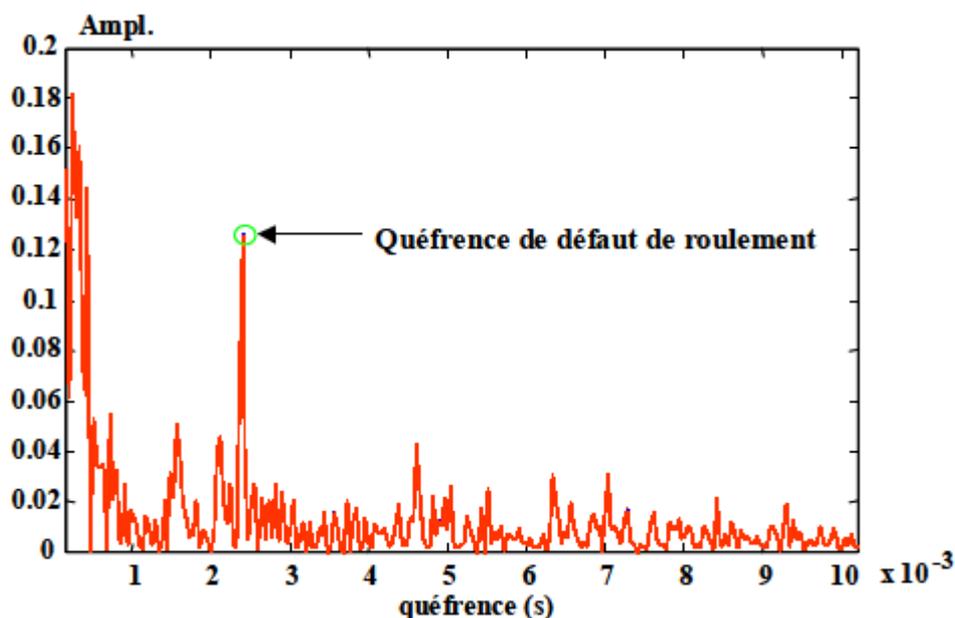


Figure II.12. Cepstre de signal d'accélération à un palier avec un défaut de roulement [50].

II.5 Techniques de détection utilisée dans l'industrie

Pour le suivi vibratoire des machines tournantes, différentes techniques et outils sont utilisés pour, d'une part détecter une défaillance puis pour évaluer le degré de sévérité de cette défaillance.

Les techniques de surveillance sont actuellement bien établies et sont basées sur l'analyse de signaux vibratoires issus d'accéléromètres. Elles permettent l'analyse statistique des signaux (Facteur de crête, Kurtosis, valeur RMS (niveau globale)) qui met en évidence une variation du niveau global des vibrations et l'analyse du contenu fréquentiel (spectre, cepstre, détection d'enveloppe...) qui permet de localiser plus précisément l'origine de cette variation de niveau.

Nous présentons ici quelques indicateurs ; niveau globale, Facteur de crête, Kurtosis.

II.5.1 Niveau global

Le spectre des accélérations avec défauts de roulement présente un niveau élevé dans le domaine de hautes fréquences [57], [63], [69]. La mesure régulière du RMS, valeur efficace du niveau de vibration pour une bande de fréquence limitée aux fréquences élevées (de 1KHz à 10KHz) fournit un indicateur de la présence d'un défaut de roulement. Les valeurs prises peuvent être comparées avec une valeur recommandée. Une valeur de niveau global unique est souvent difficilement exploitable en valeur absolue, mais nous pourrions par contre les utiliser en relatif, c'est-à-dire que l'évolution dans le temps d'un niveau global (courbe de tendance) est réellement significative de l'évolution de l'état vibratoire de la machine. La courbe de tendance est accompagnée parfois d'une courbe de tendance extrapolée qui indique la pente de la dégradation et permet, en théorie, d'estimer ainsi une date présumée de défaillance (Figure II.13).

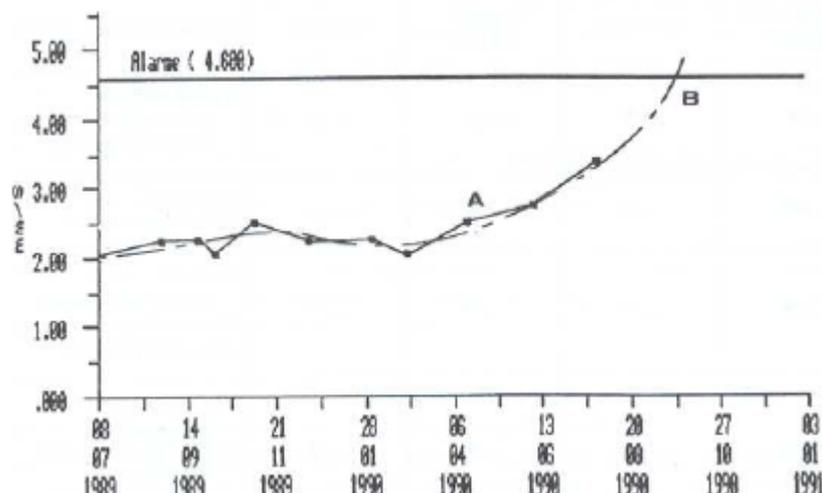


Figure II.13. Courbe de tendance et extrapolée [63].

$$\text{RMS} = A_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (2.14)$$

II.5.2 Facteur de crête

Un autre type d'indicateur, similaire au précédent, permet une détection précoce [56-57], [63]. Il s'agit du facteur de crête, le rapport de la valeur de crête sur la valeur efficace :

$$F_c = \frac{A_c}{A_{\text{eff}}} \quad (2.15)$$

F_c : Facteur de crête,

A_c : Amplitude maximal du signal,

A_{eff} : Valeur efficace du signal (RMS).

Le facteur de crête suit une évolution caractéristique au fil de l'aggravation du défaut de roulement (Figure II.14). A l'apparition du défaut, il reste constant, puis avec l'augmentation des chocs, le niveau de crête devient plus élevé alors que RMS n'est pas influencé. Il résulte une augmentation significative du facteur de crête. Le suivi de celui-ci représente le même investissement et le même procédé d'exploitation que le niveau global de vibration. Il nécessite un suivi régulier, puisqu'en fin de vie de roulement, le facteur de crête peut tomber à sa valeur initiale, car la valeur de crête se stabilise alors que la valeur efficace continue d'augmenter.

L'inconvénient de ce type d'indicateur est sa sensibilité aux autres sources de vibrations du système. Il n'est utilisable de façon fiable qu'en présence de seuls défauts de roulements.

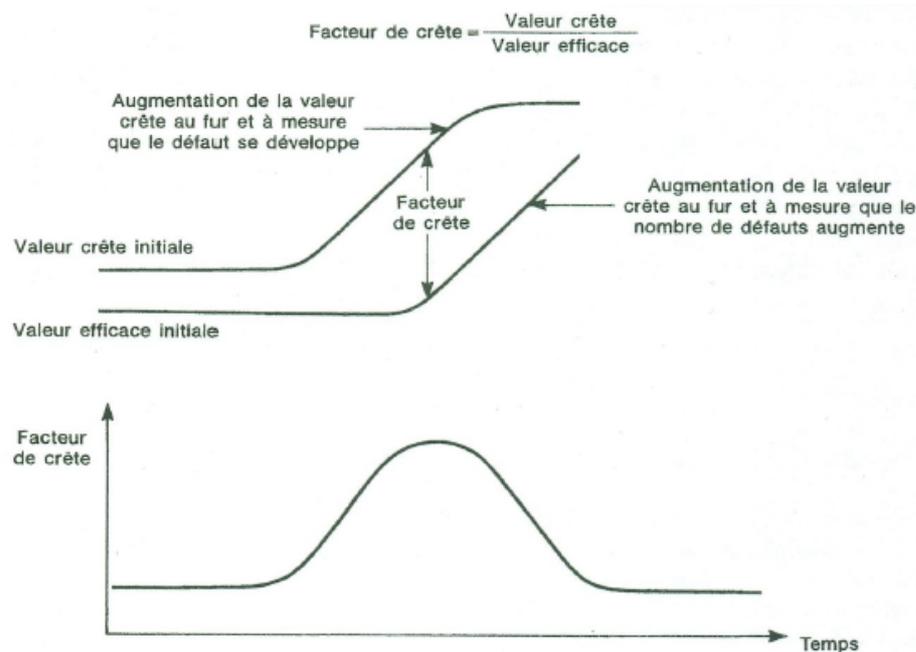


Figure II.14. Evolution des valeurs crête, efficace et du facteur de crête [56].

II.5.3 Kurtosis

Le Kurtosis permet de détecter la présence des chocs dans le signal mesuré. Plus le Kurtosis est élevé plus les chocs sont importants. Pour indication, en absence du défaut le kurtosis est égal à 1.5 alors que cette valeur peut s'élever de quelle que unités en présence d'un défaut de roulement. Le Kurtosis peut être calculé avant le filtrage du signal.

Le kurtosis est donné par la relation [60], [64] :

$$K = \int_{-x}^x \frac{(x - x_{moy})}{\sigma^4} P(x) dx \quad (2.15)$$

x : Amplitude instantanée du signal

x_{moy} : Valeur moyenne de x

$P(x)$: probabilité d'apparence de x

σ : Écart type.

II.6 Conclusion

Les transmissions de puissance à engrenages dont il est indispensable de suivre l'état des deux types de composants les plus sujets à l'usure ; les engrenages et les roulements. Ces systèmes mécaniques produisent en fonctionnement des vibrations résultant de tous les contacts entre éléments et des effets dynamiques des masses en mouvement.

L'introduction d'anomalies comme les défauts d'engrenages et de roulements modifie la structure des signaux ; certaines composantes peuvent être renforcées, des modulations d'amplitude et de phase apparaissent, l'amplitude généralement peut augmenter. Les vibrations contiennent donc toute l'information concernant l'état des organes mécaniques de la machine.

Le premier indicateur de surveillance est le niveau global en accélération (de 0 à 20 000 Hz). S'il ne suffit pas, on utilise d'autres indicateurs plus spécifiques (tels que le facteur de crête ou le kurtosis) ou des méthodes plus sophistiquées (telles que la détection d'enveloppe, le cepstre, ou l'analyse spectrale).

Un système de diagnostic embarqué fonctionnant en temps réel nécessite d'obtenir facilement et régulièrement des informations relatives à l'état du système. La multitude d'indicateurs à surveiller et à croiser, la difficulté d'interprétation, d'une forme, d'une valeur, rendent délicates les opérations de suivi. C'est pourquoi il est important de pouvoir disposer de système d'analyse automatique des mesures prélevées sur un système.

Parmi ces systèmes on distingue, les réseaux de neurones qui sont particulièrement adaptés à l'automatisation d'un suivi de comportement par analyse vibratoire.

Dans le chapitre suivant nous présentons les réseaux de neurones artificiels.

Chapitre III Automatisation de diagnostic par de réseaux de Neurones

III.1 Introduction

Toutes les machines en fonctionnement produisent des vibrations, images des efforts dynamiques engendrés par les pièces en mouvement. Ainsi, une machine neuve en excellent état de fonctionnement produit très peu de vibrations. La détérioration du fonctionnement conduit le plus souvent à un accroissement du niveau des vibrations. En observant l'évolution de ce niveau, il est par conséquent possible d'obtenir des informations très utiles sur l'état de la machine. Ces vibrations occupent une place privilégiée parmi les paramètres à prendre en considération pour effectuer un diagnostic. La modification de la vibration d'une machine constitue souvent la première manifestation physique d'une anomalie (l'écaillage de roulement, usure et rupture d'une dent d'un engrenage, le désalignement d'un des axes, etc.,) cause potentielle de dégradations, voire de pannes. Ces caractéristiques font de la surveillance par analyse des vibrations, un outil indispensable pour une maintenance moderne, puisqu'elle permet, par un dépistage ou un diagnostic approprié des défauts, d'éviter la casse et de n'intervenir sur une machine qu'au bon moment et pendant des arrêts programmés de production.

Pour le personnel de maintenance il s'agit de comparer les signaux recueillis avec des signaux de références, et d'associer aux changements de forme des signaux, une défaillance probable. La multitude d'indicateurs à surveiller et à croiser, la difficulté d'interprétation, d'une forme, d'une valeur, rendent délicates les opérations de suivi. C'est pourquoi il est important de pouvoir disposer de système d'analyse automatique de mesures prélevées sur un système.

Les réseaux de neurones ont été créés dans l'intention d'imiter des fonctions du cerveau humain. Les signaux recueillis sur le système sont analysés dans le réseau qui cherche suivant des critères définis, la présence de certains défauts ; à partir de signaux caractéristiques, représentatifs, des situations de défaillance potentielle, une première phase vise à établir une connexion correcte entre les neurones, afin que le réseau fournisse une réponse adéquate à chaque signal analysé. En suite, le réseau peut être employé comme outil de classement, car il est désormais capable de définir l'état des éléments du système, à partir de signaux qui n'ont pas été utilisés à l'apprentissage.

Les classifications peuvent être réalisées soit uniquement à partir de caractéristiques de signaux expérimentaux, soit à partir de modèles générés par le réseau permettant de prévoir une réponse. Dans la catégorie des réseaux fonctionnant à partir signaux expérimentaux, existent les

réseaux multicouches. Pour ceux-ci, les formes extraites des mesures doivent être soigneusement choisies pour être représentatives de l'information nécessaire au diagnostic.

Ce chapitre a pour but d'exposer les éléments nécessaires à la compréhension de la théorie et de la pratique des réseaux de neurones, qui seront réalisés ultérieurement (chapitre 5), en vue d'élaborer le système automatique de diagnostic des défaillances du réducteur d'un broyeur horizontal.

Le présent chapitre comprend :

- la description des fondements biologiques des réseaux de neurones ;
- leur modélisation et la présentation des modèles les plus importants permettant l'apprentissage des RNA ;
- l'étude des applications et des perspectives d'utilisation des réseaux de neurones.

Enfin, à partir de l'analyse effectuée les principales caractéristiques des RNA utilisés pour l'élaboration du système automatique de diagnostic des défaillances seront définies.

III.2 Les réseaux de neurones biologiques

Les cellules nerveuses, appelées neurones, sont les éléments de base du système nerveux central ; celui-ci en posséderait environ cent milliards. Par ailleurs, il existe de nombreuses variétés de neurones, les différences portant tant sur les aspects anatomiques que sur les aspects fonctionnels [70].

En général, chaque neurone biologique possède un axone qui peut atteindre plusieurs dizaines de centimètres, un corps cellulaire où se situe le mécanisme du déclenchement du neurone, des dendrites qui reçoivent des informations des autres neurones et des terminaisons axonales qui émettent des informations vers les autres neurones (figure III.1). Les neurones sont interconnectés entre eux par des synapses dont le nombre est d'environ 10000 milliards. ceci signifie qu'un neurone reçoit en moyenne des excitations en provenance de 1000 neurones, et qui émet également des informations à 1000 neurones différents.

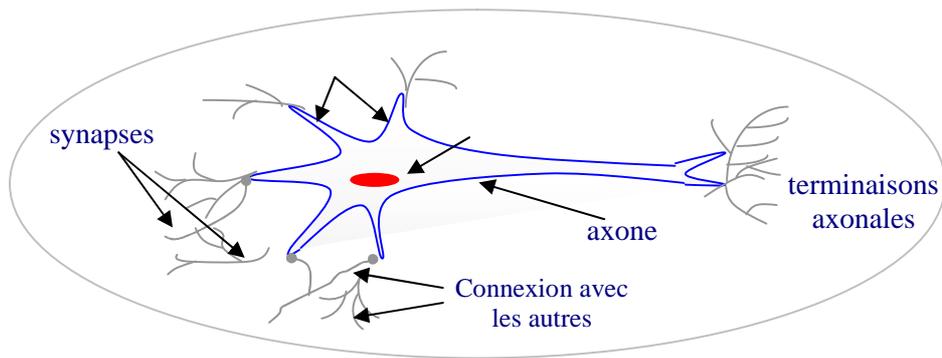


Figure III.1. Schéma simplifié d'un neurone du cerveau humain.

Il existe quatre modes de communications entre neurones [71]:

- liaison terminaison axonale-dendritique;
- liaison terminaison axonale-corps cellulaire;
- liaison axone-axone;
- liaison dendrite-dendrite.

Le processus de communication entre les neurones se fait par voie électrochimique aux niveaux des synapses par des neurotransmetteurs ; ces fonctions spécifiques dépendent essentiellement des propriétés de la membrane externe du neurone, cette dernière remplit cinq fonctions principales:

- elle sert à propager des impulsions électriques tout au long de l'axone et des dendrites;
- elle libère des médiateurs à l'extérieur de l'axone;
- elle réagit au niveau du corps cellulaire aux impulsions électriques que lui transmettent les dendrites pour générer ou non une nouvelle impulsion;
- enfin, elle permet au neurone de reconnaître les autres neurones afin qu'il puisse se situer dans l'architecture anatomique du cerveau et de trouver les cellules auxquelles il doit être connecté.
- Généralement, les réseaux de neurones artificiels sont basés sur une théorie électrique selon laquelle la jonction synaptique, est l'endroit où le neurone perçoit un stimulus par voie électrochimique. La membrane synaptique, lorsqu'elle ne reçoit pas d'excitation, est polarisée à une tension supérieure à un seuil donné, le neurone étant alors activé et cela déclenche un processus de dépolarisation ; le neurone émet sur l'axone une tension positive d'environ $+60 \div +70\text{mv}$ en se comportant comme un système non linéaire. C'est ce type de modèle qui est majoritairement retenu pour simuler artificiellement les neurones du cerveau humain.

III.3 Les neurones artificiels

Le premier modèle d'un neurone artificiel a été présenté dans les années quarante par Mac Culloch et Pitts [70-73]. Par analogie avec le modèle électrochimique, ils ont proposés le modèle d'un neurone artificiel qui est établi conformément au modèle non linéaire représenté sur la (figure III.2).

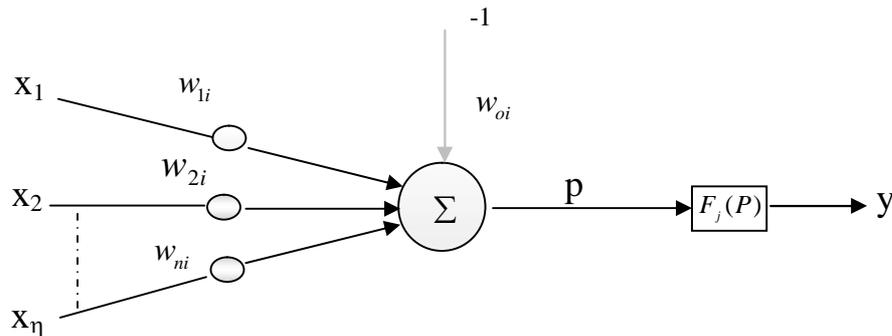


Figure III.2. Modèle du neurone de Mc CULLOCH et PITTS.

Chaque neurone artificiel transforme l'ensemble des signaux qu'il reçoit en un signal de sortie qui est communiqué à d'autres neurones. Cette transformation s'effectue en deux étapes:

- a) Le neurone effectue une sommation pondérée des potentiels (principe de superposition) ; la valeur numérique obtenue représente l'état du neurone qui l'a émis, afin d'obtenir une stimulation résultante globale :

$$p_i = \sum_{j=1}^{j=N} w_{ij}x_j - w_{oi} \quad (3.1)$$

- b) A l'aide d'une fonction de transfert, on teste le neurone. Si cette stimulation dépasse un certain seuil, le neurone est activé et transmet une réponse. Dans ce cas [73] :

$$f_i(P) = \begin{cases} 1 & \text{si } P > \beta \\ 0 & \text{si } P \leq \beta \end{cases} \quad (3.2)$$

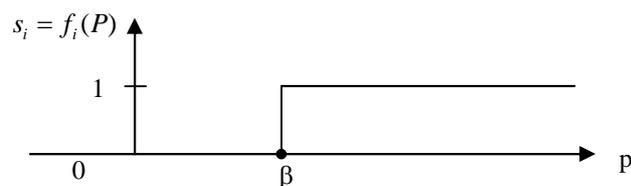


Figure III.3. Fonction de seuillage avec un sommateur.

D'une façon générale, on peut définir un neurone formel (artificiel) par les quatre éléments suivants [95]:

- la nature de ses entrées ;
- la fonction d'entrée totale qui définit le prétraitement effectué sur les entrées ;
- la fonction d'activation (ou d'état) du neurone qui définit son état interne en fonction de son entrée globale ;
- La fonction de sortie.

Nous adopterons par la suite les notations suivantes :

(e_i) $i = 1:n$ les entrées ;

h la fonction d'entrée totale ;

f la fonction d'activation ;

g la fonction de sortie.

D'autre part, nous utiliserons également les désignations suivantes :

$E = h(e_1, e_2, \dots, e_n)$ comme entrée totale;

$A = f(E)$ comme état du neurone;

$S = f(A)$ comme sortie.

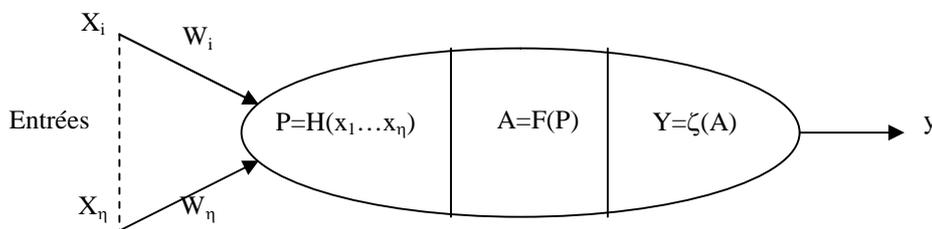


Figure III.4. Modelisation générale d'un neurone.

- **nature des entrées et des sorties**

elles peuvent être:

- binaires: $(-1,+1)$ ou $(0,1)$
- réelles.

- **la fonction d'entrée totale h**

elle peut être :

- booléenne ;
- linéaire : $h(e_1, e_2, \dots, e_n) = \sum_{j=1,n} w_j e_j$
- affine : $h(e_1, e_2, \dots, e_n) = \sum_{j=1,n} w_j e_j - a$ (3.4)

Ces deux derniers cas sont les plus fréquents [73], On peut interpréter le (a) par l'utilisation d'un neurone qui fournirait toujours l'entrée -1 au neurone étudié. Cette notation sera utile lorsque nous aborderons les modèles d'apprentissage.

- **la fonction de transfert (d'activation) :**

la fonction de transfert est en général une fonction non linéaire monotone croissante [73]; par ailleurs les fonctions de transfert sont de qualités diverses : elles peuvent être déterministes, continues, discontinues ou aléatoires. Ces fonctions sont présentées dans le tableau suivant :

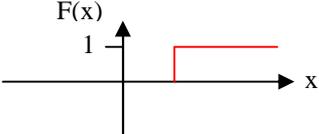
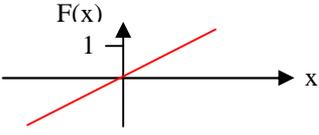
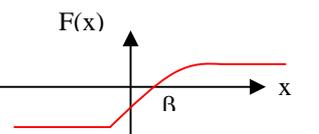
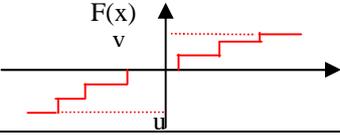
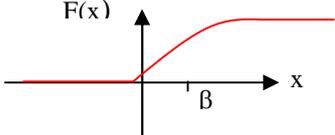
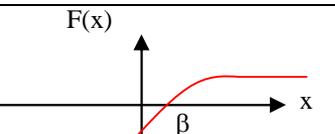
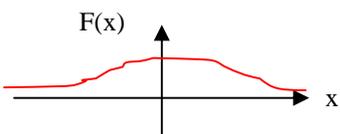
(a) Fonction de Heaviside	
(b) Fonction linéaire sans saturation	
(c) Fonction linéaire avec seuil	
(d) fonction à seuils multiples	
(e) fonction sigmoïde $F(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$	
(f) fonction sigmoïde $F(x) = \frac{1 - e^{-x}}{1 + e^{-x}}$	
(g) fonction stochastique	

Tableau III.1 : Les fonctions d'activation.

- **la fonction de sortie :**

En général, cette fonction $g(E)$ est considérée comme étant la fonction identité $g(E) = f(E)$. Par la suite, nous confondrons activation et sortie du neurone.

Les fonctions d'entrée et d'activation sont choisies en fonction des types d'automates utilisés, dépendant de la nature des entrées et des sorties. En général, ils sont au nombre de six [70]:

- **les automates booléens**

les entrées et les sorties sont booléennes ;

La sortie est une fonction booléenne des entrées.

- **les automates à seuil**

la sortie est binaire alors, que les entrées peuvent être binaires ou réelles ;

La fonction d'entrée totale est affine ; La fonction d'activation est la fonction signe ou la fonction de Heaviside.

- **les automates linéaires**

- Les entrées et les sorties sont réelles ;

- La fonction d'entrée totale est linéaire ;

- La fonction de sortie est l'identité.

- **les automates à saturation**

- Les entrées et les sorties sont comprises dans un intervalle $[u,v]$;

- La fonction d'entrée totale est linéaire ;

- La fonction d'activation est la fonction SATUR.

Si les entrées et les sorties sont entières, on obtient un automate multiseuil.

- **les automates continus**

- Les entrées et les sorties sont réelles ;

- La fonction d'entrée est linéaire ou affine ;

- La fonction d'activation est une fonction sigmoïde ;

- **les automates probabilistes**

- Les sorties sont binaires et les entrées sont quelconques.

- La fonction d'entrée est affine ou linéaire ;

- La fonction d'activation est stochastique.

III.4 Description des réseaux de neurones artificiels

Les recherches actuelles faites sur les réseaux de neurones artificiels n'ont pas permis de donner une définition exacte ou universelle à ce concept. En effet, la définition admise, utilise la notion de réseaux d'automates ou de système connexioniste [71]. Un réseau de neurones artificiels est composé d'automates connectés en réseau et fonctionnant en parallèle et dans lequel les connexions contiennent la connaissance d'un domaine particulier.

Par ailleurs, il existe une grande variété des réseaux de neurones artificiels, ceux-ci peuvent être définis selon plusieurs critères, parmi lesquels, on peut citer :

- la nature des cellules élémentaires ;
- La méthode d'apprentissage ;
- Le mécanisme de classification ;
- Le mécanisme de mémorisation ;
- La structure des connexions (architecture) .

III.4.1 La nature des cellules

Pour déterminer les fonctions d'entrée et d'activation d'un réseau d'automates, il faut d'abord définir les modes de codage des informations à l'entrée, à l'intérieur et à l'extérieur du réseau. Par exemple un réseau recevra sur les cellules d'entrée des informations codées en continu et fournira une sortie codée en binaire ; la fonction d'entrée sera la fonction affine et la fonction d'activation sera la fonction signe ou la fonction de Heaviside (cette dernière utilisée pour les réseaux à mémoire associative) [70-71]. Ce dernier exemple sera utilisé dans notre système de détection (RNA), où les entrées sont codées en continu et les sorties codées en binaire ; nous mentionnerons toutes ces caractéristiques dans la section (III.4.5.2) (le choix de l'architecture des réseaux de neurones).

III.4.2 Les mécanismes d'apprentissage

III.4.2.1 Définition : Les mécanismes d'apprentissage sont la propriété la plus intéressante des réseaux de neurones. A cet effet, les paramètres internes (poids de connexion) d'un réseau de neurones sont modifiés en utilisant un algorithme d'adaptation appelé algorithme d'apprentissage.

Par ailleurs, une autre classification des réseaux de neurones peut être déduite en fonction du type d'apprentissage. En effet on distingue deux grandes familles d'apprentissage : l'apprentissage supervisé et l'apprentissage non supervisé [71], [74-75].

III.4.2.2 Les algorithmes avec apprentissage supervisé

Dans ce type d'apprentissage, l'algorithme détermine les poids synaptiques à partir d'exemples étiquetés de formes auquel un professeur (teacher) a associé des réponses ou des cibles également étiquetées. Il existe plusieurs algorithmes, parmi lesquels on distingue l'algorithme de rétropropagation qui est destiné aux réseaux à couches (réseaux non bouclés).

III.4.2.3 Les algorithmes avec apprentissage non supervisé

Dans ce type d'algorithmes, on présente à l'entrée du réseau des exemples connus et le réseau s'organise lui-même autour d'attracteurs qui correspondent à des configurations stables du modèle dynamique non linéaire associé au réseau. L'apprentissage est accompli à l'aide de règles qui changent ou adaptent les poids des coefficients synaptiques en fonction des exemples présentés à l'entrée et dans certains cas en fonction des sorties désirées. L'apprentissage a lieu souvent en temps réel avec des réseaux qui peuvent être éventuellement bouclés, parmi lesquels, on peut citer : le réseau de HOPFIELD, et les cartes topologiques de KOHONEN.

III.4.2.4 Les principales règles d'apprentissage

Les stratégies de modification des poids synaptiques découlent des règles suivantes :

- la règle de Hebb où le poids des connexions entre deux processeurs élémentaires est renforcé si ces derniers sont activés simultanément ;
- la règle Widrow-Hoff ou règle delta : le poids synaptique est adapté pour obtenir la diminution de l'erreur entre la sortie réelle du processus élémentaire et la sortie désirée ;
- l'apprentissage compétitif dans lequel tous les processeurs élémentaires sont en compétition. La sélection est réalisée à l'aide d'un processus de compétition, basé sur une mesure de similarité entre l'exemple de référence associé à chaque processeur et l'exemple d'entrée.

Les expressions précises des règles dépendent très étroitement de la nature des fonctions d'entrée totale, des fonctions d'activation et de la nature continue ou discrète des informations contenues dans les cellules de neurones.

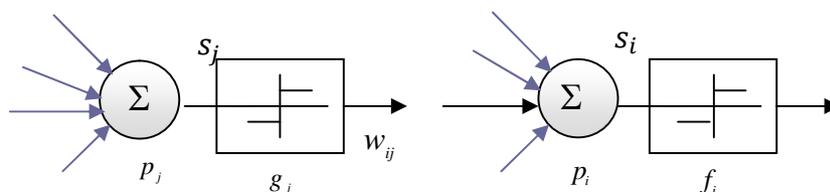


Figure III.5. Modèle d'apprentissage de la connexion w_{ij} entre deux neurones.

Rumhart [76] a proposé une règle générale de modification du poids synaptique w_{ij} valables dans de nombreux mécanismes d'apprentissage, cas d'une cellule p_i avec éventuellement une entrée « professeur » t_i .

$$\Delta w_{ij} = \alpha f_i(s_i, t_i) g_j(s_i, w_{ij}) \quad (3.5)$$

Avec

α : le pas d'adaptation.

f_i et f_j : la fonction d'activation de p_i et p_j ;

s_i et s_j : les valeurs d'activation de p_i et p_j ;

t_i : l'entrée professeur de p_i .

Les expressions précises des règles dépendent très étroitement de la nature des fonctions d'entrée totale, des fonctions d'activation et de la nature continue ou discrète des informations contenues dans les cellules de neurones.

Dans la règle de Hebb, il n'y a pas de professeur et les fonctions f_i sont linéaires ; le mécanisme d'adaptation se réduit à :

$$\Delta w_{ij} = \alpha s_i s_j \quad (3.6)$$

La règle de Widrow –Hoff, connue également sous le nom de delta-règle (Δ règle) nécessite un professeur et elle peut être écrite en présence de fonctions d'activation linéaires sous la forme :

$$\Delta w_{ij} = \alpha (t_i - s_i) s_j \quad (3.7)$$

le modèle compétitif de type kohonen met en œuvre l'expression :

$$\Delta w_{ij} = \alpha (t_i - w_{ij}) \quad (3.8)$$

Après la phase d'apprentissage toute la mémorisation des connaissances est enregistré dans le réseau. C'est la phase la plus longue en calcul connexioniste. Par contre, en phase de reconnaissance, si la forme à reconnaître a déjà été apprise, le réseau fournira instantanément la bonne sortie.

III.4.3 Les mécanismes de classification

La cellule de décision avec fonction de seuil se comporte comme un adaptateur linéaire qui réalise la séparation des exemples en deux classes C_1 et C_2 à l'aide de la fonction discriminante linéaire.

$$G(x) = w^T x \quad (3.9)$$

Où $w = (w_{1J}, w_{2J}, \dots \dots w_{nJ}, w_{0J})^T$, vecteur des poids synaptiques

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$$

Cette fonction permet la séparation de l'ensemble des vecteurs x en deux classes C_1 et C_2

$$\begin{cases} x \in C_1 & \text{si } g(x) \geq 0 \\ x \in C_2 & \text{si } g(x) < 0 \end{cases} \quad (3.10)$$

la figure III.6 montre l'interprétation géométrique du mécanisme de classification.

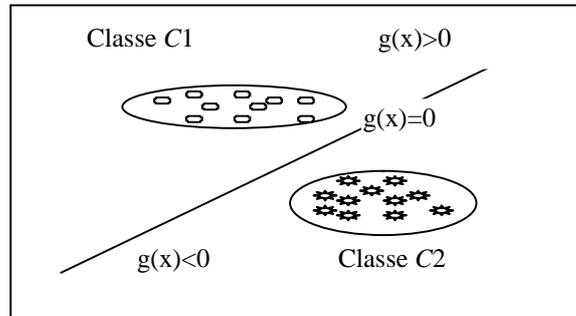


Figure III.6. Séparation de deux classes avec adaptateur linéaire.

III.4.4 Les mécanismes de mémorisation

Une caractéristique importante des réseaux de neurones réside dans la manière avec laquelle sont stockées les informations et dans la façon de les associer. En règle générale, la mémoire des réseaux de neurones est distribuée et tout ou une partie des poids de connexion du réseau, constitue la mémoire de ce dernier. Ainsi un cas pris dans la base des exemples d'apprentissage sera mémorisé par un sous-ensemble particulier des cellules lequel contient également la mémoire d'autres exemples de la base d'apprentissage. Par ailleurs, les réseaux de neurones utilisés en diagnostic industriel pour la classification des défauts sont appelés des mémoires associatives ou classifieurs. On distingue deux familles de réseaux de neurones appelés souvent neurones "grand-mère" et les réseaux de neurones à mémoires autoassociatives et à mémoires hétéroassociatives. Dans la première les neurones répondent spécifiquement à un seul exemple de la base d'apprentissage ; ces réseaux sont adaptés aux problèmes de classification.

Dans la deuxième catégorie, les informations ne sont pas localisées à des emplacements déterminés, mais la mémorisation de chaque exemple est distribuée sur l'ensemble de la structure du réseau qui constitue ainsi la mémoire. Les mémoires autoassociatives ont pour caractéristique essentielle de reproduire en sortie, l'image issue de l'entrée à partir d'un exemple incomplet ou bruité. Les mémoires hétéroassociatives assimilent la relation entre un exemple donné et une sortie désirée de l'exemple. Un nouvel exemple présenté proche de l'exemple appris, restituera la sortie désirée. Ces mémoires sont particulièrement performantes pour la reconnaissance de caractères des données incomplètes ou bruitées.

III.4.5 La structure des connexions

Il existe plusieurs types de réseaux de neurones, leurs architectures et leurs principes de fonctionnement diffèrent d'une application à une autre. Si on se réfère aux études biologiques du cerveau, on constate, d'une part, que le nombre de connexions est énorme et, d'autre part, que le réseau est divisé en différentes couches. A l'intérieur d'une même couche les interactions entre les neurones sont en relation étroite.

D'une manière générale l'architecture des réseaux de neurones formels peut aller d'une connectivité totale (tous les neurones sont reliés les uns aux autres) à une connectivité locale où les neurones ne sont reliés qu'à leurs plus proches voisins.

D'après l'étude bibliographique effectuée [70-71], [73-74], nous retenons qu'il existe deux types de réseaux de neurones : des réseaux à couches (non bouclés) et des réseaux entièrement connectés (bouclés ou récursifs).

III.4.5.1 Les réseaux bouclés

Dans les réseaux bouclés ou entièrement connectés, chaque cellule est reliée à toutes les autres avec un retour sur elle même ; ils sont particulièrement adaptés pour construire des réseaux de type de Hopfield et de Boltzman avec des procédures d'apprentissage sans professeur (non supervisé) [72], [75]. Pour les réseaux bouclés, le temps intervient et le comportement des cellules du réseau est exprimée, en général par, des équations différentielles non linéaires. Pour des conditions initiales données correspondant à une situation perfectible, le réseau évolue au cours du temps pour atteindre un état stable ou instable.

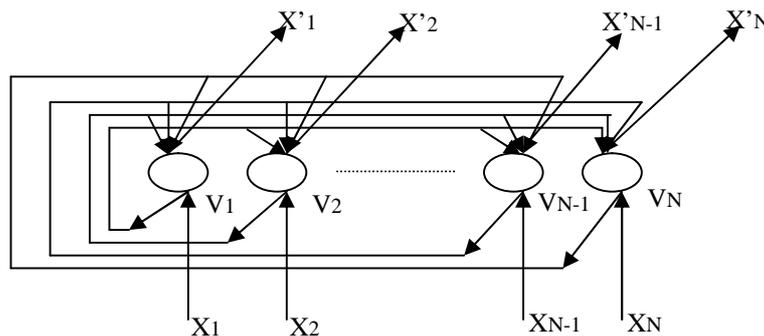


Figure III.7. Réseau de neurones entièrement connectés (réseau bouclé).

Le réseau original de Hopfield, qui a subi par la suite de nombreuses améliorations est constitué de processus élémentaires effectuant une somme pondérée de toutes les entrées et d'une fonction d'activation à seuil pour fournir une réponse égale à 0 ou à 1. Chaque cellule

élémentaire est connectée à toutes les autres de façon bidirectionnelle, sauf avec elle même (figure III.7).

En 1985, Ackely, Hinton, et Sejnowski ont développé un algorithme d'apprentissage pour le réseau de Hopfield qui permet la dynamique des états de ce réseau, afin d'éviter les minima locaux, en choisissant la position des minima, ou les formes à mémoriser. Ce type de réseau se retrouve sur la machine de Boltzman, dont les neurones ont des caractéristiques probabilistes [70].

III.4.5.2 Les réseaux non bouclés (réseaux à couches)

Le réseau non bouclé (figure III.8) est constitué de couches, telles que les deux couches extrêmes correspondent, d'une part, à la couche qui reçoit ses entrées du milieu extérieur et, d'autre part à la couche qui fournit le résultat du traitement effectué (couche de sortie) ; les couches intermédiaires sont appelées les couches cachées, leur nombre est variable. Les neurones qui appartiennent à une même couche ne sont pas connectés entre eux, chacune des couches reçoit des signaux de la couche précédente et transmet le résultat de ses traitements à la couche suivante.

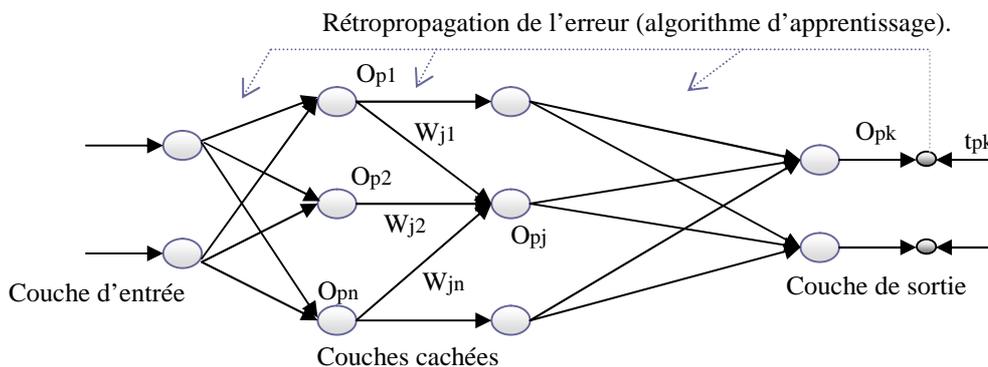


Figure III.8. Réseau de neurones multicouche (non bouclés).

Le premier réseau utilisé est le perceptron monocouche, son mode d'apprentissage été de type supervisé [73], par correction d'erreur. Pour une forme appartenant à une classe présentée à l'entrée de la première couche, on doit avoir une sortie fixée (1ou -1). Pendant la phase d'initialisation les coefficients synaptiques w_{oi} sont initialisées d'une manière aléatoire, puis les fonctions d'association sélectionnées. Pendant la phase d'apprentissage, la base des données des exemples d'entrée et des sorties associées, est utilisée pour adapter progressivement les poids w_{ij} en comparant la sortie o_i à l'état désiré t_j par :

$$\Delta_p w_{ji} = \eta(t_{pj} - o_{pj})o_{pi} = \eta\delta_{pj}o_{pi} \quad (3.11)$$

où η est une constante d'adaptation. On répète cette procédure itérative jusqu'à ce que l'erreur résiduelle soit la plus faible possible. Par ailleurs, la limite de la capacité d'un perceptron multicouches, réside dans la lecture des poids synaptiques entre la couche cachée et la couche de sortie [74],[76]. Comme solution, Rumelhart et al ont proposé un algorithme d'apprentissage avec professeur appelé algorithme de rétropropagation pour application sur les réseaux multicouches [70-74]. En 1970 Werbos a développé cet algorithme [72], dont la première application a été consacrée à l'estimation d'un modèle dynamique pour prédire la communication sociale. En fait, la rétropropagation est une généralisation de l'algorithme de la moyenne des moindres carrés [75], car dans cet algorithme une fonction d'erreur est définie comme étant égale la moyenne quadratique carrée de la différence entre la sortie désirée et la sortie actuelle d'un réseau à couches. Pour minimiser cette fonction d'erreur, l'algorithme de rétropropagation utilise la technique de la recherche du gradient, appelée la règle delta généralisée [70-74].

Dans ces réseaux à couches, les unités d'entrée représentent la couche inférieure et les unités de sortie représentent la couche supérieure. Entre ces deux couches, il peut y avoir plusieurs neurones ou couches cachées ; cependant chaque neurone doit transmettre sa sortie aux neurones de la couche supérieure et ses entrées doivent recevoir des informations des neurones de la couche inférieure. Pour un vecteur d'entrée donné, on associe un vecteur de sortie t_p . Si les poids synaptiques ont des valeurs aléatoires, le vecteur de sortie o_p est différent de t_p . Dans ce cas on associe à l'écart entre les valeurs de t_p et o_p [72], [75] calculée comme suit :

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_j (t_{pj} - o_{pj})^2 \quad (3.12)$$

Ensuite on définit la somme des erreurs de sortie de la couche prévue par :

$$S_{pj} = \sum_i w_{ji} o_{pi} + b_j \quad (3.13)$$

En utilisant la fonction sigmoïde, son état sera :

$$o_{pj} = f_j(S_{pj}) \quad (3.14)$$

Pour trouver la généralisation correcte de la règle delta, w_{ji} est mis sous la forme

$$\Delta_p w_{ji} \text{ en fonction de } -\frac{\partial E_p}{\partial w_{ji}} \quad (3.15)$$

Il est à remarquer la dérivée, précédente se présente comme la résultante d'un produit de deux termes : un terme reflétant la variation de l'erreur (comme une fonction de variation d'entrée du neurone à l'entrée du réseau) et un terme représentant l'effet de la variation d'un poids. De ce qui précède nous tirons la relation :

$$\frac{\partial E_{pj}}{\partial w_{ji}} = \frac{\partial E_p}{\partial S_{pj}} \frac{\partial S_{pj}}{\partial w_{ji}} \quad (3.16)$$

En remplaçant S_{pj} par son équivalent (éq 3.13) on peut écrire :

$$\frac{\partial S_{pj}}{\partial w_{ji}} = \frac{\partial}{\partial w_{ji}} \sum_k w_{jk} o_{pk} = o_{pi} \quad (3.17)$$

Posons :

$$\delta_{pj} = -\frac{\partial E_p}{\partial S_{pj}} \quad (3.18)$$

L'équation (3.16) prend ainsi la forme équivalente :

$$-\frac{\partial E_p}{\partial w_{ji}} = \delta_{pj} o_{pi} \quad (3.19)$$

Pour appliquer la diminution du gradient dans E_p , nous devons prendre en considération la variation des poids laquelle est définie par :

$$\Delta_p w_{ji} = \eta \delta_{pj} o_{pi} \quad (3.20)$$

Comme pour la règle delta standard, un résultat intéressant est le calcul simple récursif des coefficients δ qui peuvent être mis en œuvre par la propagation d'un signal d'erreur en aval à travers le réseau.

Pour résoudre l'équation (3.18), on peut décomposer la dérivée en deux facteurs :

$$\delta_{pj} = -\frac{\partial E_p}{\partial S_{pj}} = \frac{\partial E_p}{\partial o_{pj}} \frac{\partial o_{pj}}{\partial S_{pj}} \quad (3.21)$$

De (3.14) on constate que :

$$\frac{\partial o_{pj}}{\partial S_{pj}} = f'_j(S_{pj}) \quad (3.22)$$

Pour calculer le premier facteur, deux possibilités existent :

- la première suppose que le neurone u_j est une unité d'entrée ou un neurone d'entrée du réseau.
- En ce qui concerne la seconde possibilité, en partant de la définition de E_p , on peut écrire :

$$\frac{\partial E_p}{\partial o_{pj}} = -(t_{pj} - o_{pj}) \quad (3.23)$$

Par ailleurs, en remplaçant ces facteurs dans (3.21), on trouve pour chaque neurone u_j :

$$\delta_{pj} = (t_{pj} - o_{pj}) f'_j(S_{pj}) \quad (3.24)$$

Si u_i n'est pas une unité de sortie, la règle d'ajustement des poids est utilisée pour écrire :

$$\sum_k \frac{\partial E_p}{\partial S_{pk}} \frac{\partial S_{pk}}{\partial o_{pj}} = \sum_k \frac{\partial E_p}{\partial S_{pk}} \frac{\partial}{\partial o_{pj}} \sum_i w_{ki} o_{pi} = \sum_k \frac{\partial E_p}{\partial S_{pk}} w_{kj} = - \sum_k \delta_{pk} w_{kj} \quad (3.25)$$

Dans ce cas, en substituant les deux facteurs dans l'équation (3.21), on obtient :

$$\delta_{pj} = f'_j(S_{pj}) \sum_k \delta_{pk} w_{kj} \quad (3.26)$$

Toutefois, si u_i n'est pas une unité d'entrée. les équations (3.24) et (3.26) donnent une procédure récursive pour calculer les coefficients δ pour tous les neurones dans le réseau, lesquels sont donc utilisés pour calculer les variations des poids dans le réseau selon (3.20). Cette procédure constitue la règle delta généralisée d'un réseau non bouclé.

III.4.5.3 L'algorithme de rétropropagation

L'algorithme d'apprentissage de rétropropagation [70] est un algorithme de gradient itératif désigné pour minimiser l'erreur quadratique moyenne entre la sortie actuelle du réseau en amont et la sortie désirée. La figure (III.9) illustre l'organigramme de l'algorithme d'apprentissage de rétropropagation. On suppose que la fonction sigmoïde est utilisée de la manière suivante :

Etape 1 initialisation des poids et des seuils :

Attribuer de faibles valeurs aux poids et aux seuils ;

Etape 2 présentation des entrées et des sorties :

Présenter un vecteur d'entrée en valeur continue et spécifier les sorties désirées. Si le réseau est utilisé comme un classifieur, alors toutes les sorties sont mises à zéro sauf celle correspondant à la classe d'entrée dont la sortie désirée est 1. L'entrée pourrait être nouvelle pour chaque essai ou des échantillons d'un apprentissage peuvent être présentés cycliquement jusqu'à la stabilisation des poids.

Etape 3 calcul des sorties actuelles :

On utilise la fonction sigmoïde non linéaire, la forme du réseau est celle représentée dans la figure (III.8).

Etape 4 Adaptation des poids :

On utilise l'algorithme récursif sur les unités de sortie, on effectue un retour sur la première couche cachée et on ajuste les poids comme suit :

$$w_{ji}(t+1) = w_{ji}(t) + \Delta w_{ji}(t) \quad (3.27)$$

Où $\Delta_p w_{ji} = \eta \delta_{pj} o_{pi}$

Dans cette équation $w_{ji}(t)$ est le poids, η est le terme de gain appelé coefficient d'apprentissage, et δ_{pj} un terme d'erreur pour le neurone j .

Si l'indice j correspond à une unité de sortie, alors δ_{pj} peut être calculée par (3.24) :

$$\delta_{pj} = (t_{pj} - o_{pj})f'_j(S_{pj})$$

Si l'unité j est une unité d'une couche cachée interne, alors δ_{pj} peut être calculée par :

$$\delta_{pj} = f'_j(S_{pj}) \sum_k \delta_{pk} w_{kj}$$

Les biaies sont adaptées d'une manière similaire, ce sont des poids de connexion sur les entrées auxiliaires des neurones qui ont des valeurs constantes. La convergence est quelquefois rapide quand un terme de momentum est ajouté et les variations des poids sont lissés [71-72].

$$b_{pj}(t+1) = b_{pj}(t) + \eta \sum \delta_{pj} o_{pi} \quad (3.28)$$

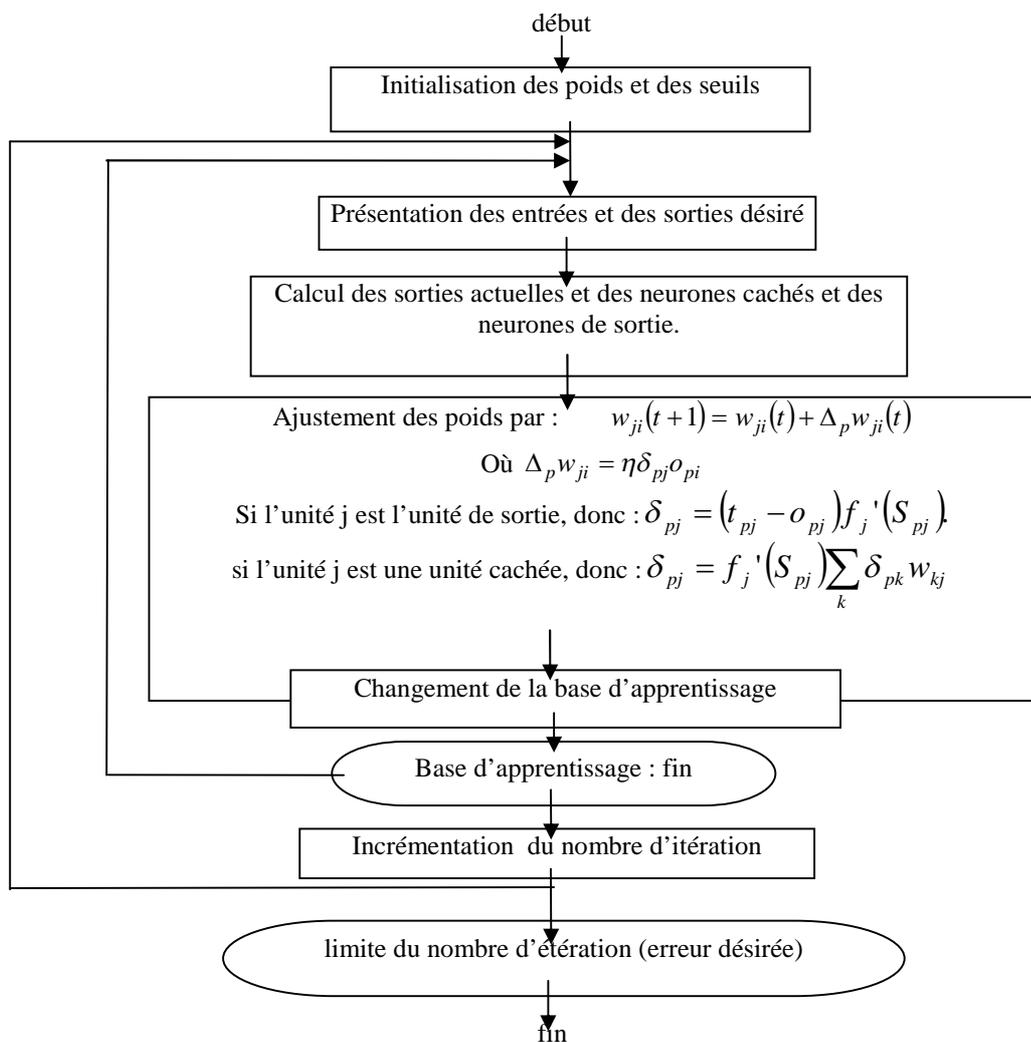


Figure 3.9. Algorithme d'apprentissage par rétropropagation.

III.5 Les applications des réseaux de neurones

L'intérêt porté aujourd'hui aux réseaux de neurones tient sa justification dans les quelques propriétés intéressantes qu'ils possèdent et qui devraient permettre de dépasser les limites de l'informatique traditionnelle. Pour cette raison les réseaux de neurones artificiels ont trouvé plusieurs applications et dans plusieurs domaines, parmi lesquels nous pouvons citer :

➤ **L'application à la reconnaissance des formes :**

L'application des réseaux de neurones pour la reconnaissance des formes a été largement étudiée ; les réseaux bouclés ou non bouclés sont intensivement étudiés et appliqués pour la reconnaissance des voies et des images [70-72].

➤ **L'application au traitement du signal :**

Dans ce domaine, les applications réalisées traitent essentiellement de la reconnaissance de signatures radar ou sonar [70].

La société NESTOR a développé un réseau de neurones qui identifie une cible à coup sûr (100% de réussite) et reconnaît un bruit avec un taux de réussite de 95%. Cette application a été construite à partir de signaux "sonar" et des traits caractéristiques de ces derniers sont déterminés par les experts comme étant utiles pour identifier une cible dans un environnement bruité. Le réseau agit dans ce cas comme un filtre pour éliminer le bruit.

➤ **L'application au diagnostic :**

Les réseaux de neurones sont bien adaptés à la résolution des problèmes de diagnostic, grâce à l'utilisation de la classification automatique des signaux et des formes [71].

III.6 Application des réseaux de neurones pour le diagnostic des défaillances des machines tournantes

L'application des réseaux de neurones pour résoudre un problème (dans le cas présent le diagnostic des défaillances des machines tournantes), nécessite l'emploi d'une méthodologie dont la mise en application peut être décomposée en deux étapes :

- la première consiste en l'étude du problème à résoudre pour valider son adaptabilité à une résolution par les réseaux de neurones et définir les objectifs à atteindre pour pouvoir contrôler la qualité de la solution retenue.
- La seconde est axée sur la technique des réseaux de neurones ; elle englobe le choix du type de réseau et celui de son implémentation (le type d'apprentissage et le nombre des couches cachées dans le cas de l'utilisation des réseaux non bouclés) en fonction des caractéristiques du problème étudié et des objectifs fixés.

III.6.1 Analyse de la problématique et Choix du type de RNA

D'une part, les perceptrons multicouches ont montré leur efficacité pour la classification des formes, et d'autre part, dans notre cas d'application, le système de détection est basé sur la classification des signaux. Par conséquent, l'utilisation d'un réseau de neurones à couches est préférable pour essayer de résoudre le problème posé [70-71].

Par ailleurs, le réseau que nous allons simuler est un réseau à trois couches et les étapes de construction du réseau peuvent être subdivisées de la manière suivante :

Choix des entrées du réseau, c'est à dire choix du pas d'échantillonnage pour le signal qui va être traité et détermination du nombre d'entrées du réseau (nombre de neurones de la couche cachée); Choix des sorties, c'est à dire détermination du nombre de sorties et leur nature ; pour faciliter l'interprétation des résultats de la sortie du réseau par le système expert, notre choix a été orienté sur les nombres binaires (0,1); Comme les sorties sont binaires et les entrées réelles, la fonction de sortie sera une fonction linéaire affine et la fonction d'activation une fonction sigmoïde;

Détermination du nombre de neurones cachés et du nombre des couches cachées: ils seront déterminés par tâtonnement à partir d'un algorithme d'apprentissage.

III.6.2 Choix du type d'algorithme d'apprentissage

Concernant l'apprentissage, le RNA est entraîné par le modèle de rétropropagation, pour les raisons suivantes [71] :

Le système d'apprentissage est supervisé ;

Les entrées sont continues ;

Il a été utilisé avec succès dans plusieurs domaines d'applications [75-81].

III.7 Conclusion

Pour l'implémentation d'un réseau de neurones pour une application donnée, il faut tout d'abord étudier le problème posé afin de valider son adaptabilité à une résolution par des réseaux de neurones et précisant les objectifs à atteindre. Par la suite, il faut analyser la technique des réseaux de neurones (qui englobe le choix du type de réseau et celui de son implémentation en fonction des caractéristiques du problème étudié). A cet effet, le présent chapitre a été consacré à la présentation de la théorie des réseaux de neurones, en partant du neurone biologique, jusqu'à l'étude des différents types de réseaux, parmi lesquels on a présenté deux types : les réseaux bouclés et les réseaux non bouclés.

A la lumière de l'étude effectuée, il a été constaté que les réseaux non bouclés correspondent bien à notre cas d'application. En effet, les réseaux de neurones multicouches entraînés par l'algorithme de rétropropagation du gradient sont aujourd'hui les modèles les plus utilisés en diagnostic en raison de leur capacité à résoudre les problèmes de classification.

Le chapitre cinquième sera consacré à l'application de la méthode des réseaux de neurones pour le diagnostic des défauts d'un réducteur DMGH 25.4 d'un broyeur ciment horizontal de l'Algérienne Company Ciment (A C C).

Chapitre IV Caractérisation de l'usure de roulements d'un réducteur DMGH 25.4 du broyeur ciment horizontal.

Le roulement est un organe qui assure à lui seul plusieurs fonctions principales : il permet le positionnement d'un arbre par rapport à son logement tout en assurant une rotation précise avec le minimum de frottement, il transmet des radiaux et/ou axiaux. Dans ce contexte, les roulements sont fréquemment les organes parmi les plus sensibles de la chaîne cinématique et peuvent être soumis à un grand nombre d'avaries (usure, fatigue de contact...etc.) apparaissant lors du fonctionnement et dont les causes sont multiples.

Au cours de ce chapitre, nous présenterons dans la première partie le processus de fabrication du ciment. En suite, nous décrivons le broyeur DMGH 25.4 d'une cimenterie, ses constituants et leurs dimensionnements. Les résultats expérimentaux pour la caractérisation de l'usure des roulements seront présentés et discutés dans la seconde partie.

IV.1 Principe de fabrication du ciment

La fabrication du ciment se réduit aux trois opérations suivantes :

- Préparation du cru
- Cuisson
- Broyage et conditionnement.

Le composé de base des ciments est un mélange de silicates et d'aluminates de calcium résultants de la combinaison de la chaux (CaO) avec la silice (SiO_2), l'alumine (Al_2O_3), et l'oxyde de fer (Fe_2O_3). La chaux nécessaire est apportée par des roches calcaires, l'alumine, la silice et l'oxyde de fer par des argiles.

Le principe de fabrication du ciment est le suivant (Figure IV.1) : calcaires et argiles sont extraits des carrières seront concassés, puis mélangés en teneur limitée (75-80%) avec le sable, fer et le gypse (20-25%) ensuite le mélange passe dans un broyeur cru, et ensuite cuit dans un four rotatif à environ 1450°C , le produit résultant est appelé le clinker. Le clinker est broyé dans un second broyeur à ciment avec l'addition de (3-4%) des gypses, le produit de broyage est le ciment.

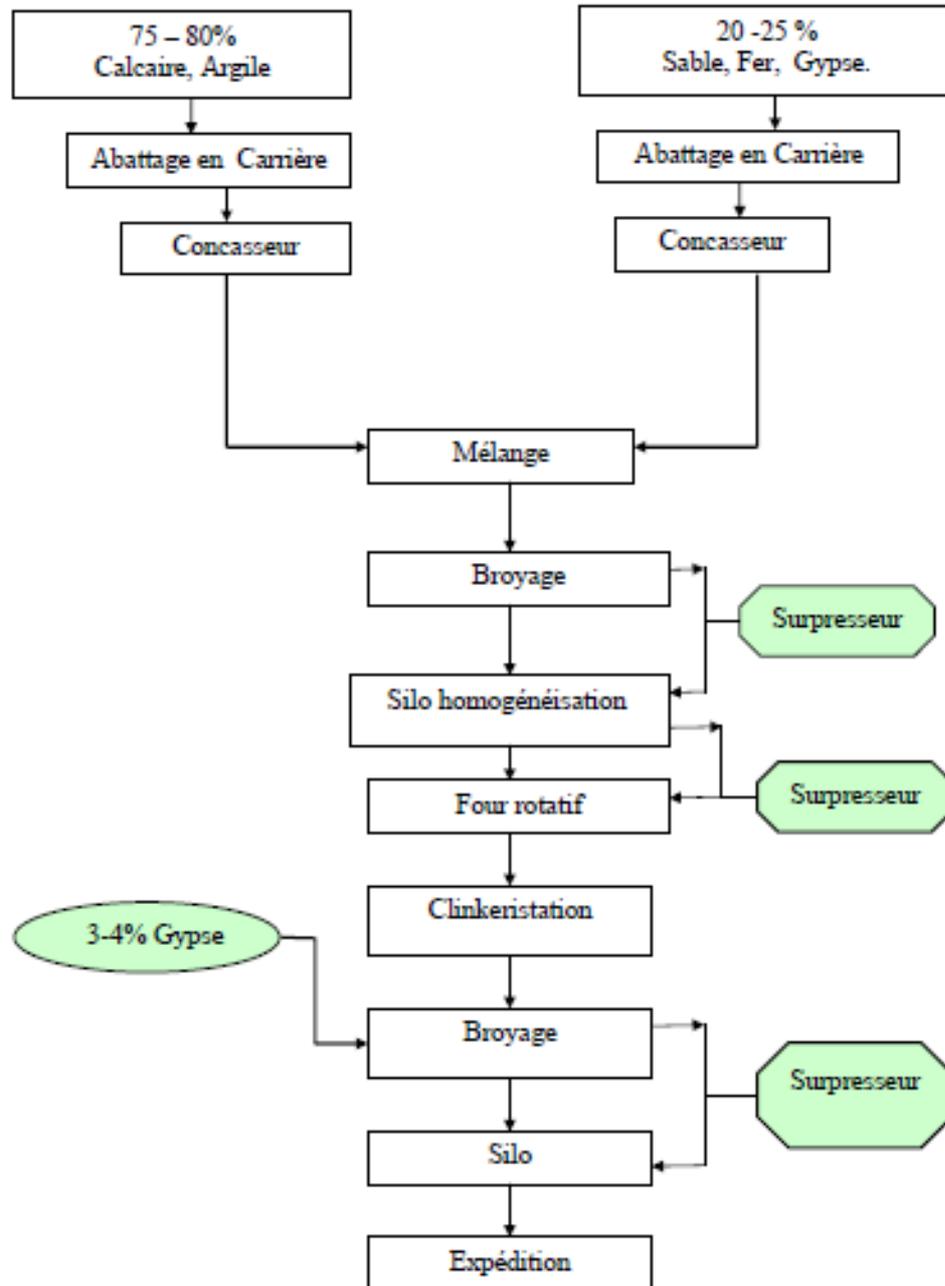


Figure IV.1. Etapes de production du ciment.

IV.2 Constituants principaux du ciment et additions

IV.2.1 Constituants principaux

Les principaux composants anhydres obtenus lors du refroidissement rapide du clinker sont :

- Le silicate tricalcique $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_3S) (50-70% du clinker),
- Le silicate bicalcique $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_2S) (10-30% du clinker),
- L'aluminat tricalcique $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A) (2-15% du clinker),
- L'alimino- ferrite tétra-calcique (Ferro-aluminate tetracalcique)



Le clinker contient encore en faibles quantités, sous forme de solution solide ou pris dans des combinaisons complexes, des alcalis (Na_2O , K_2O), de la magnésie (MgO), diverses traces de métaux. La teneur en alcalis et magnésie doit rester faible, car ces matières peuvent influencer défavorablement la stabilité du ciment durci.

A l'aide du microscope, on distingue trois phases de la structure minéralogique du clinker :

- Alite (phase cristallisée), se présente sous la forme de cristaux polygonaux assez grands (grains anguleux foncés) de l'ordre de 50μ .
- Bélite (phase vitreuse), se trouve sous forme impure dans le clinker (grains légèrement arrondis et rayés).
- Céélite (phase vitreuse légèrement foncée et claire), se trouve dans le clinker sous forme impure et de phase vitreuse.

IV.2.2 Les additions du ciment

Le ciment portland est composé de clinker moulu auquel on ajoute une quantité de gypse, destiné à régulariser la prise. Pour modifier les propriétés du ciment, on ajoute les autres constituants associés au clinker grâce à leurs caractéristiques chimiques ou physiques.

Les constituants les plus utilisés sont :

-Laitier granulé de haut fourneau : le laitier est un sous-produit de l'industrie métallurgique ayant des propriétés hydrauliques. Il est obtenu par refroidissement rapide (trempe) de certaines scories fondues provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau.

- Cendres volantes (V ou W) : elles sont les produits de grande finesse, provenant du dépoussiérage des gaz de combustion des centrales thermiques. On distingue :

- les cendres volantes siliceuses (V) qui ont des propriétés pouzzolaniques ;
- les cendres volantes calciques (W) qui ont des propriétés hydrauliques et parfois pouzzolaniques.

-Schistes calcinés : ce sont des schistes que l'on porte à une température d'environ 800°C dans un four, finement broyés, ils présentent de fortes propriétés hydrauliques et aussi pouzzolaniques.

-Fumée de silice : les fumées de silice sont un sous-produit de l'industrie du silicium et ses alliages. Elles sont formées de particules sphériques de très faible diamètre (de l'ordre de $0,1\mu\text{m}$). Ils ont des propriétés pouzzolaniques.

-Fillers : ce sont des constituants secondaires des ciments, ils ne peuvent jamais excéder 5% en masse dans la composition du ciment. Ce sont des matières minérales naturelles ou artificielles qui agissent par leur granulométrie sur les propriétés physiques des liants (maniabilité, pouvoir de rétention d'eau).

IV.3 Broyeur ciment

IV.3.1 Description du broyeur ciment

Le broyeur de ciment flender DMGH est un broyeur horizontal à boulets, à entraînement latérale par couronne figure IV.2. Il reçoit le clinker, le gypse et éventuellement des matériaux additionnels, le chargement s'effectue par une chaîne à godets à l'entrée de la machine. Ce mélange est en général pré broyé, avec les matériaux captés et refoulés par le séparateur, au moyen de boulets d'acier placés à l'intérieur du broyeur en rotation, puis le tout est pris en charge par une vis sans fin, un élévateur ou un autre dispositif de transport, pour être traité en aval.

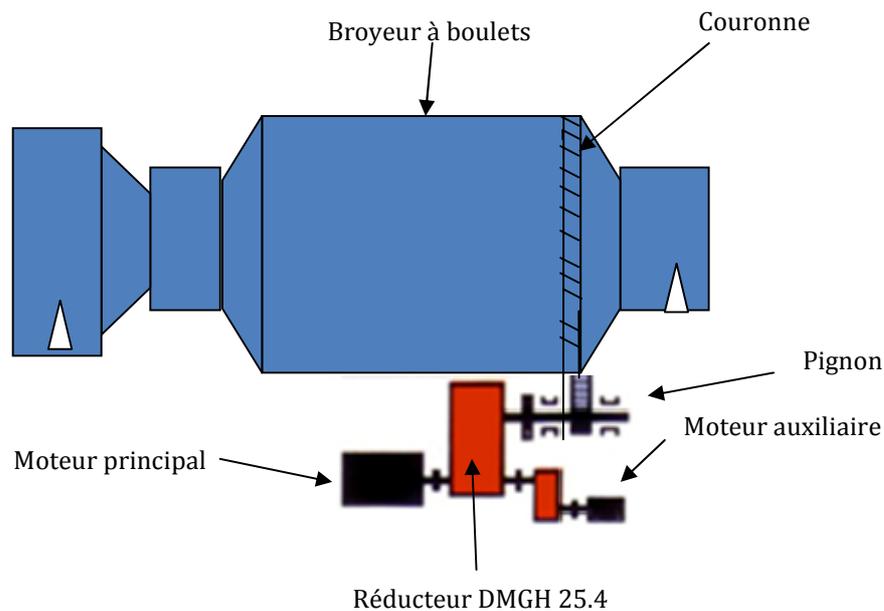


Figure IV.2.a. Diagramme du broyeur ciment à boulet.



Figure IV.2.b. Image du broyeur ciment DMGH 25.4.

Il se compose de :

- d'un moteur principal ;
- d'un vireur ;
- d'un broyeur horizontal DMGH ;
- d'un réducteur DMGH 25.4.

IV.3.1.1 Moteur principal

C'est un moteur triphasé TAG type CSLRH800X6-234 (figure IV.3) dont les caractéristiques :



Figure IV.3. Image du moteur principal.

$P = 4956 \text{ KW}$; $n = 995 \text{ t/min}$; $\cos \varphi = 0,89$; fréquence = 50 Hz ; Altitude < 1000 m

Température annuelle max = 45°C ; masse = 27900 Kg.

IV.3.1.2 Broyeur DMGH

Le broyeur DMGH (figure IV.4) est un broyeur horizontal à boulets, à attaque par couronne et à entraînement latéral. Il se compose principalement des éléments suivant [82] :

- **Dispositif d'entrée** : l'entrée sert à charger dans le broyeur les matériaux (clinker, gypse, matériaux additionnels et refus du séparateur) et d'y introduire l'air de ventilation. La goulotte de chargement des matériaux comporte un blindage intérieur fait des plaques d'usure.
- **Corps du broyeur, revêtement intérieurs et cloison de séparation** : le corps du broyeur est cylindrique horizontal composé de viroles soudées les unes aux autres et de deux bagues de glissement soudées à chaque extrémité. Les bagues, qui ont un profil en T, reposent sur les paliers à sabots de glissement. Il comporte deux compartiments de broyage séparés par une cloison intermédiaire (figure IV.5). La matière est transférée du 1^{er} vers le 2^{ème} compartiment par un système d'écofes internes à la cloison et un cône de transfert vers le compartiment suivant. La matière traverse les deux compartiments, puis est évacuée mécaniquement par la sortie du broyeur. Le 1^{er} compartiment contient des corps broyants de grand diamètre et des blindages releveurs (figure IV.6) servant à fragmenter grossièrement la matière. Le 2^{ème} compartiment destiné au broyage fin contient des corps broyants de plus petit diamètre et des blindages classants (figure IV.6). La cloison de sortie permet de retenir la charge broyante dans le dernier compartiment du broyeur et de laisser sortir la matière.

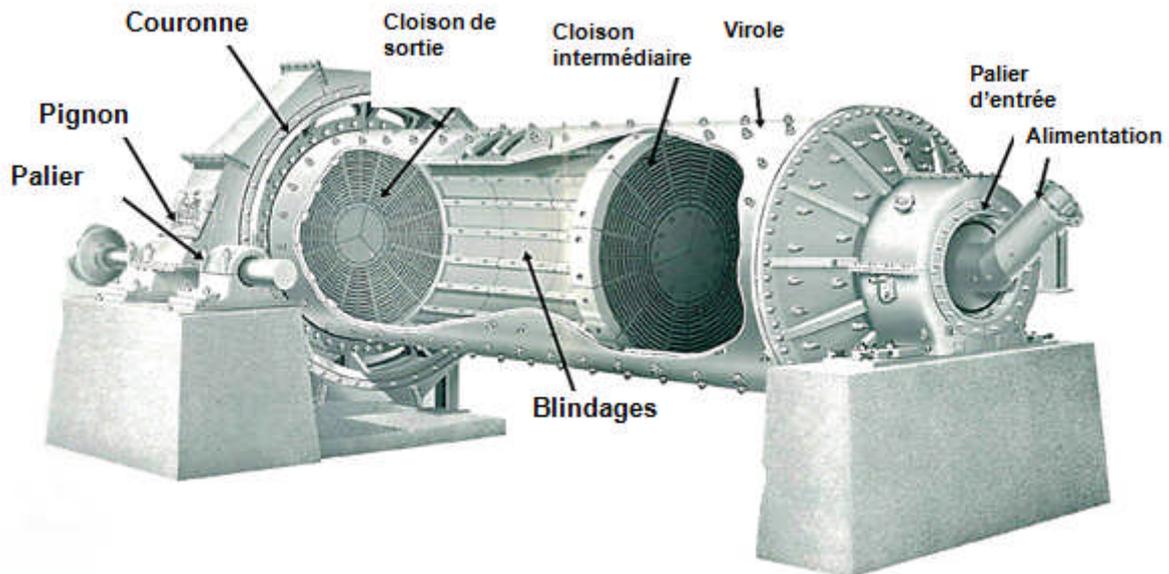


Figure IV.4. Principaux constituants du broyeur DMGH.

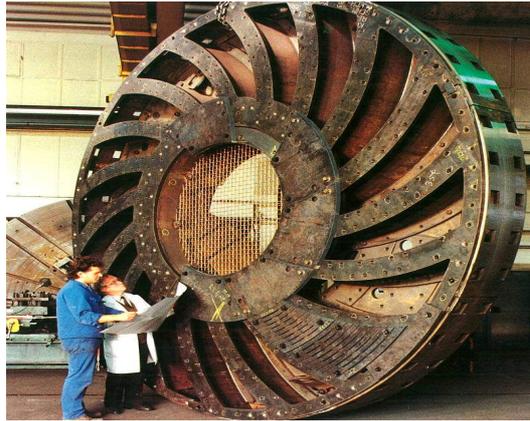


Figure IV.5. Cloison intermédiaire.



Blindage releveur



Blindage classant

Figure IV.6. Types de blindages.

- **Paliers à sabots de glissement** : les paliers sont montés sur des socles en béton. Les sabots au nombre de deux par palier, présente une inclinaison de 30° par rapport à l'axe vertical du broyeur. Trois des sabots sont montés sur des rouleaux qui reposent sur les plaques d'assises. Cette disposition permet d'absorber les variations de longueur causées par les oscillations thermiques. Le dernier sabot, qui placé près de la station d'attaque, est fixe et maintient le broyeur en position axiale par rapport au point d'attaque. Chaque palier est lubrifié par une station de graissage individuelle.
- **Station d'attaque** : le broyeur est entraîné par un moteur à rotor bobiné (principale) qui commande, au moyen d'un réducteur Flender DMGH, une couronne dentée fixée au corps de la machine. Pour pouvoir amener le broyeur sur une position voulue, le réducteur est relié à un vireur équipé d'un moteur (moteur auxiliaire) et d'un frein capable de bloquer la machine sur n'importe quelle position.

IV.3.1.3 Réducteur DMGH 25.4

La figure IV.7 présente le réducteur Flender DMGH 25.4, qu'est entraîné par un moteur principal par l'intermédiaire d'un accouplement RUPLEX élastique RLS 800. Pour pouvoir amener le broyeur sur une position voulue, le réducteur sera relié à un vireur équipé d'un

moteur (moteur auxiliaire) et d'un frein capable de bloquer le broyeur sur n'importe quelle position. Les caractéristiques cinématiques du réducteur sont [82]:

La vitesse de l'arbre à grand vitesse est de 16,57 HZ ; la vitesse de l'arbre intermédiaire est 7,27 HZ, la vitesse de l'arbre de sortie est de 2,05 HZ. La vitesse G9H broyeur est 0,256 Hz.

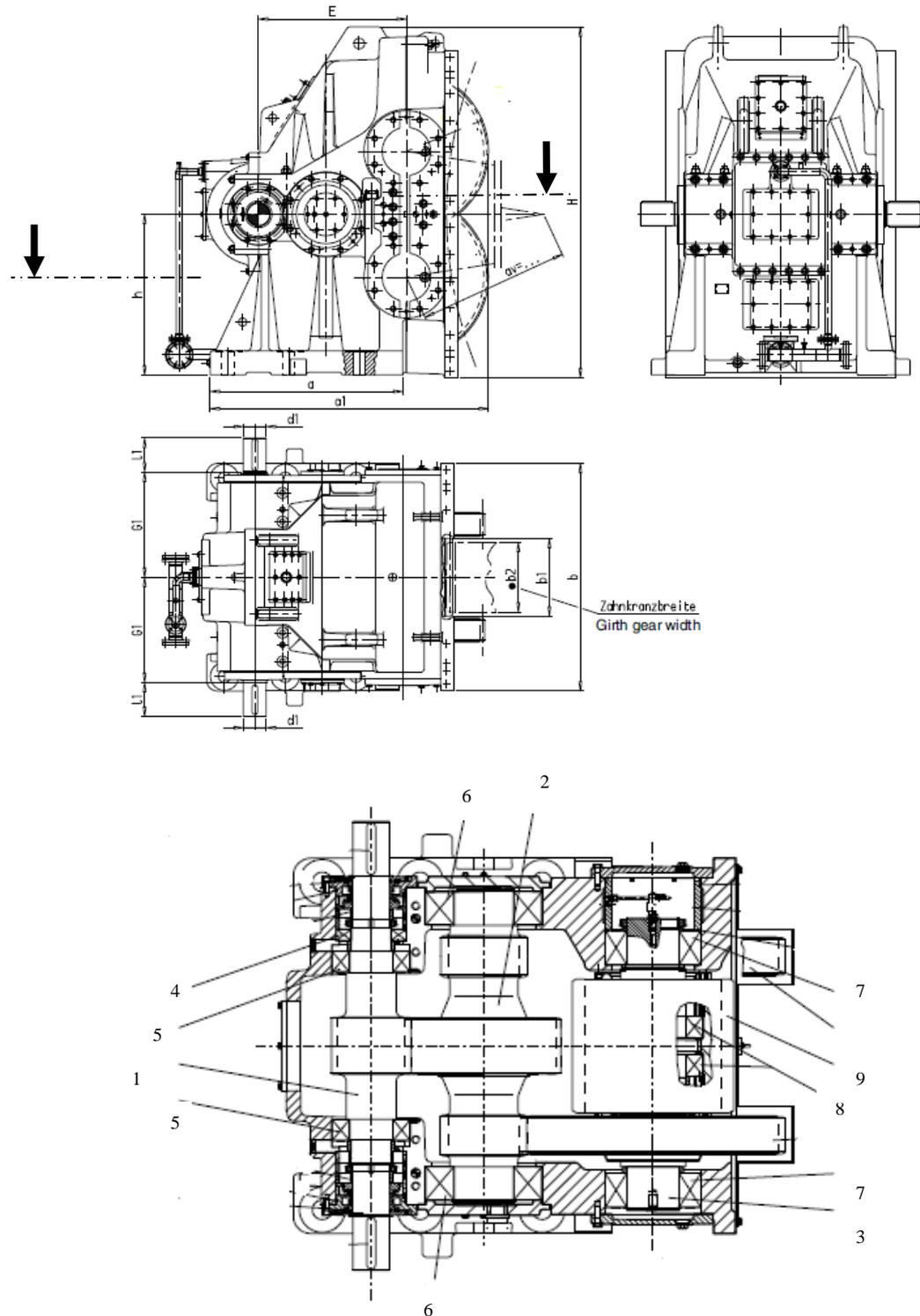


Figure IV.7. Réducteur flender DMGH 25.4.

- 1 - arbre d'entrée à grande vitesse GV ; 2 - arbre intermédiaire ; 3 - arbre de sortie ;
4 - roulement SKF QJ1244N2MA ; 5 - roulement SKF 22248 CC / N1W33C3 ;
6 - roulement TOR F3164-MCAB ; 7 - roulement 23264CAC / W33 ;
8 - roulement TOR F3164-MCAB ; 9 - Pignon d'attaque.





Figure IV.8. Image du réducteur flender DMGH 25.4 et éléments constitutants.

Les données techniques du réducteur sont (Tableau IV.1) :

Marque	Type	Module (mm)	Puissance (KW)
Flender	DMGH 25.4	25.4	4551
Vitesse (T/min)	Poids (Kg)	Rapport de dents arbre d'entrée / intermédiaire	Rapport de dents arbre intermédiaire / sortie
990 / 122.30	35000	25 / 57	20 / 71
Rapport de dents pignon d'attaque / couronne	Roulement du palier de l'arbre à grande Vitesse GV	Roulement du palier de l'arbre de sortie	Roulement du palier de l'arbre intermédiaire
31 / 248	2×22248 CC / N1W33C3 QJ1244N2MA	2×23264CAC / W33 2×TOR F3164-MCAB	2×TOR F3164-G

Tableau IV.1 : Données techniques du réducteur DMGH 25.4.

IV.3.2 Fonctionnement

Le broyeur tourne avec sa charge de boulets à une vitesse d'environ 77 à 78% la vitesse critique, qui est celle à laquelle les boulets commencent à rouler sur toute la circonférence du cylindre. De cette manière, les matériaux (c'est-à-dire le clinker, le gypse, et les éventuels matériaux additionnels chargés dans le broyeur) sont concassés et pré broyés entre les boulets et entre le revêtement et les boulets. Dans le compartiment de broyage grossier, la granulométrie des matériaux passe de 25 mm en moyenne à une taille qui (immédiatement avant leur arrivée sur la cloison de séparation) rend possible leur broyage par les boulets bien plus petits qui se trouvent dans le compartiment de broyage fin. Dans le broyeur à passage direct, le broyage des matériaux est terminé quand ceux-ci sortent par la grille de sortie. Dans les broyeurs à passage indirect, le matériau passe d'abord de la machine à un séparateur où les particules de produit fini sont séparées des particules grossières constituant ce que l'on appelle le gros, qui est renvoyé vers l'entrée du broyeur. Le broyeur ciment à une capacité de 140 t/h.

IV.4 Compagnies d'essais et discussion

IV.4.1 Description de roulements

IV.4.1.1 Roulement SKF QJ1244 N2MA

C'est un roulement à billes permet de remplacer le frottement de glissement par du frottement de roulement (figure IV.9). Néanmoins, les divers corps en contact (bague intérieure et billes par exemple) présentent des différences de vitesses dans leurs zones de contact qui vont générer du glissement local. En effet, ce frottement est généré par la surface la plus rapide qui va avoir tendance à « tirer » la surface lente [83].



Figure IV.9. Image roulement SKF QJ 1244 N2MA.

Il est donc intéressant de réduire ce frottement en intercalant un fluide dans le contact par le biais de la lubrification. Cette lubrification va se présenter sous deux régimes. Un premier régime dit hydrodynamique (HD) qui se caractérise par de faibles pressions de contact et n'entraînant aucune déformation au niveau des surfaces en contact. Ce régime de lubrification est donc caractéristique des contacts bagues/cage et corps roulants/cage. Le régime dit élastohydrodynamique (EHD), représentatif du contact entre les corps roulants et les bagues, engendre des déformations élastiques dans le contact. La Figure IV.10 présente le contact en régime EHD et la Figure IV.11 les caractéristiques de ce contact [22-23].

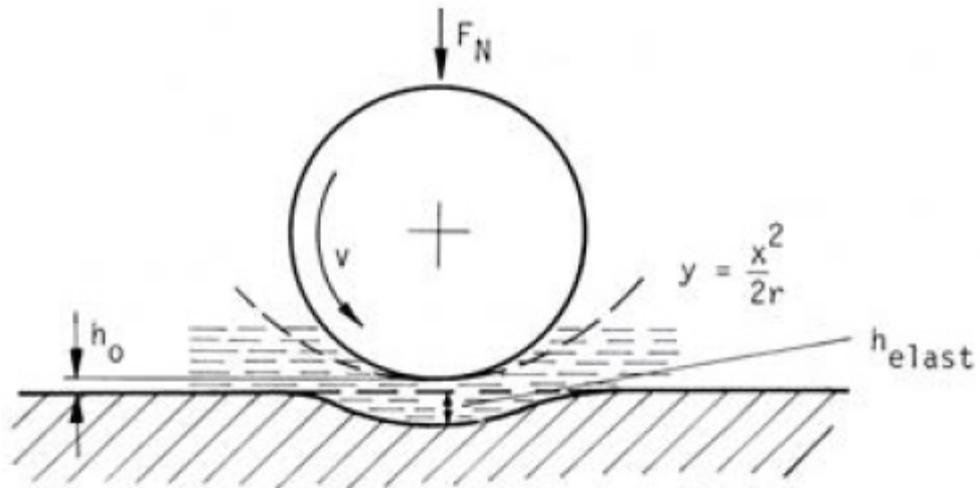


Figure IV.10. Contact bille / bague en régime élastohydrodynamique (EHD).

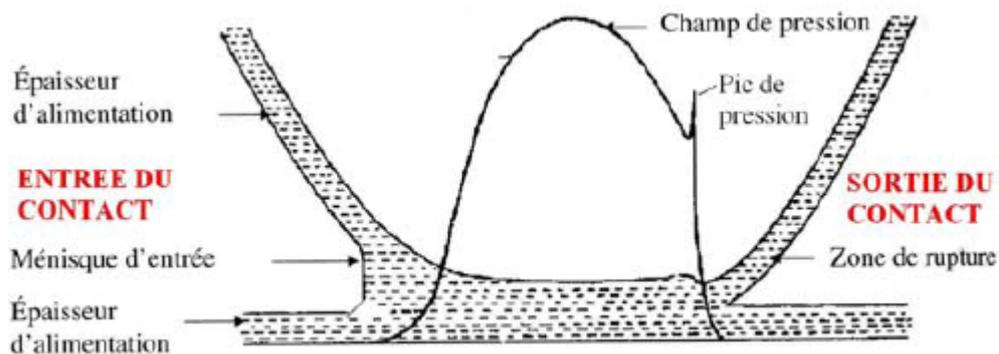


Figure IV.11. Le contact élastohydrodynamique : Champ de pression et épaisseur de film d'huile.

Nous distinguons ainsi trois zones pour décrire un contact élastohydrodynamique. Une zone d'entrée, une zone de haute pression et une zone de sortie du contact.

- Zone d'entrée dans le contact : il s'agit d'une zone de lubrification hydrodynamique entraînant une augmentation de la pression de contact due à la présence d'un convergent formé par les éléments en contact.
- Zone de haute pression : il s'agit ici de la zone élastohydrodynamique caractérisée par la présence d'une forte pression qui provoque temporairement le passage à l'état vitreux du lubrifiant, et la déformation élastique des surfaces en contact.
- Zone de sortie : le lubrifiant se trouve éjecté du contact par le divergent formé par les éléments en contact. Ceci implique une chute de l'épaisseur du film d'huile à la sortie du contact du fait de la conservation du débit.

Les caractéristiques de roulement QJ 1244 N2MA sont (figure IV.12) [83] :

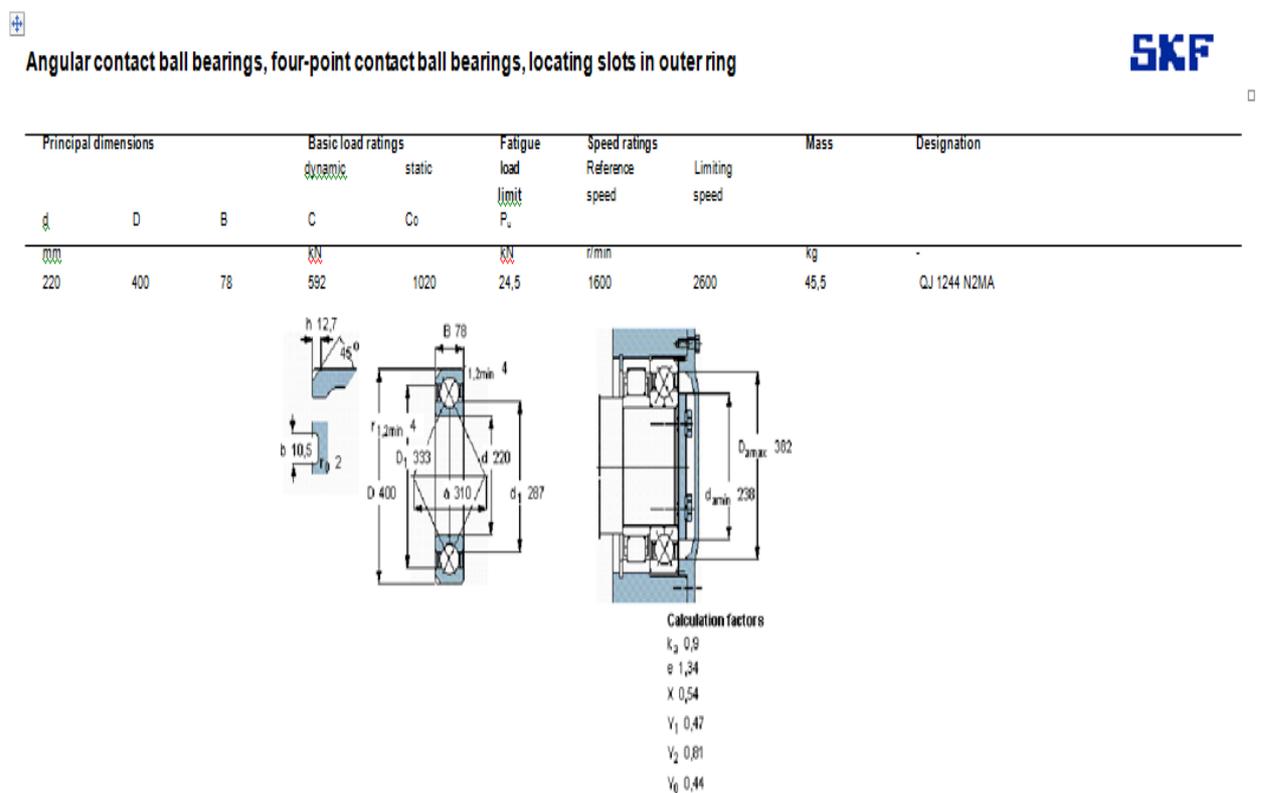


Figure IV.12. Caractéristiques de roulement QJ 1244 N2MA

IV.4.1.2 Roulement SKF22248 CC / N1W33C3

C'est un roulement à rotule sur rouleaux à double rangée utilisé pour des charges radiales et axiales élevées dans les deux sens et pour la compensation des défauts d'alignements.



Figure IV.13. Image roulement SKF22248 CC / N1W33C3.

Les caractéristiques de roulement **SKF22248 CC / N1W33C3** sont (figure IV.14) [83] :



Spherical roller bearings, cylindrical and tapered bore

Principal dimensions			Basic load ratings		Fatigue load limit Pu	Speed ratings		Mass	Designation
d	D	B	C	CO		Reference speed	Limiting speed		
mm			kN		kN	r/min		kg	* - SKF Explorer bearing
240	440	120	2200	3000	245	1300	1800	83,0	22248 CC/W33 *

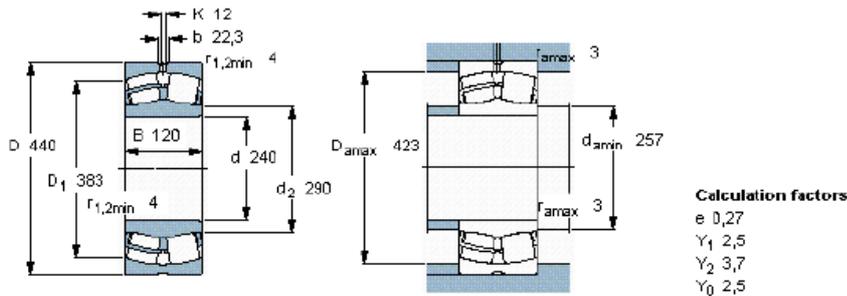


Figure IV.14. Caractéristiques de roulement SKF22248 CC / N1W33C3.

IV.4.2 Identification des matériaux des roulements et l'arbre d'entrée (analyse chimique)

Un segment a été prélevé à partir de l'anneau de la bague extérieure, intérieure des roulements (QJ 1244 N2MA, SKF22248 CC / N1W33C3), un demi de la bille, rouleau et un échantillon de l'arbre à grande vitesse (GV) en vue de l'analyse des matériaux des roulements et l'arbre (figure IV.15).



Figure IV.15. Échantillons pour l'analyse chimique.

L'analyse chimique des échantillons a été réalisée au sein du laboratoire central de spectrométrie **ARCELOR MITTAL ANNABA** via un analyseur à émission optique ARL 3460 (figure IV.16).



Figure IV.16. Analyseur à émission optique ARL 3460.

La composition chimique des échantillons est présentée dans les tableaux suivants :

- Arbre à grande vitesse (GV)

		Analyse spectrale (%)								
Ech \ elms	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	V
arbre	0,200	0,51	0,265	0,0098	0,0055	1,668	1,5791	0,1954	0,2464	0,0034
	Ti	Al	Nb	W	Sn	Co	B	Ta	N	Fe
Arbre	0,002	0,0248	0,0025	0,0068	0,0117	0,0112	0,0004	0,0024	0,0588	95,197

Tableau IV.2 : Composition chimique de l'arbre à grande vitesse (GV).**-Roulement QJ 1244 N2MA**

		Analyse spectrale (%)								
Ech \ elms	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	V
Bague inter	1,03	0,97	0,53	0,012	0,004	0,071	1,420	0,156	0,013	0,012
Bague exter	0,96	0,98	0,50	0,009	0,003	0,032	1,387	0,016	0,006	0,004
bille	0,98	0,26	0,23	0,008	0,004	0,067	1,370	0,110	0,027	0,001
	Ti	Al	Nb	W	Sn	Co	B	Ta	N	Fe
Bague inter	0,010	0,013	0,004	0,005	0,013	0,011	-	0,002	0,063	95,660
Bague exter	0,002	0,005	0,001	-	0,002	0,003	-	-	-	95,970
bille	0,002	0,011	0,001	0,003	0,007	0,005	-	-	-	96,800

Tableau IV.3 : Composition chimique du roulement QJ 1244 N2MA.**-Roulement SKF22248 CC / N1W33C3**

		Analyse spectrale (%)								
Ech\elms	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	V
Bague inter	0,98	0,64	0,27	0,006	0,005	0,173	1,725	0,167	0,243	0,004
Bague exter	0,93	0,60	0,23	0,012	0,005	0,159	1,620	0,224	0,211	0,005
Rouleau	0,997	1,006	0,54	0,0124	0,0264	0,1347	1,362	0,1889	0,0247	0,0085
	Ti	Al	Nb	W	Sn	Co	B	Ta	N	Fe
Bague inter	0,002	0,036	0,003	0,003	0,01	0,011	0,003	0,001	0,0667	95,650
Bague exter	0,001	0,022	0,002	0,007	0,012	0,012	-	-	-	95,840
Rouleau	0,0018	0,0349	0,0029	0,0055	0,0109	0,0116	0,0004	0,0016	0,0531	95,577

Tableau IV.4 : Composition chimique du roulement SKF22248 CC / N1W33C3.

Donc, le matériau utilisée pour l'arbre est une nuance 20 NiCrMn6 et pour les roulements est 100Cr6.

L'acier 100Cr6 est traité thermiquement qui consiste en une trempe suivi d'un revenu. Lors de la trempe, un réchauffage des roulements ramène une dernière fois le métal en phase austénitique (compte tenu la concentration en carbone et en chrome la température est 830 c°).

Le carbone et le chrome de la cémentite sont remis en solution solide dans le fer gamma. Puis le métal est refroidi provoquant la formation de martensitique.

Un revenu à 170 c° assure la précipitation du carbone et donne son faciès final, une martensite fine parsemée de fins carbures de type cémentite (Fe_3C) et libère les contraintes internes.

La nuance 100Cr6, présente une dureté élevée supérieure à 62 HRC (720Hv), et une haute stabilité dimensionnelle lui permettant de résister à de fortes charges et d'être utilisée jusqu'à +150°C. Sa structure homogène à l'échelle macroscopique et microscopique permet de répondre à des exigences de faibles couples et de hautes vitesses de rotation.

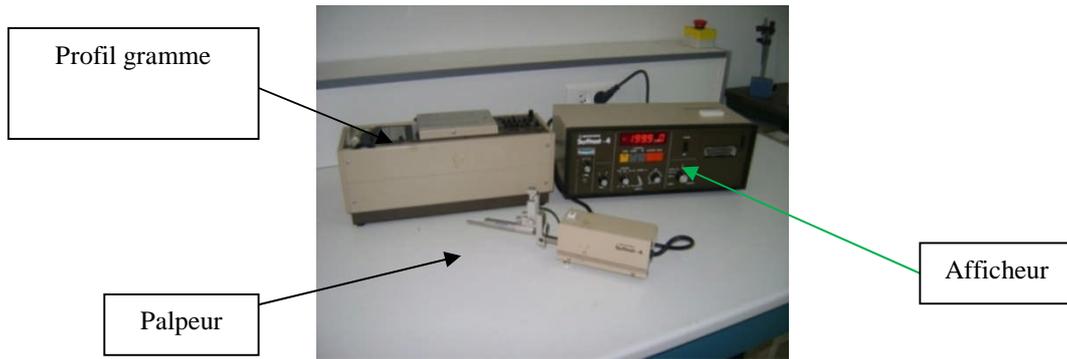
IV.4.3 Analyse des états de surfaces d'éléments de roulements (rugosité)

La qualité des surfaces en contact est étroitement liée au fonctionnement et à la fiabilité des machines. Les usures et les fatigues sont en partie gouvernées par les états de surface. Une superfinish n'est pas toujours d'intérêt mécanique ni économique, elle est par exemple bénéfique sur le plan fatigue, mais désavantageuse sur le plan lubrification hydrodynamique. Ces conséquences de l'état de surface, font que l'intérêt qu'elle revêt est d'une grande importance dans l'industrie. C'est pourquoi sa caractérisation ainsi que les méthodes de mesure y aboutissant revêtent d'une grande importance. La rugosité de surfaces rencontrées dans les roulements de très haute précision sont les suivantes: pistes de roulements en acier : $Ra < 0.03$, des billes en acier: $Ra < 0.01$ [84].

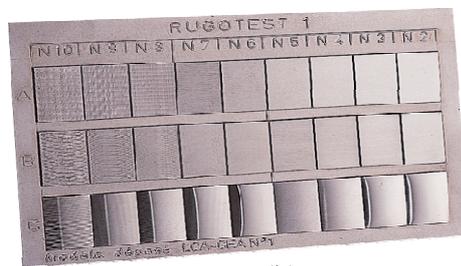
Les états de surface des profils longitudinaux des éprouvettes (Figure IV.17) de chaque roulements, caractérisés par la rugosité, ont été réalisées au sein du laboratoire de faculté de technologie (université de M'sila) à l'aide d'un rugosimètre **MITUTOYO SURRFTEST.4** (Figure IV.18) pour la bague extérieure, bague intérieure et rouleau. La mesure de la rugosité a été effectuée sur trois zones de chaque échantillon. Pour la mesure de la rugosité de la bille a été effectuée par **Viso-tactile**. Les éprouvettes sont nettoyées par l'ETHANOL pur avant la prise de mesures.



Figure IV.17. Echantillons pour la rugosité.



(a)

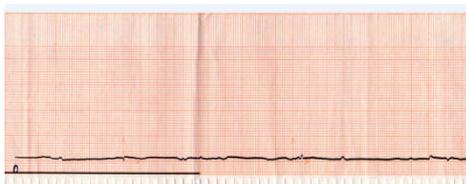


(b)

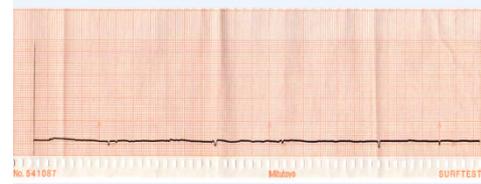
Figure IV.18. Rugosimètre MITUTOYO SURFTTEST.4 et Viso-tactile.

Les profils longitudinaux de rugosité des roulements (QJ 1244 N2MA début d'usure, QJ 1244 N2MA usée (écaillage) et SKF22248 CC / N1W33C3) sont représentés sur les Figure IV.19, Figure IV.20 et Figure IV.21 respectivement. Les mesures des profils longitudinaux des roulements sont données dans les Tableaux suivants.

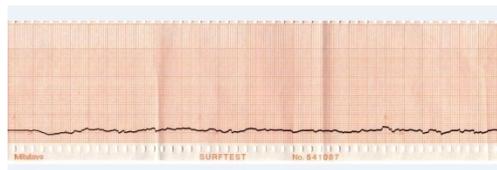
Les paramètres de mesures sont : course = 0.8mm H = 50 μm V = 10000 μm.



a) profilogramme de la bague extérieur
bille



b) profilogramme de la bague intérieure /



c) profilogramme de la bague intérieure / arbre

Figure IV.19. Profilogramme du roulement QJ 1244 N2MA début d'usure.

N° profil \ paramètres	R _a (µm)	R _z (µm)	R _{max} (µm)
Mesure 1	0.1	1.7	2.2
Mesure 2	0.1	1.8	2.5
valeur moyenne	0.1	1.75	2.3

Tableau IV.5 : Valeurs de rugosité pour la piste de la bague extérieure du roulement QJ 1244 N2MA début d'usure.

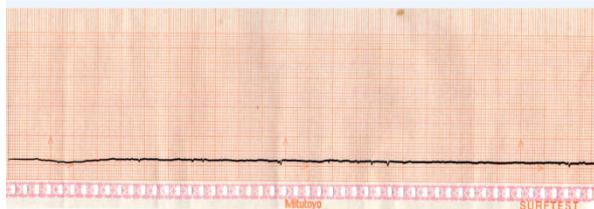
N° profil \ paramètres	R _a (µm)	R _z (µm)	R _{max} (µm)
Mesure 1	0.1	2.3	3.2
Mesure 2	0.0	1.5	2.9
Mesure 3	0.0	1.4	3.0
valeur moyenne	0.03	1.73	3.03

Tableau IV.6 : Valeurs de rugosité pour la piste de la bague intérieure / bille du roulement QJ 1244 N2MA début d'usure.

N° profil \ paramètres	R _a (µm)	R _z (µm)	R _{max} (µm)
Mesure 1	0.4	3.2	4.3
Mesure 2	0.4	3.6	6.2
valeur moyenne	0.4	3.4	5.25

Tableau IV.7 : Valeurs de rugosité de la bague intérieure / arbre du roulement QJ 1244 N2MA début d'usure.

La rugosité de la bille a été mesurée à l'aide de Viso-tactile, à travers la comparaison entre l'état de surface de la bille et celle de chaque surface dans le Viso-tactile, la valeur de rugosité est : R_a=0.4µm.



a) profilogramme de la bague extérieur



b) profilogramme de la bague intérieure / bille



c) profilogramme de la bague intérieure / arbre

Figure IV.20. Profilogramme du roulement QJ 1244 N2MA usé (écaillage).

N° profil \ paramètres	R_a (μm)	R_z (μm)	R_{max} (μm)
Mesure 1	0.1	1.7	2.2
Mesure 2	0.1	1.8	2.5
valeur moyenne	0.1	1.75	2.3

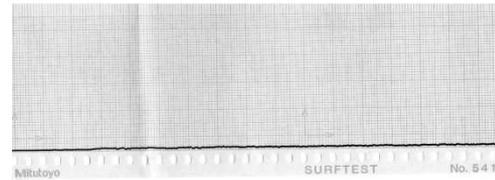
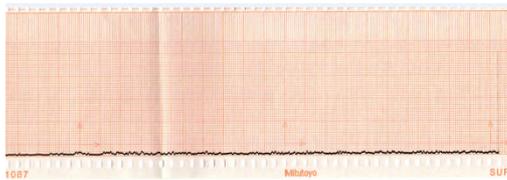
Tableau IV.8 : Valeurs de rugosité pour la piste de la bague extérieure du roulement QJ 1244 N2MA usé (écaillage).

N° profil \ paramètres	R_a (μm)	R_z (μm)	R_{max} (μm)
Mesure 1	0.1	2.3	3.2
Mesure 2	0.0	1.5	2.9
Mesure 3	0.0	1.4	3.0
valeur moyenne	0.03	1.73	3.03

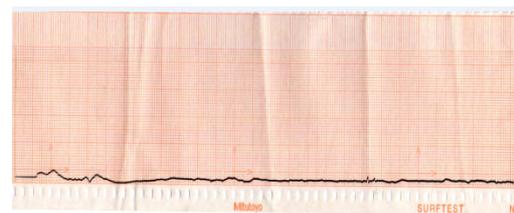
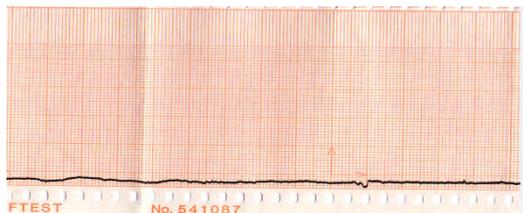
Tableau IV.9 : Valeurs de rugosité pour la piste de la bague intérieure / bille du roulement QJ 1244 N2MA usé (écaillage).

N° profil \ paramètres	R_a (μm)	R_z (μm)	R_{max} (μm)
Mesure 1	0.4	3.2	4.3
Mesure 2	0.4	3.6	6.2
valeur moyenne	0.4	3.4	5.25

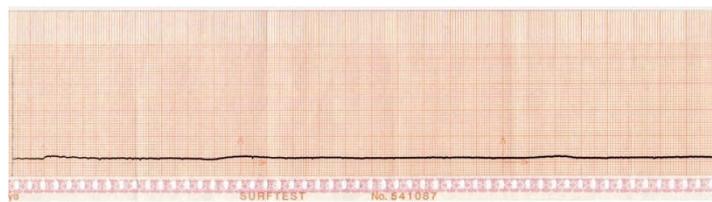
Tableau IV.10 : Valeurs de rugosité de la bague intérieure / arbre du roulement QJ 1244 N2MA usé (écaillage).



a) profilogramme de la bague ext à l'extrémité b) profilogramme de la bague ext au milieu



c) profilogramme de la bague intérieur/rouleau d) profilogramme de la bague int / arbre



e) profilogramme du rouleau du roulement SKF22248 CC / N1W33C3

Figure IV.21. Profilogramme du roulement SKF22248 CC / N1W33C3.

N° profil \ paramètres	R _a (μm)	R _z (μm)	R _{max} (μm)
Mesure 1 à l'extrémité	0.3	3.2	4.1
Mesure 2 au milieu	0.0	1.1	1.2
Mesure 3 à l'extrémité	0.2	3.0	3.5
valeur moyenne	0.16	2.43	2.93

Tableau IV.11 : Valeurs de rugosité de la bague extérieur / rouleau du roulement SKF 22248 CC / N1W33C3.

N° profil \ paramètres	R _a (μm)	R _z (μm)	R _{max} (μm)
Mesure 1 à l'extrémité	0.3	2.1	2.7
Mesure 2 au milieu	0.2	1.3	1.5
Mesure 3 à l'extrémité	0.2	2.1	2.6
valeur moyenne	0.23	1.83	2.26

Tableau IV.12 : Valeurs de rugosité de la bague intérieur / rouleau du roulement SKF 22248 CC / N1W33C3.

N° profil \ paramètres	R _a (μm)	R _z (μm)	R _{max} (μm)
Mesure 1 à l'extrémité	0.3	2.0	2.7
Mesure 2 au milieu	0.1	1.1	1.6
Mesure 3 à l'extrémité	0.2	1.9	2.6
valeur moyenne	0.2	1.66	2.3

Tableau IV.13 : Valeurs de rugosité de la bague intérieur / arbre du roulement SKF22248 CC / N1W33C3.

N° profil \ paramètres	R _a (μm)	R _z (μm)	R _{max} (μm)
Mesure 1 à l'extrémité	0.3	1.6	2.9
Mesure 2 au milieu	0.1	1.1	1.5
Mesure 3 à l'extrémité	0.0	1.3	1.8
valeur moyenne	0.13	1.33	2.06

Tableau IV.14 : Valeurs de rugosité de rouleau du roulement SKF22248 CC / N1W33C3.

D'après les mesures de la rugosité des éléments de roulements nous observons que la rugosité de surfaces des échantillons est anormales, l'augmentation de la rugosité par rapport aux valeurs normales selon la norme ISO 4287 ($R_a = 0.03\mu\text{m}$ pour le chemin de roulement et $R_a = 0.01\mu\text{m}$ pour la bille et rouleau) témoignent la dégradation de l'état de surface de ces échantillons sous l'effet d'usure. Les variations brutales de la hauteur des profils (figure VI.20) peuvent se traduire par l'existence des écaillages qui résultent de la propagation des fissures sous les charges cycliques radiales appliquées.

L'acier trempé à structure martensitique contient toujours un pourcentage d'austénite résiduelle qui limite son utilisation dans une plage de température comprise entre -20°C et $+150^\circ\text{C}$ environ. A basse température la trempe se poursuit et l'austénite résiduelle se transforme en martensite secondaire et augmente le volume spécifique de l'acier. A haute température la transformation de l'austénite résiduelle apporte une augmentation du volume spécifique de l'acier (1) l'appauvrissement de la martensite par libération du carbone amène une diminution du volume spécifique de l'acier (2).

Ces deux phénomènes irréversibles ne se compensent que très partiellement. Le roulement subit une variation dimensionnelle dont l'amplitude et la vitesse dépendent du temps de maintien à sa température de fonctionnement ce qui entraîne une modification des serrages arbre-roulement et roulement logement et donc du jeu de fonctionnement. Au-delà de la température normale de $+150^\circ\text{C}$, on remarque que la variation dimensionnelle de l'acier n'est plus négligeable. L'état de surface détermine la qualité des surfaces des éléments en contact, qualité fondamentale du point de vue de la résistance aux contraintes et de la lubrification [85].

De plus on observe que l'état de surfaces des extrémités des rouleaux est plus dégradé qu'au milieu sous l'effet des sur-contraintes aux extrémités.

IV.4.4 Analyse par diffraction de rayons X DRX

La diffraction des rayons X est une technique d'analyse idéale pour l'étude d'échantillons solides cristallisés. A chaque phase cristalline correspond un ensemble caractéristique de pics de diffraction (diffractogramme). Cette signature unique permet donc une caractérisation et une identification de toutes les phases. La diffraction de faisceau des rayons x se réalise si l'interaction des rayons x avec les atomes des plans (hkl) satisfait la loi de Bragg [86-91] :

$$2 \times d_{hkl} \times \sin \theta = n \times \lambda \quad (4.1)$$

θ est l'angle du faisceau incident par rapport au plan réticulaire, λ la longueur d'onde du faisceau incident, n un nombre entier qui est l'ordre de diffraction et d_{hkl} la distance interréticulaire, caractéristique du matériau. A l'aide des fiches (ASTM : American Society of Testing Material voir annexe I), on peut identifier les structures et les éléments présents.

Afin d'identifier les composés formés, et leurs structures, nous avons utilisé un diffractomètre de type Bruker D8 Advance du laboratoire d'analyse radio-cristallographique de l'université Ferhat Abbas de setif, équipé d'un filtre en Ni et d'une anticathode de cuivre utilisant la radiation $K\alpha$ de longueur d'onde $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$. Les conditions de travail sont $U = 30 \text{ kV}$ et $I = 25 \text{ mA}$, l'angle de balayage $2\theta = 6 - 90^\circ$ avec une vitesse égale à $0.05^\circ/\text{s}$. Les échantillons ont des dimensions $8 \times 8 \times 4$ (épaisseur = 4mm).

La recherche des phases présentes dans le composé a été effectuée par microinformatiques en utilisant le logiciel X'Pert High Score (Fichiers JCPDS données en annexe I).

Les spectres de diffraction x obtenus pour les roulements en acier 100Cr6 sont illustrés sur les figures (Figure IV.22, Figure IV.23, Figure IV.24).

Les diffractogrammes montrent les pics principaux caractéristiques du fer α' (Martensite) (Fiche JCPDS n°01-085-1410), avec des intensités remarquables. Nous remarquons, en plus des pics de fer α' , une série de pics de hogg carbure (Fe_5C_2) (Fiche JCPDS n°00-020-0509) et de carbure de Cr (Cr_7C_3) (Fiche JCPDS n°00-006-0683). La formation de ce carbure est assurée par la réaction des atomes de chrome avec les atomes de carbone de la bague intérieure et bille/rouleau. Cependant, on remarque l'absence des pics de Fe_3C .

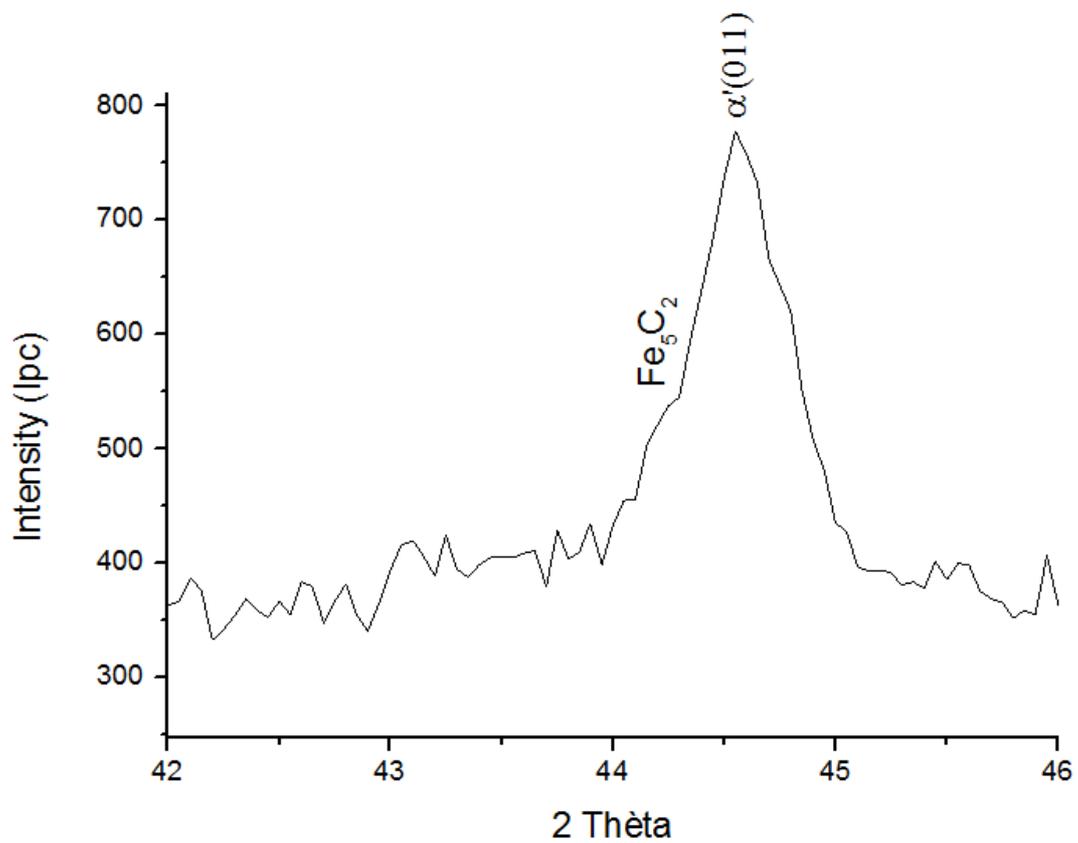
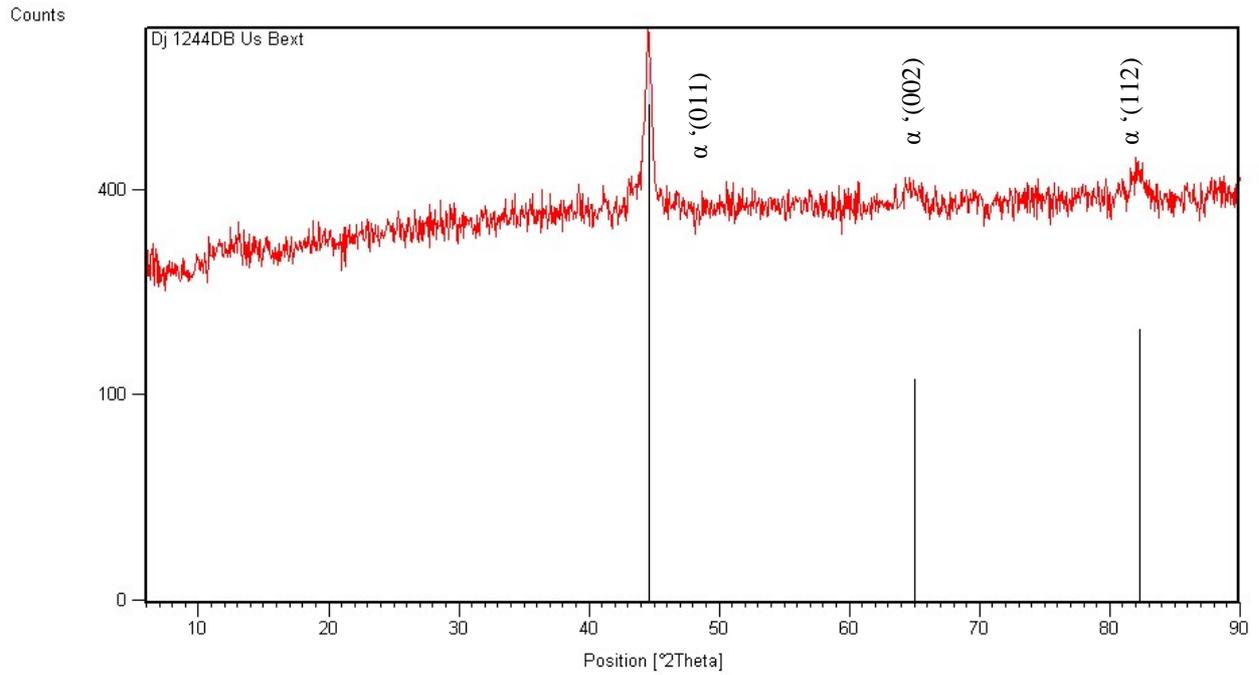


Figure IV.22.a. Spectre de diffraction des rayons x pour la bague extérieure du roulement QJ1244 début d'usure.

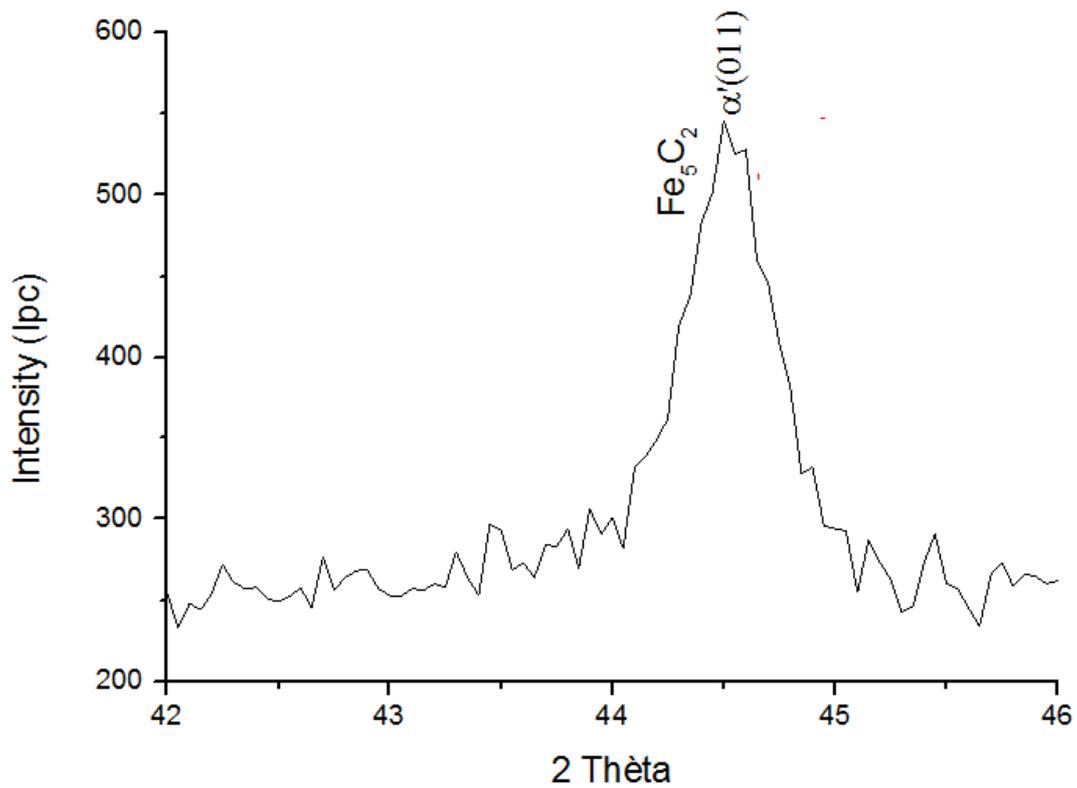
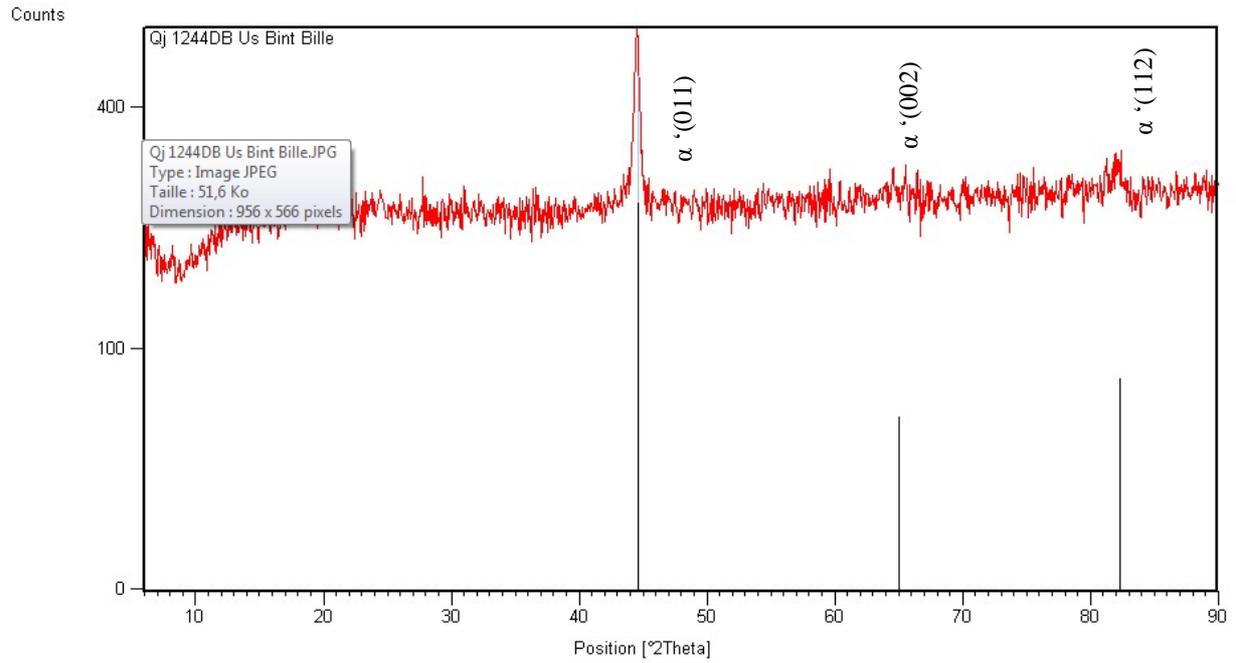


Figure IV.22.b. Spectre de diffraction des rayons x pour la bague intérieure du roulement QJ1244 début d'usure.

Figure IV.22. Spectre de diffraction des rayons x pour le roulement QJ1244 début d'usure.

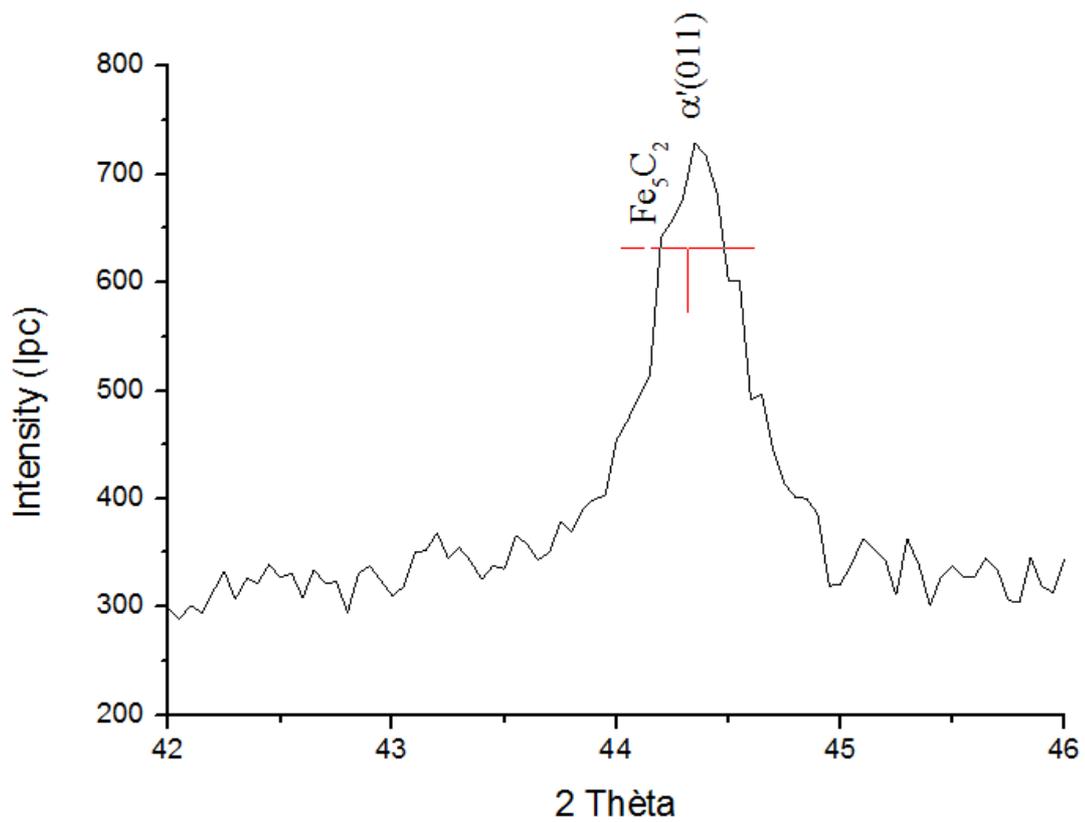
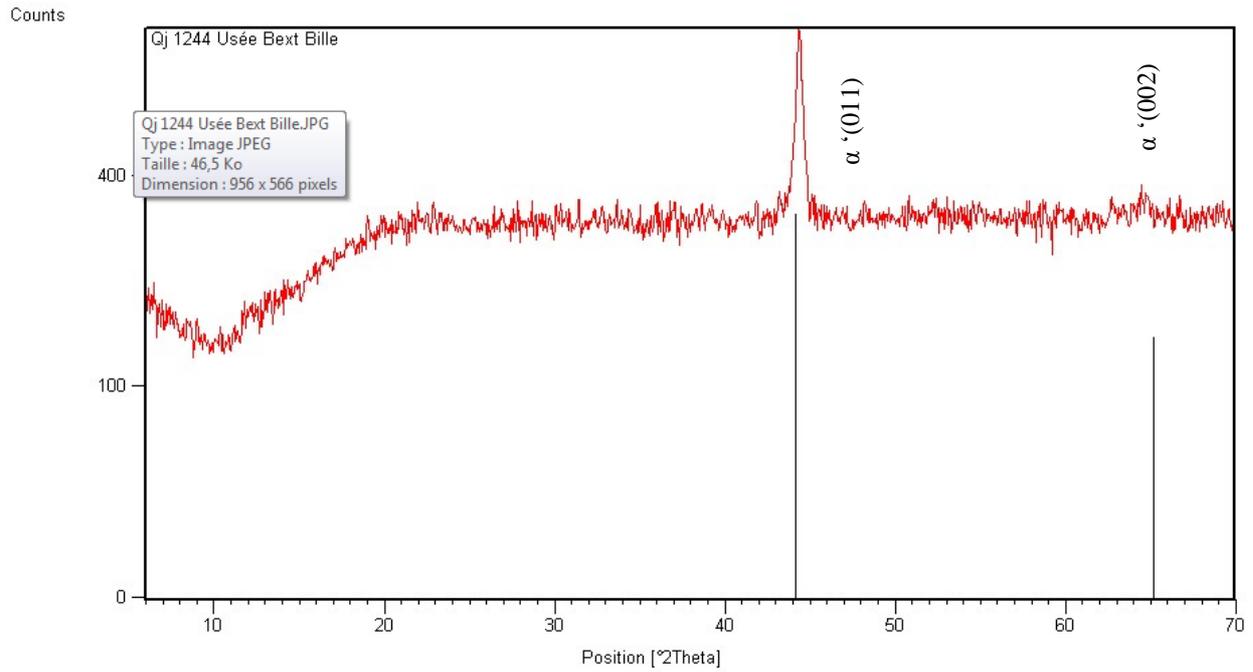


Figure IV.23.a. Spectre de diffraction des rayons x pour la bague extérieure du roulement QJ1244 usée (écaillage).

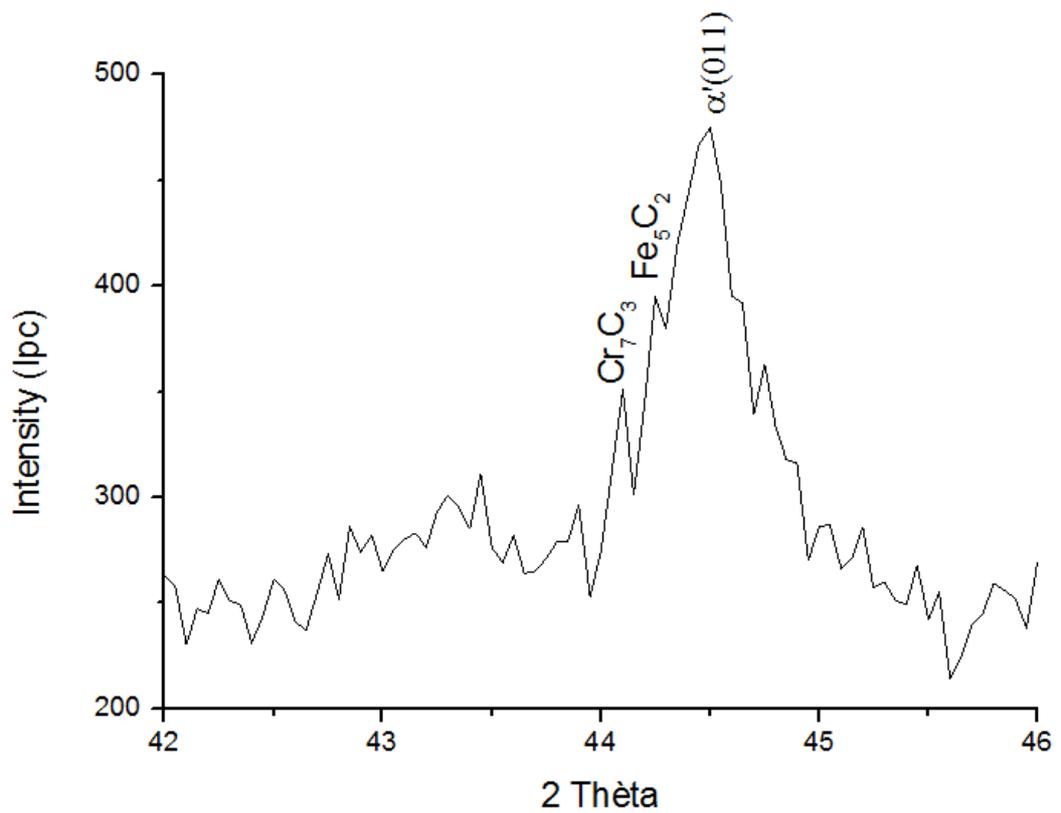
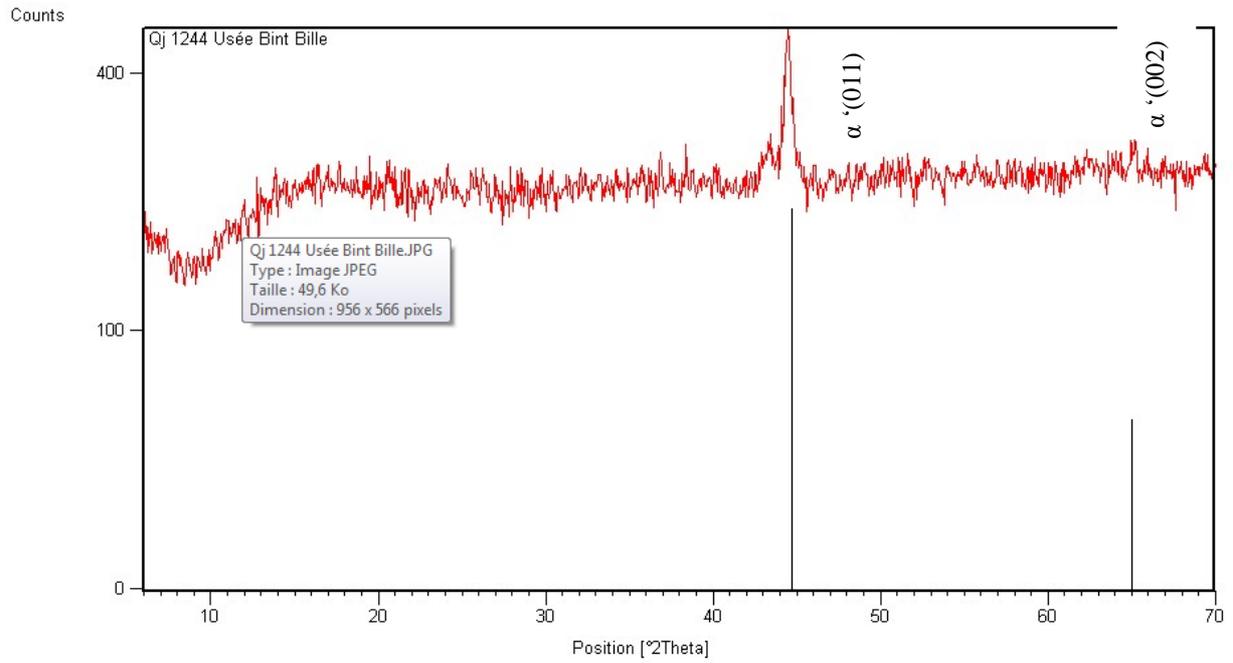


Figure IV.23.b. Spectre de diffraction des rayons x pour la bague intérieure/bille du roulement QJ1244 usée (écaillage).

Figure IV.23. Spectre de diffraction des rayons x pour roulement QJ1244 usée (écaillage).

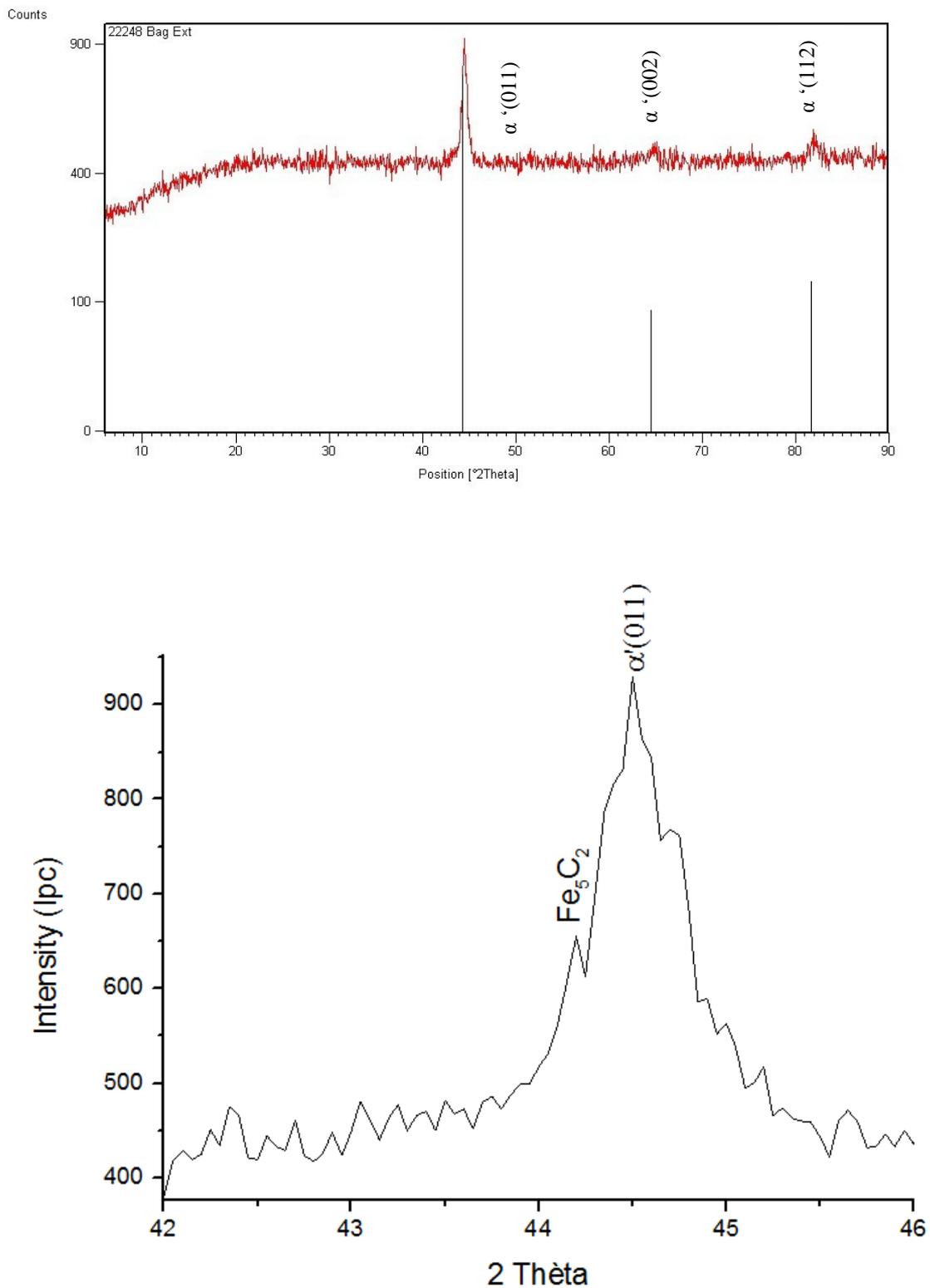


Figure IV.24.a. Spectre de diffraction des rayons x pour la bague extérieure du roulement SKF 22248 usée.

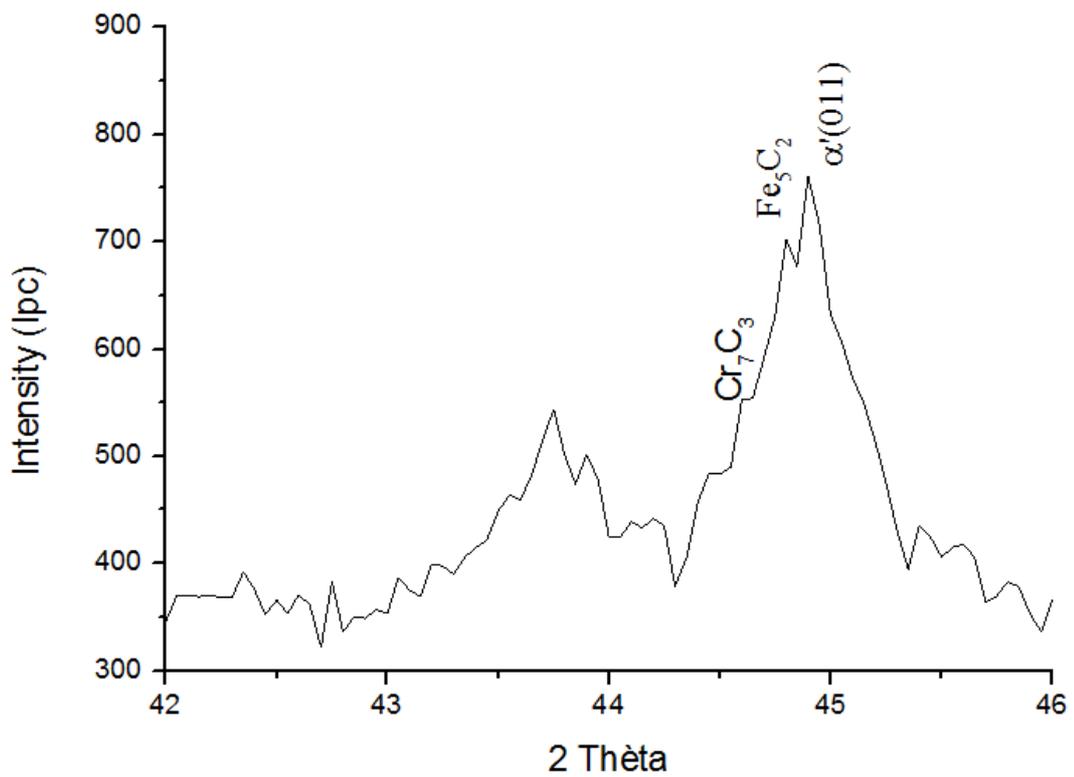
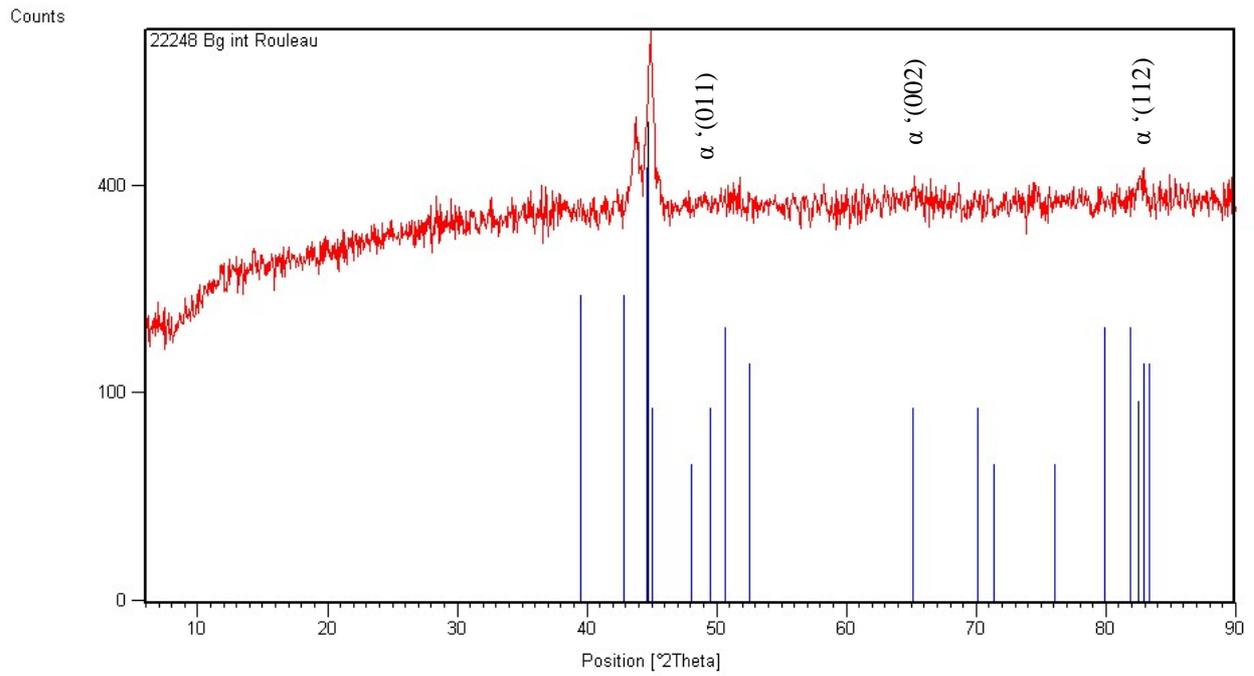


Figure IV.24.b. Spectre de diffraction des rayons x pour la bague intérieure/rouleau du roulement SKF 22248 usée.

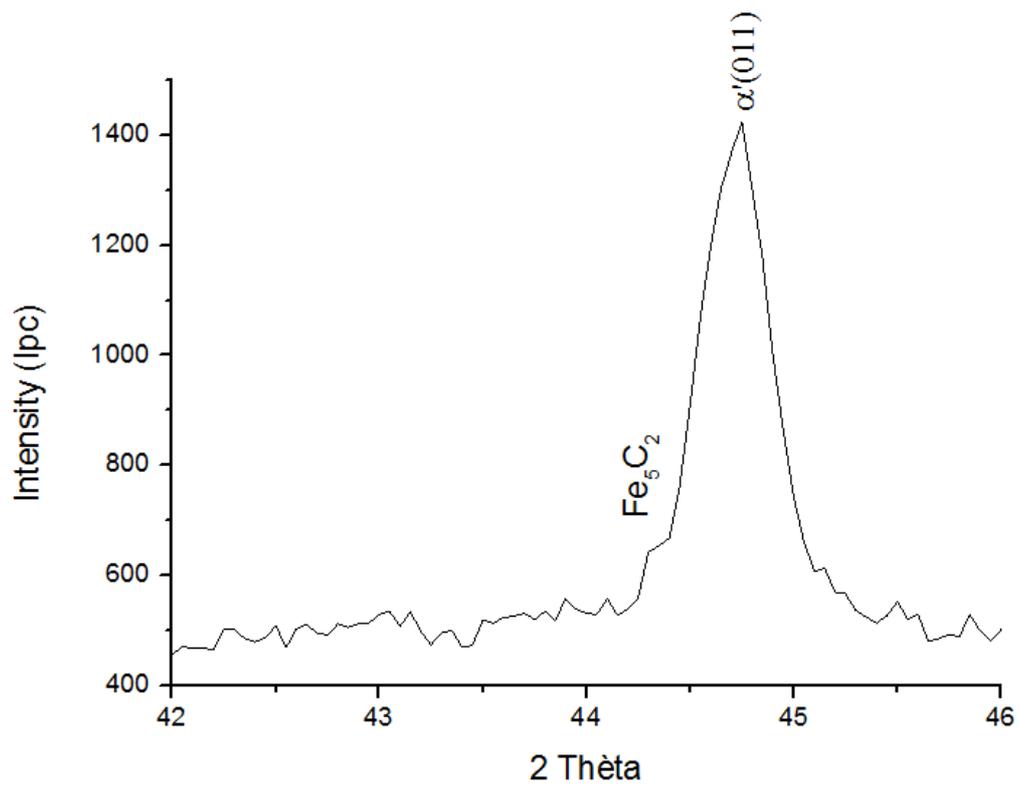
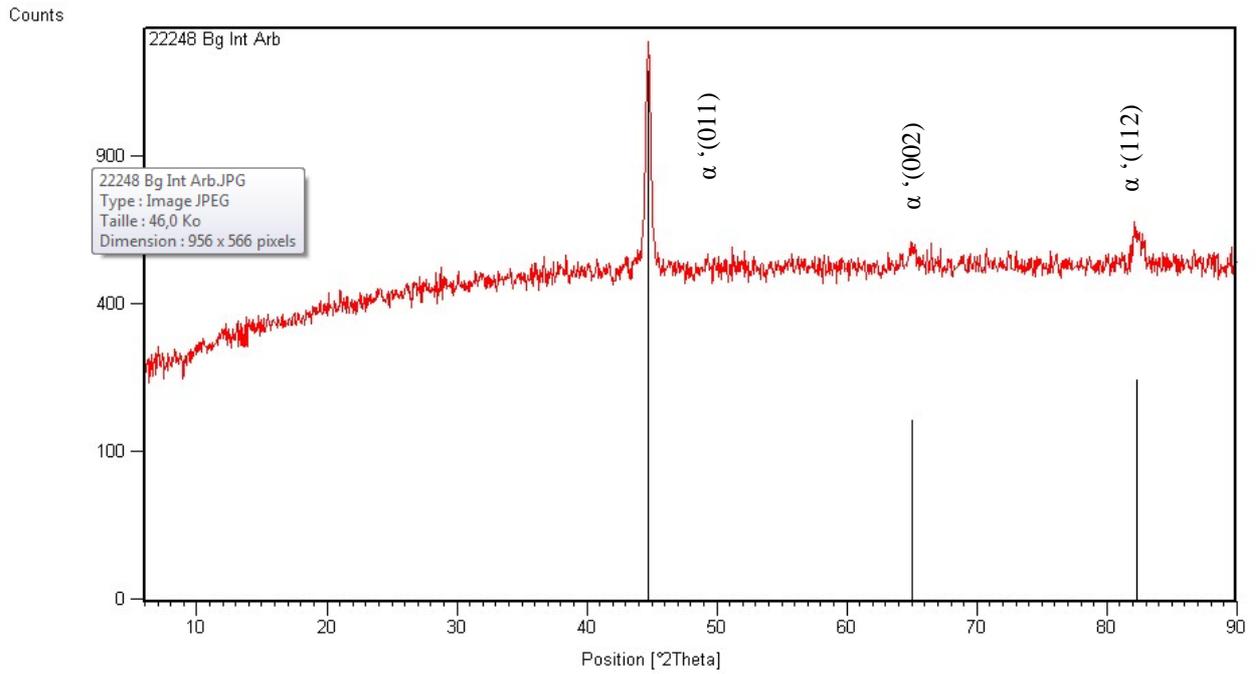


Figure IV.24.c. Spectre de diffraction des rayons x pour la bague intérieure/arbre du roulement SKF 22248 usée.

Figure IV.24. Spectre de diffraction des rayons x pour roulement SKF 22248 usée.

IV.4.5 La micro-dureté

Les échantillons ont été prélevés à partir des roulements QJ 1244 N2MA début d'usure, QJ 1244 N2MA usée (écaillage) et SKF22248 CC / N1W33C3 en vue de la mesure de l'évolution de la micro-dureté de la section du profil longitudinal de l'élément (voir figure IV.25). Les échantillons sont enrobés et polis. Les mesures de la micro-dureté ont été réalisées à l'aide d'un pénétrateur de mode Vickers (figure IV.26). La charge appliquée est de $P=10$ g et le temps de 15s.

Il est à noter que les points de mesures de chaque zone de la section du profil longitudinal de l'élément sont distants de 0.1 mm.



Figure IV.25. Echantillon de prélèvement de la micro-dureté des éléments de roulements



Figure IV.26. Microduromètre Tukon 2500 Wilson Hardness et Microscope optique Axio vert 40 Mot Zeiss assistés par ordinateur.

Le tableau VI.15 présente les prélèvements de la micro - dureté des roulements QJ 1244 début d'usure, QJ 1244 usée (écaillage) et SKF22248 CC / N1W33C3.

Points de mesures	HV _{0.1} QJ1244début d'usure		HV _{0.1} QJ1244 usée (écaillage)		HV _{0.1} SKF22248 usée	
	Bague EXT	Bague INT	Bague EXT	Bague INT	Bague EXT	Bague INT
1	865	760	812	812	994	810
2	926	838	994	996	960	602
3	994	785	994	960	994	601
4	926	716	960	928	785	675
5	960	716	994	865	737	716
6	926	761	994	960	760	695
7	926	865	960	928	760	554
8	896	838	960	994	602	513
9	865	994	928	996	569	

Tableau IV.15 : Evolution de la micro-dureté des roulements QJ 1244 début d'usure, QJ 1244 usée (écaillage) et SKF 22248 CC / N1W33C3.

Les valeurs de la micro-dureté superficielle de la bille est de 838 HV_{0.1} et celle du rouleau est de 960 HV_{0.1}. Les figures Figure IV.27, Figure IV.28 et Figure IV.29 illustrent l'évolution de la micro-dureté des éléments de roulements QJ 1244 début d'usure, QJ 1244 usée (écaillage) et SKF 22248 CC / N1W33C3.

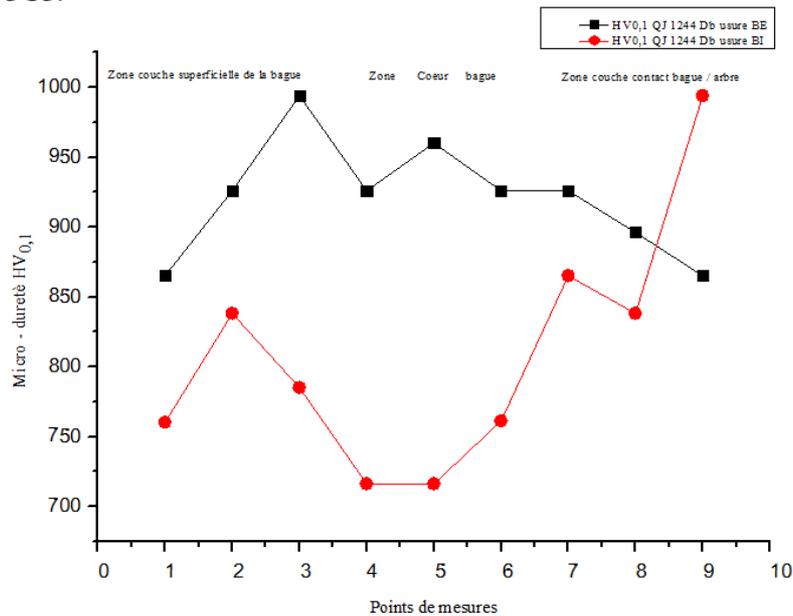


Figure IV.27. Evolution de la micro-dureté du roulement QJ 1244 début d'usure.

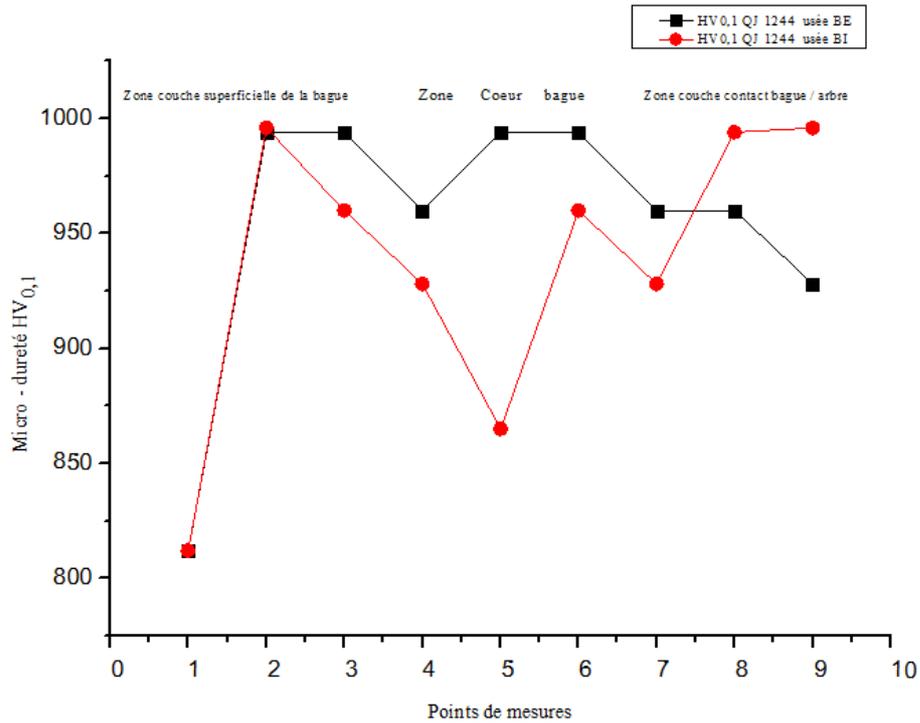


Figure IV.28. Evolution de la micro-dureté du roulement QJ 1244 usée (écaillage).

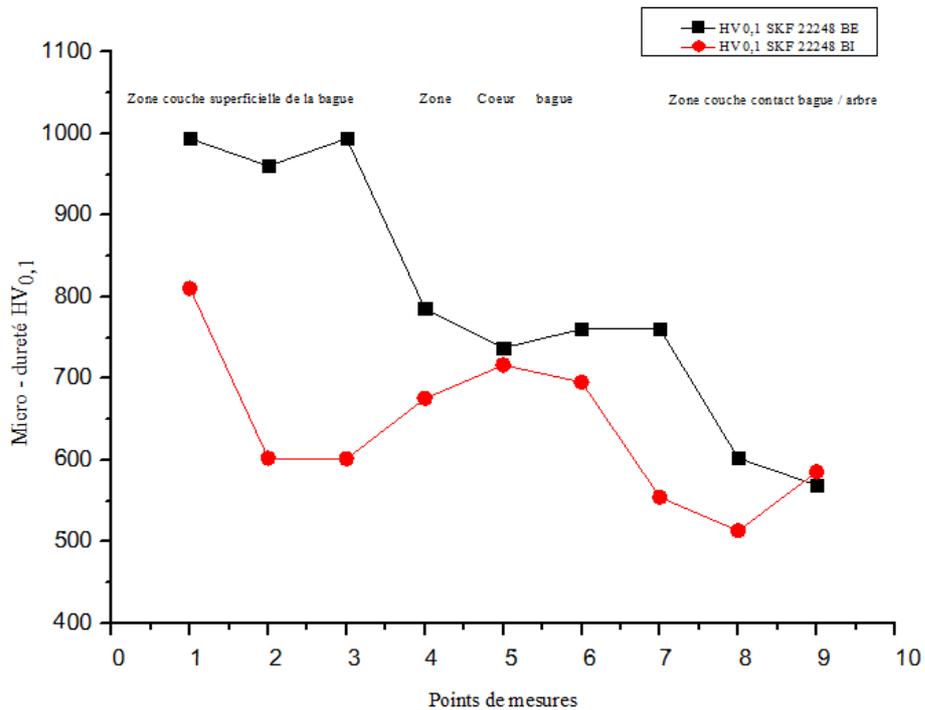


Figure IV.29. Evolution de la micro-dureté du roulement usée SKF 22248 CC/N1W33C3.

La dureté Vickers de l'acier 100Cr6 localisé juste sous la surface du chemin de roulements QJ 1244 début d'usure, QJ 1244 usée et SKF 22248 CC/N1W33C3 lubrifiés, défectueux, a été mesurée à une valeur largement supérieure à la valeur HV normale. Le durcissement inhabituel observé laisse à penser que le dommage a été causé par la dissipation d'une grande remontée

d'énergie par friction se prolongeant plusieurs millisecondes [85]. Au lieu d'une surface avec piqures ou d'un chemin de roulement fissure, conséquences typiques d'une surcharge, les 'matériaux' dans le chemin de roulement semblent avoir été 'plaques' ou 'laminés' sur la surface pour le cas d'un début d'usure. De même que La dureté Vickers de l'acier 100Cr6 localisé juste sous la surface du contact de roulements / arbre pour SKF 22248 CC / N1W33C3 est inférieure à celle du cœur est due d'une usure douce.

IV.4.5 Examen métallographique

IV.4.5.1 Observations macrographique

Les échantillons (figure IV.30) sont observés tel qu'ils sont, sans aucune préparation sauf un nettoyage avec l'ETHANOL pur. Ces premières observations (à l'état brut) après usure permettent de remonter aux conditions réelles de contact entre les éléments. Les observations ont été effectuées à l'aide d'un microscope optique Axio vert 40 Mot Zeiss assistés par ordinateur du Laboratoire de Physique et de Mécanique des Matériaux Métalliques (LP3M) de l'université Ferhat Abbas setif (voir figure IV .26).



Figure IV.30. Echantillons pour observation macrographique.

Les figures suivantes présentes les images d'observations macrographiques des différents éléments en contact des roulements.

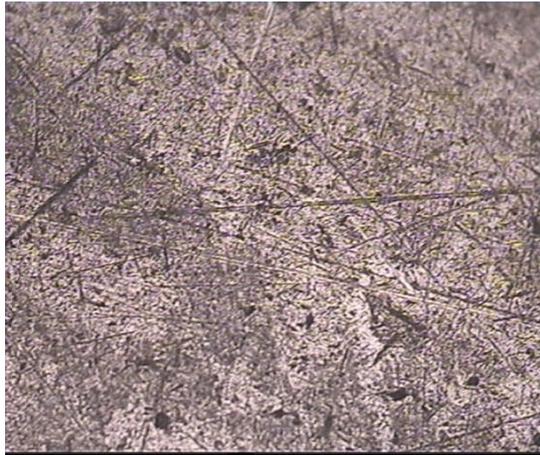


Figure IV.31.a. Macrostructure de la bille.



Figure IV.31.b. Macrostructure de la piste de la bague extérieure / bille.

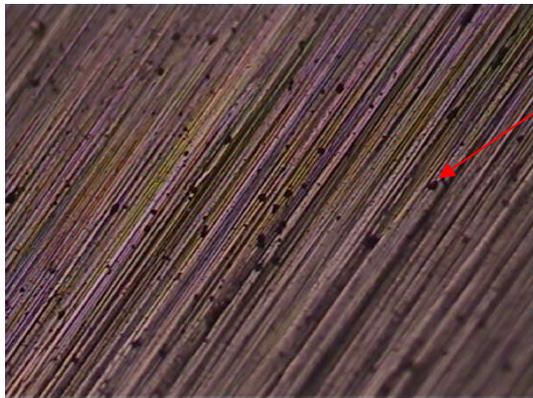


Figure IV.31.c. Macrostructure de la piste bague intérieure / bille.

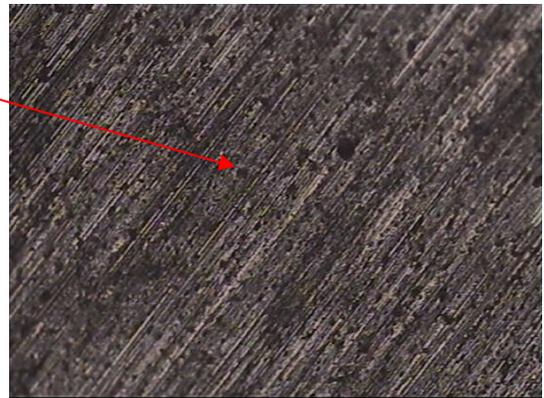


Figure IV.31.d. Macrostructure de la piste de la bague intérieure / arbre.

Écaillage

Figure IV.31. Macrostructure du roulement QJ 1244 N2MA début d'usure grossissement x100.

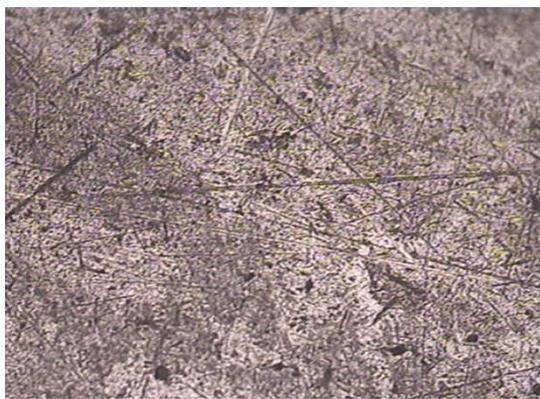


Figure IV .32.a. Macrostructure de la bille.

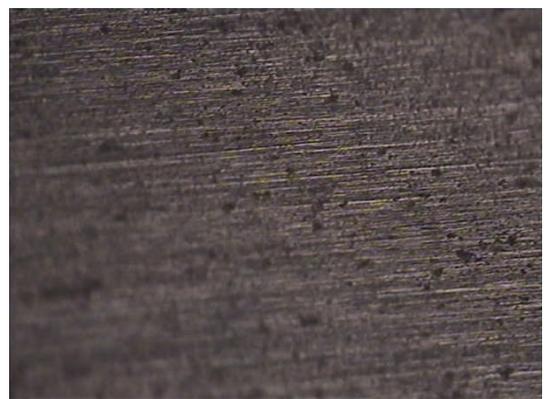


Figure IV .32.b. Macrostructure de la piste de la bague extérieure / bille.

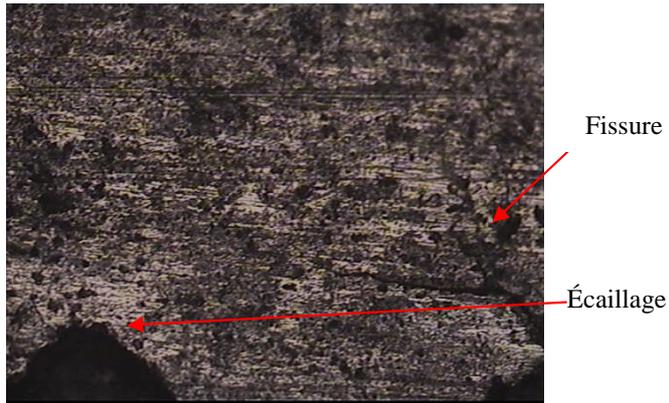


Figure IV.32.c. Macrostructure de la piste bague intérieure / bille.

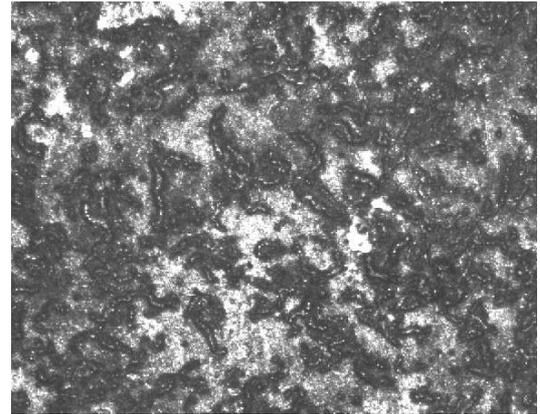


Figure IV.32.d. Macrostructure de la piste de la bague intérieure / arbre.

Figure IV.32. Macrostructure du roulement QJ 1244 N2MA usé (écaillage) grossissement x100.



Figure IV .33.a. Macrostructure du rouleau.



Figure IV .33.b. Macrostructure de la piste de la bague extérieure / rouleau.



Figure IV.33.c. Macrostructure de la piste bague intérieure / rouleau.

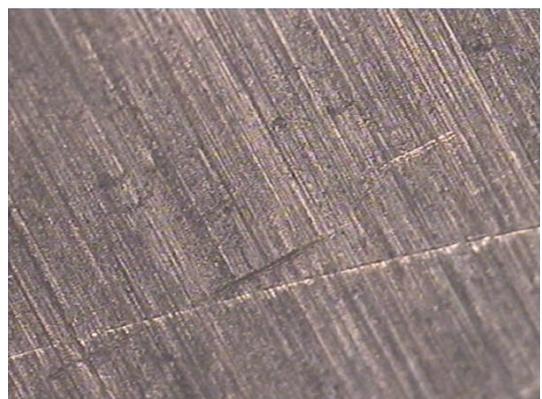


Figure IV.33.d. Macrostructure de la piste de la bague intérieure / arbre.

Figure IV.33. Macrostructure du roulement SKF22248 CC / N1W33C3 x100.

Ces observations montrent que :

La macrostructure d'une partie de la bille, Présente des stries et rayures non parallèles (quadrillage) dues au frottement de la bille sur les deux bagues.

Les roulements QJ 1244 N2MA début d'usure et SKF22248 CC / N1W33C3 présentent une macrostructure à bonde. Qui montre des surfaces possèdent :

-Des faciès endommagés sous forme de stries parallèles suivent le sens de rotation des billes / rouleaux traduisant l'abrasion qui résulte des charges extérieures appliquées par les billes sur les deux bagues du roulement.

-Des écaillages de petites tailles.

Il existe deux types d'usure : le premier est un mode d'endommagement continue, quand les interactions entre les rugosités de surface des matériaux en contact peuvent avoir lieu. Ce mode d'endommagement amène un enlèvement de matière à chaque cycle de chargement. Le second mode est l'usure par un troisième corps, des débris d'usure en suspension dans l'huile par exemple. Ce sont les particules d'usure très dures qui usinent les matériaux en contact.

L'observation macrographique d'une partie de la paroi bague intérieure / bille du roulement QJ 1244 N2MA usé (écaillage), montre une surface très endommagée contient des stries profondes et des écaillages ayants de tailles différentes. L'écaillage provient de la propagation des fissures à travers l'épaisseur du matériau, fissure s'initiant généralement en sous-couche à la profondeur d'hertz. Il dépend de la contrainte de cisaillement à la surface et de l'épaisseur du film d'huile.

IV.4.5.2 Observations micrographique

Ces examens ont pour but de caractériser la structure des échantillons des éléments des roulements étudiés en utilisant un microscope optique à réflexion Axio vert 40 Mot Zeiss.

IV.4.5.2.1 Préparation des échantillons

Après découpage, les échantillons pour l'examen micrographique superficielle de la piste de la bague extérieure, intérieure et le contact bague intérieure / arbre subit une étape de pré polissage manuel progressif sur des papiers abrasifs de grains de plus en plus fins (P1200, P2000, P5000) (figure IV.34). L'échantillon subi ensuite un polissage de finition à l'aide de liquide diamantés de particules 3µm. Ce polissage s'effectue sur drap de polissage.

Les échantillons pour l'examen micrographique du cœur de la bague extérieure et de la bague intérieure sont enrobés et polis de la même manière précédente. Même opération pour la bille et rouleau. Enfin les échantillons sont séchés à l'air chaud.



Figure IV.34. Échantillons pour l'examen micrographique.

IV.4.5.2.2 Attaque chimique

Avant l'étude micrographique, l'échantillon subi une attaque chimique au Nital, utilisé pour les examens des structures des aciers au carbone faiblement alliés. Le Nital est une solution à 4 % d'acide nitrique (HNO_3) dans 96 % de l'éthanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). La surface obtenue par polissage est plongée 3 à 5 secondes dans cette solution, à nouveau nettoyée à l'éthanol et séchée à l'air chaud. Cette dernière opération est très délicate, car il ne faut laisser aucune trace sur la surface.

IV 4.5.2.3 Résultats des observations

A l'aide du microscope optique à réflexion Axio vert 40 Mot Zeiss qui permet d'obtenir des grossissements jusqu'à x1000.

Deux types d'observations ont été réalisés pour suivre l'évolution de la structure cristallographique de l'échantillon : des observations superficielles et des observations au cœur des échantillons. Les figures suivantes présentes les microstructures de roulements et l'arbre à grande vitesse (GV).

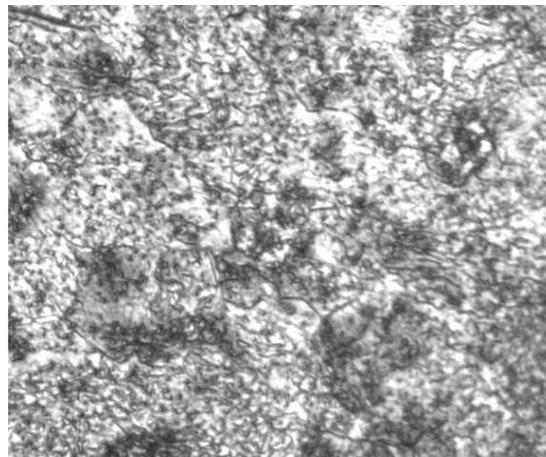


Figure IV.35. Microstructure de l'arbre à grande vitesse GV 20 Cr Mn 6 grossissement x800.

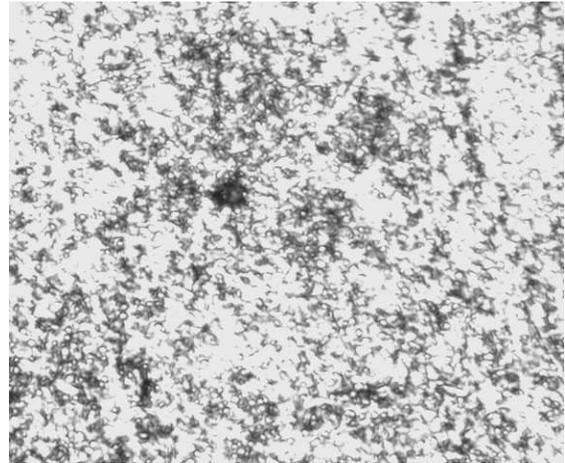
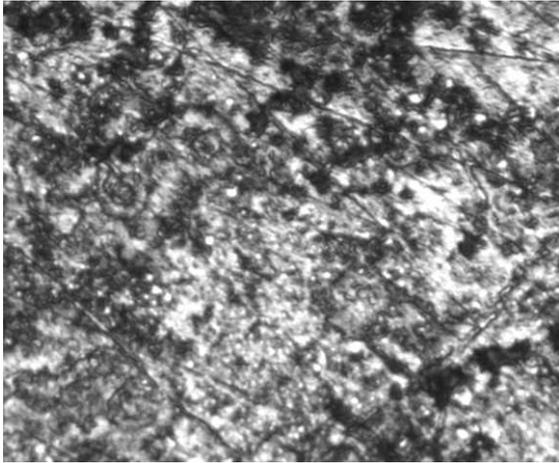


Figure IV.36.a. Microstructure superficielle de la bille grossissement x 800.

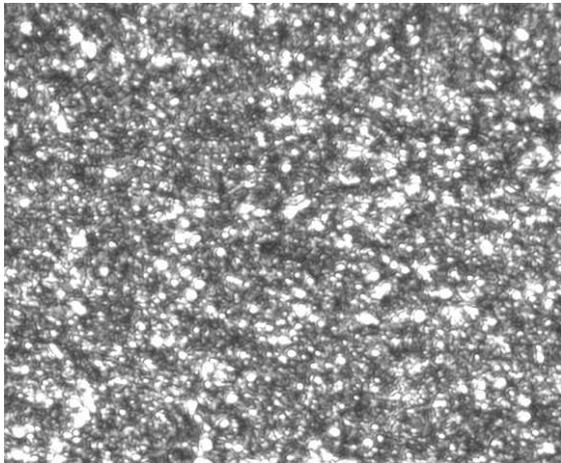


Figure IV.36.b. Microstructure superficielle de la bague extérieure x 800

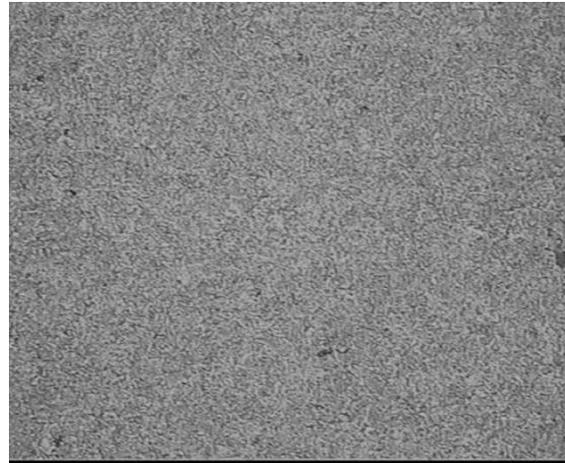


Figure IV.36.c. Microstructure au cœur de la bague extérieure x 500

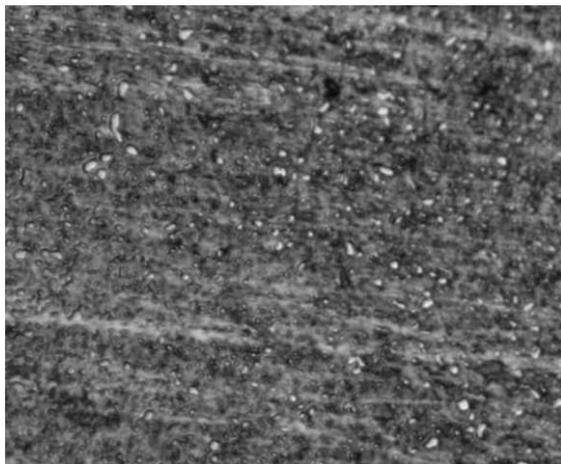


Figure IV.36.d. Microstructure superficielle de la bague intérieure / bille x 800.

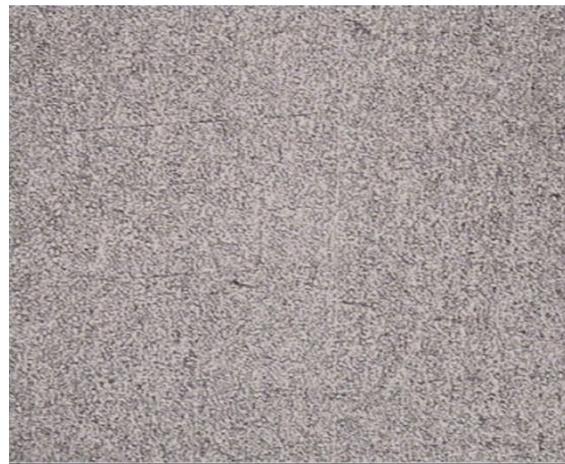


Figure IV.36.e. Microstructure au cœur de la bague intérieure / bille x 500

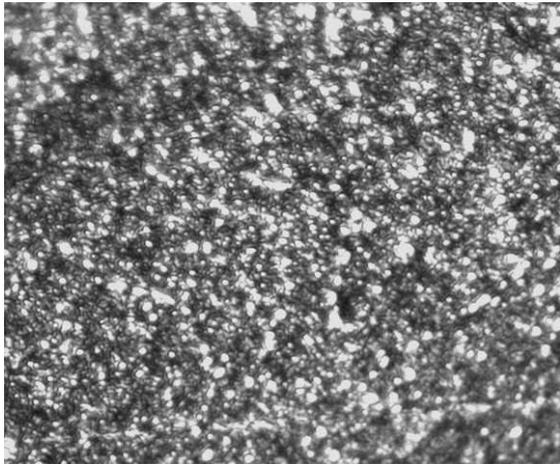
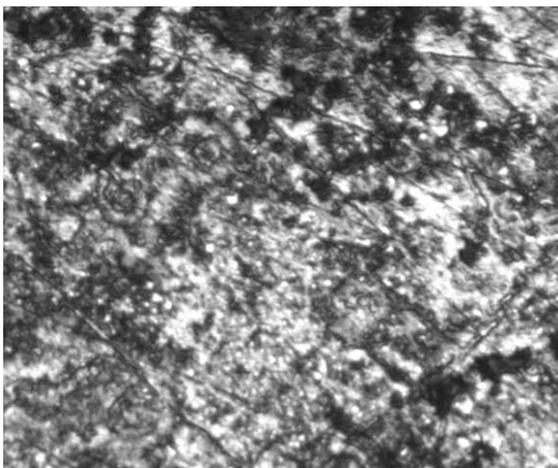


Figure IV .36.f. Microstructure superficielle de la bague intérieure / arbre x800.

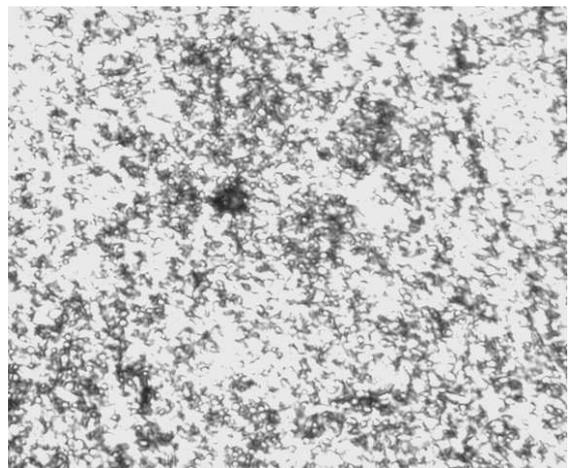


Figure IV .36.g. Microstructure au cœur de la bague intérieure / arbre x 500.

Figure IV.36. Microstructure superficielle et au cœur du roulement QJ1244 début d'usure.



(a)



(b)

Figure IV.37.a. Microstructure superficielle de la bille grossissement x 800 :

(a) sombre, (b) clair.

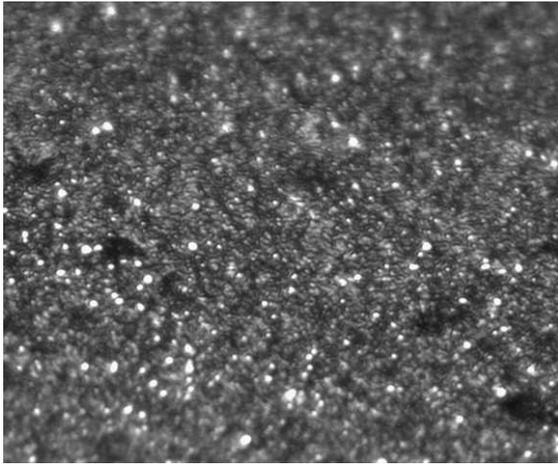


Figure IV .37.b. Microstructure superficielle de la bague extérieure x 800

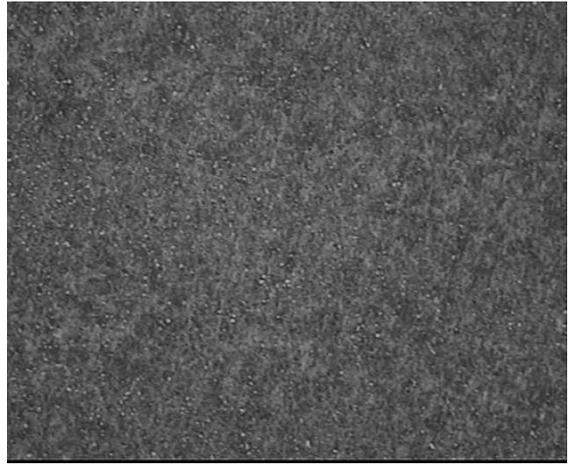


Figure IV .37.c. Microstructure au cœur de la bague extérieure x 500.

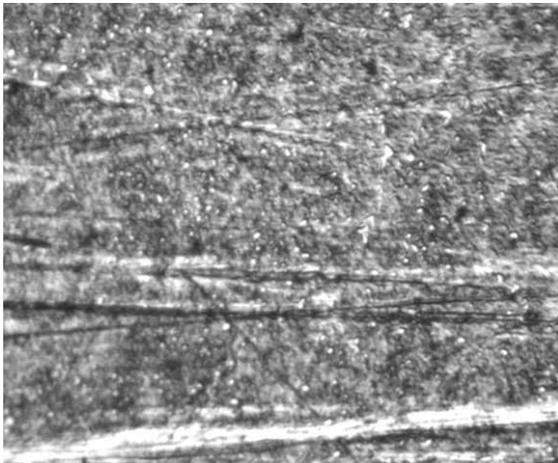


Figure IV.37.d. Microstructure superficielle de la bague intérieure / bille x 800.

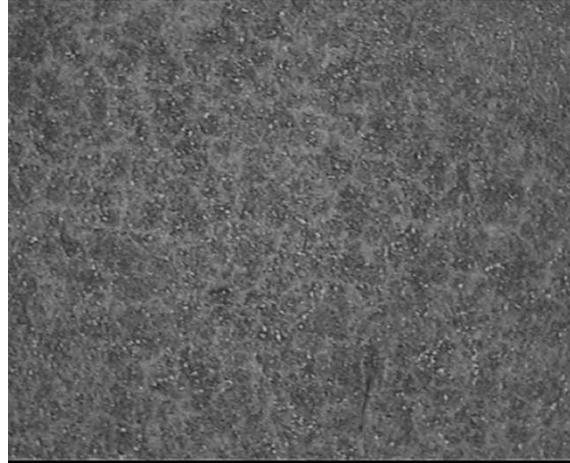


Figure IV.37.e. Microstructure au cœur de la bague intérieure / bille x 500.

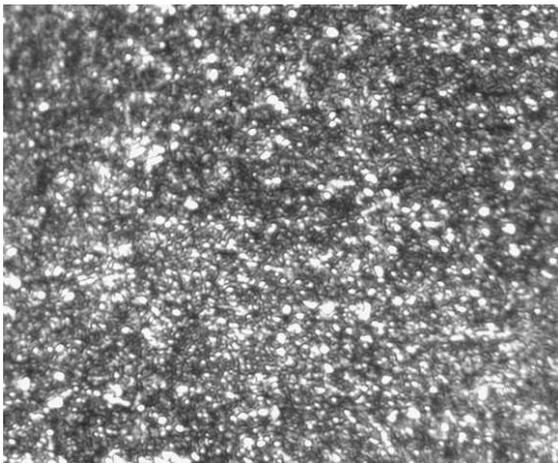


Figure IV.37.f. Microstructure superficielle de la bague intérieure / arbre x800.

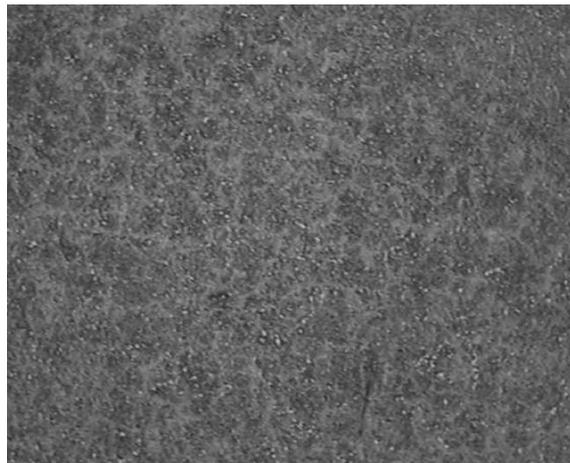


Figure IV.37.g. Microstructure au cœur de la bague intérieure / arbre x 500.

Figure IV.37. Microstructure superficielle et au cœur du roulement QJ1244 usé (écaillage).

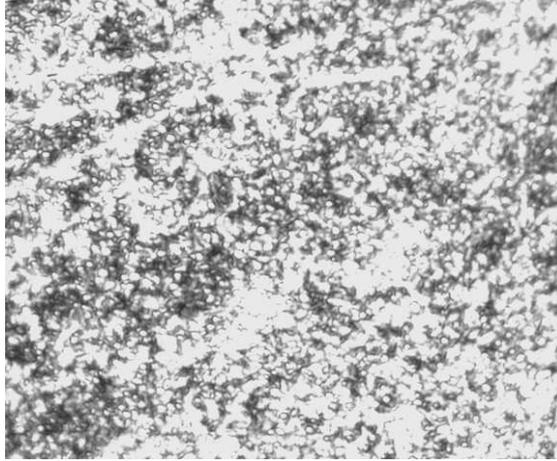


Figure IV.38.a. Microstructure superficielle du rouleau grossissement x 800.

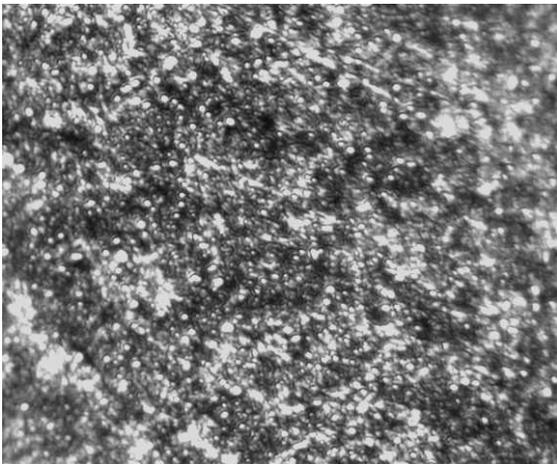


Figure IV.38.b. Microstructure superficielle de la bague extérieure x 800.

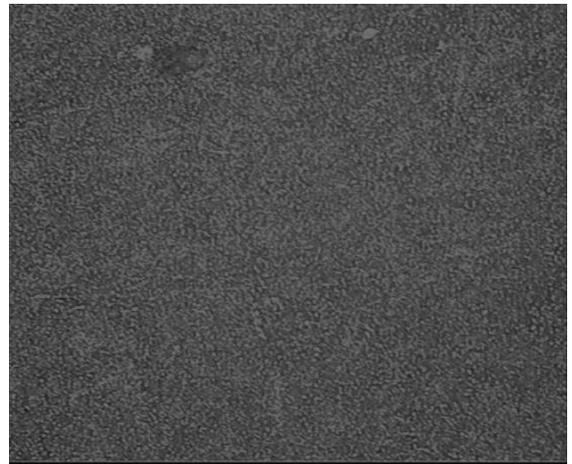


Figure IV.38.c. Microstructure au cœur de la bague extérieure x 500.

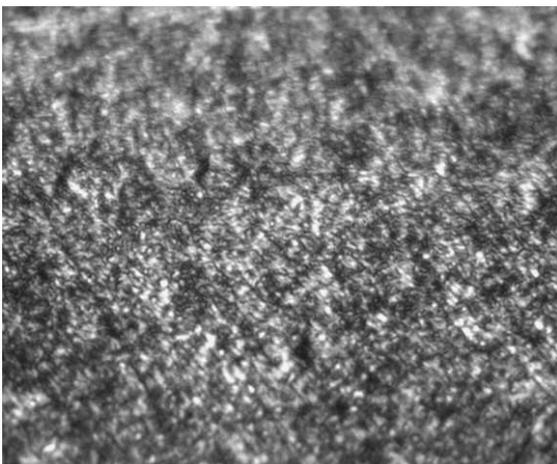


Figure IV.38.d. Microstructure superficielle de la bague intérieure / rouleau x 800.

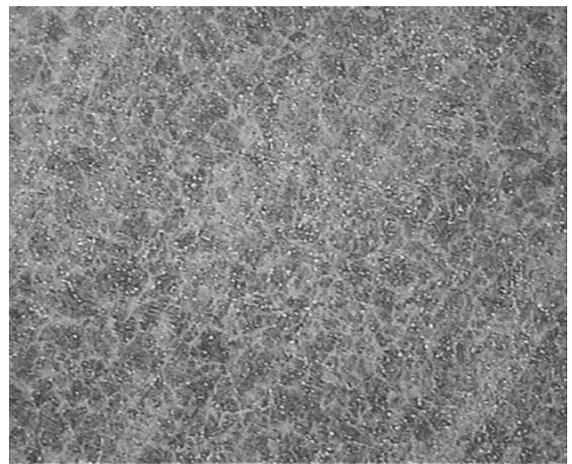


Figure IV.38.e. Microstructure au cœur de la bague intérieure / rouleau x 500.

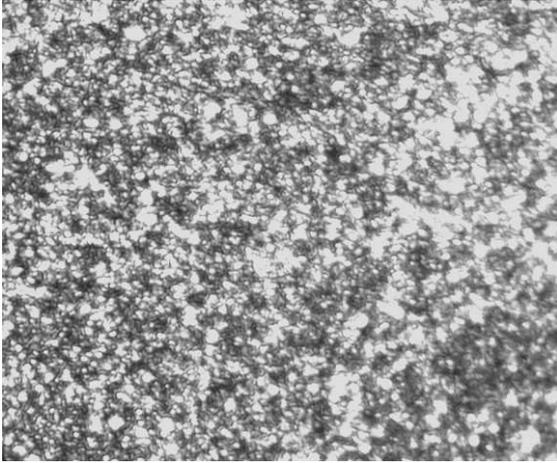


Figure IV.38.f. Microstructure superficielle de la bague intérieure / arbre x 800.

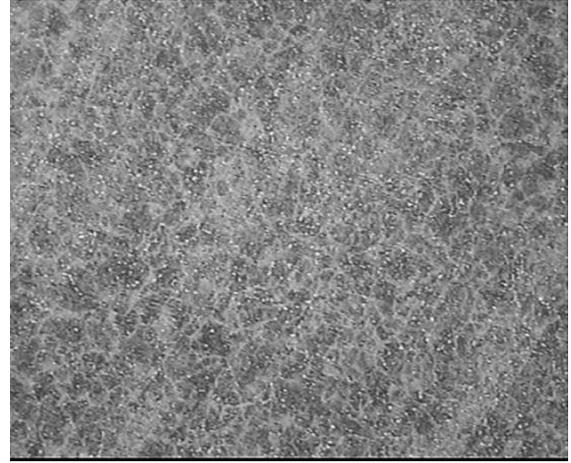


Figure IV.38.g. Microstructure au cœur de la bague intérieure / arbre x 500.

Figure IV.38. Microstructure superficielle et au cœur du roulement SKF22248 CC/N1W33C3.

Dans les figures on peut remarquer que La microstructure des roulements contient de la martensite finement aciculaire avec une forte densité de carbures fins, de manière uniformément distribués.

La présence des carbures dans la microstructure (hétérogène) du 100Cr6 a tendance à freiner le mouvement des dislocations lors de la déformation plastique. Pour franchir ces dislocations, la contrainte doit être élevée.

IV.5 Conclusion

Il existe deux types d'usure des roulements : le premier est un mode d'endommagement continue, quand les interactions entre les rugosités de surface des matériaux en contact peuvent avoir lieu. Ce mode d'endommagement amène un enlèvement de matière à chaque cycle de chargement. Le second mode est l'usure par un troisième corps, des débris d'usure en suspension dans l'huile par exemple. Ce sont les particules d'usure très dures qui usinent les matériaux en contact.

L'écaillage provient de la propagation des fissures à travers l'épaisseur du matériau, fissure s'initiant généralement en sous-couche à la profondeur d'hertz. Il dépend de la contrainte de cisaillement à la surface et de l'épaisseur du film d'huile.

Le chapitre cinquième sera consacré à l'application de la méthode des réseaux de neurones pour le diagnostic des défauts d'un réducteur DMGH 25.4 d'un broyeur ciment horizontal de l'Algérienne Company Ciment (A C C).

Chapitre V Diagnostic des défauts par un Couplage analyse vibratoire-réseaux de neurones artificiels.

Application à un réducteur d'un broyeur horizontal.

Les arrêts forcés de production suite à des pannes de machines peuvent être coûteux et représentent une part importante de l'investissement initial. En plus, l'absence d'une stratégie de maintenance peut causer la perte des éléments d'un processus et provoquer une diminution de la sécurité, d'où son intérêt stratégique.

Un système expert de suivi de comportement est notamment constitué d'un outil d'automatisation du diagnostic évitant à l'utilisateur d'interpréter en permanence les signaux de mesures. L'étude bibliographique a montré l'efficacité des réseaux de neurones pour répondre à cette fonction, et nous présenterons ici une application à partir des mesures effectuées sur un réducteur d'un broyeur horizontal DMGH 25.4 d'une cimenterie.

Le travail dont l'objectif est d'établir des éléments de diagnostic de défauts isolés d'engrenages et roulements a été réalisé à partir d'expérimentation.

La première partie du chapitre, nous développerons le déroulement de la campagne de mesures. Une première étude permettra de détailler l'influence de défauts isolés sur les signaux vibratoires, nous comparerons les résultats obtenues avec ceux décrits dans la bibliographie.

Enfin, dans la deuxième partie, une démarche de diagnostic par réseaux de neurones mettant en application les éléments définis est présentée, constituant un outil d'aide au diagnostic.

V.1 Campagnes de mesures et interprétations

Dans cette étude s'en intéresse aux défauts de roulements et engrenages isolées. Pour analyser les vibrations engendrées par les organes du réducteur, les mesures ont été effectuées selon trois directions (axial, horizontal, vertical) en huit points des paliers des arbres (figure V.1 pour plus de détail voir paragraphe IV.3.1.3) en utilisant un accéléromètre A0760GP SNP66223. L'acquisition du signal a été faite par un appareil de mesure vibratoire CSI 2130 machinery health analyser (figure V.2), avec un temps d'échantillonnage T_e égal à 0,78Hz. Cet appareil permet à partir d'un signal reçu par l'accéléromètre, non seulement de transformer le signal ou de calculer le spectre d'accélération, mais d'effectuer l'intégration pour obtenir l'information en mode vitesse. L'analyse spectrale a été faite en utilisant le logiciel A.M.S. Suite.

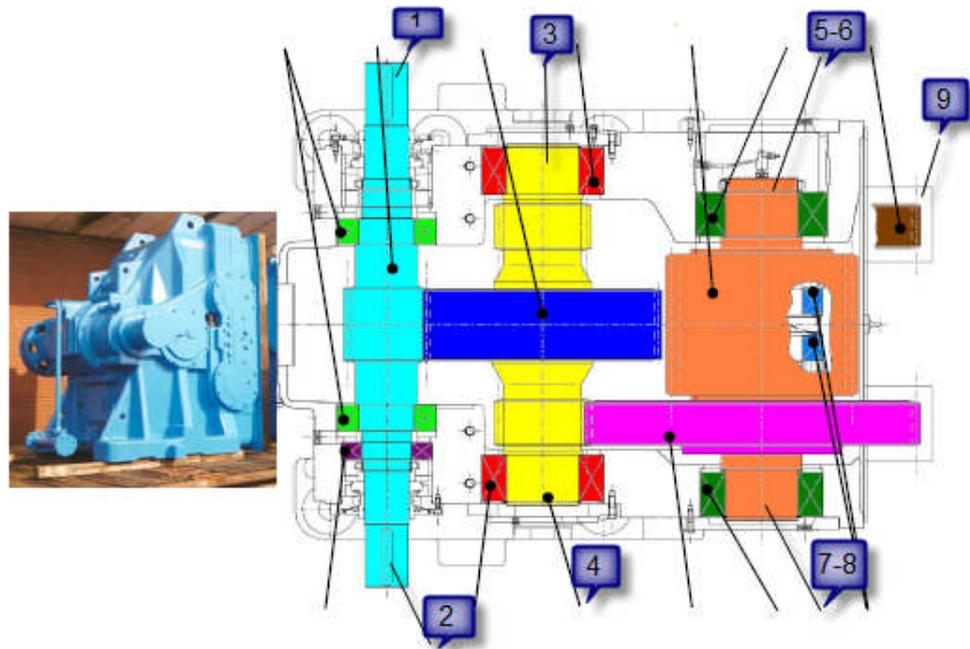


Figure V.1. Points de mesures des signaux vibratoires [82].



Figure V.2. Analyseur CSI 2130.

Les caractéristiques des roulements sont [83] :

-Roulement SKF QJ 1244 N2MA :

- nombre des billes : 15 ; - diamètre bille : 57,15 mm
- diamètre piste : 310 mm ; - angle de contact : 45°

-Roulement SKF 22248 CC / N1W33C3 :

- nombre des rouleaux : 19 ; - diamètre rouleau : 49,9999 mm
- diamètre piste : 345,97 mm ; - angle de contact : 10,08°

-Roulement SKF 23264CAC / W33 :

- nombre des rouleaux : 18 ; - diamètre rouleau : 64 mm
- diamètre piste : 458,4 mm ; - angle de contact : 13,08°.

Après calcul, les fréquences typiques de défauts de roulements (Tableau .1) et engrènements sont :

-Roulement SKF QJ 1244 N2MA :

Composant en défaut	Fréquence de défaut (Hz)
FC ARBR 1-IB	7,20
FRB ARBR 1-IB	44,17
FEPB ARBR 1-IB	100,85
FIPB ARBR 1-IB	131,08

-Roulement SKF 22248 :

Composant en défaut	Fréquence de défaut (Hz)
FC ARBR 1-IB	7,06
FRB ARBR 1-IB	53,84
FEPB ARBR 1-IB	134,05
FIPB ARBR 1-IB	180,72
FC ARBR 1-OB	7,06
FRB ARBR 1-OB	53,84
FEPB ARBR 1-OB	134,05
FIPB ARBR 1-OB	180,72

-Roulement SKF TOR F-3164-G :

Composant en défaut	Fréquence de défaut (Hz)
FC ARBR 2-IB	3,10
FRB ARBR 2-IB	24,06
FEPB ARBR 2-IB	55,74
FIPB ARBR 2-IB	75,05
FC ARBR 2-OB	3,10
FRB ARBR 2-OB	24,06
FEPB ARBR 2-OB	55,74
FIPB ARBR 2-OB	75,05

-Roulement SKF 23264 CAC :

Composant en défaut	Fréquence de défaut (Hz)
FC ARBR 3-IB	0,88
FRB ARBR 3-IB	7,20
FEPB ARBR 3-IB	15,92
FIPB ARBR 3-IB	20,92

-Roulement SKF TOR-F-3164-G :

Composant en défaut	Fréquence de défaut (Hz)
FC ARBR 3-OB	0,87
FRB ARBR 3-OB	6,78
FEPB ARBR 3-OB	15,70
FIPB ARBR 3-OB	21,14

-Roulement SKF 23264 CAC :

Composant en défaut	Fréquence de défaut (Hz)
FC ARBR 4-IB	0,88
FRB ARBR 4-IB	7,20
FEPB ARBR 4-IB	15,92
FIPB ARBR 4-IB	20,92

-Roulement SKF TOR-F-3164-G :

Composant en défaut	Fréquence de défaut (Hz)
FC ARBR 4-OB	0,87
FSB ARBR 4-OB	6,78
FEPB ARBR 4-OB	15,70
FIPB ARBR 4-OB	21,14

Tableau .1 : Les fréquences typiques de défauts de roulements.

Où :

FC : défaut cage ;

FSB : défaut bille (rouleau) ;

FEPB : défaut bague extérieure ;

FIPB : défaut bague intérieure.

Fréquence d'engrènement ARBR 1 et ARBR 2 : 414,17 Hz

Fréquence d'engrènement ARBR 2 et ARBR 3 : 145,32 Hz

Fréquence d'engrènement ARBR 2 et ARBR 4 : 145,32 Hz

Fréquence d'engrènement ARBR 3 et couronne : 63,45 Hz.

V.1.1 Le suivi de tendance

Une approche économique mais efficace de la maintenance conditionnelle peut être faite par le suivi de tendance. Les mesures de tendance (le niveau global accélération (NGA), ou le niveau global vitesse (NGV)) sont faites et enregistrées à intervalles réguliers et elles sont comparées à des niveaux d'alerte et d'alarme (voir Tableau V.2 et Tableau V.3 selon la norme ISO10816-3). L'augmentation du niveau vibratoire est un signe de l'existence d'une anomalie et de faire une première idée des types de défauts qui affectent le système, mais ne permet pas d'établir un diagnostic précis. Ce type de mesure globale est considéré comme de niveau 1. Il permet la surveillance du système sans investissement important en matériel et en personnel.

Point de mesure	ATTENTION	Alarme	Défaut
<i>G 1 axial</i>	5.7500	7.1000	11.2000
<i>G 1 horizontal</i>	3.4700	7.1000	11.2000
<i>G 1 vertical</i>	3.1600	7.1000	11.2000
<i>G 2 axial</i>	6.6168	7.1000	11.2000
<i>G 2 horizontal</i>	2.8371	7.1000	11.2000
<i>G 2 vertical</i>	3.6000	7.1000	11.2000

Tableau V.2 : Seuils RMS (mm/s) pour arbre à grande vitesse GV.

Point de mesure	ATTENTION	Alarme	défaut
<i>G 1 axial</i>	0.2	0.8	1.00
<i>G 1 horizontal</i>	0.2	0.8	1.00
<i>G 1 vertical</i>	0.2	0.8	1.00
<i>G 2 axial</i>	0.2	0.8	1.00
<i>G 2 horizontal</i>	0.2	0.8	1.00
<i>G 2 vertical</i>	0.2	0.8	1.00

Tableau V.3 : Seuils RMS (g) pour arbre à grande vitesse GV.

La figure V.3 et figure V.4 montrent l'évolution du niveau globale de vitesse de vibration de l'arbre GV (point 1 et 2 selon les trois directions), on observe que la valeur globale de la vitesse de l'arbre GV dépasse un seuil et cela nous indique qu'un défaut est présent. Pour le suivi des autres points voir annexe II.

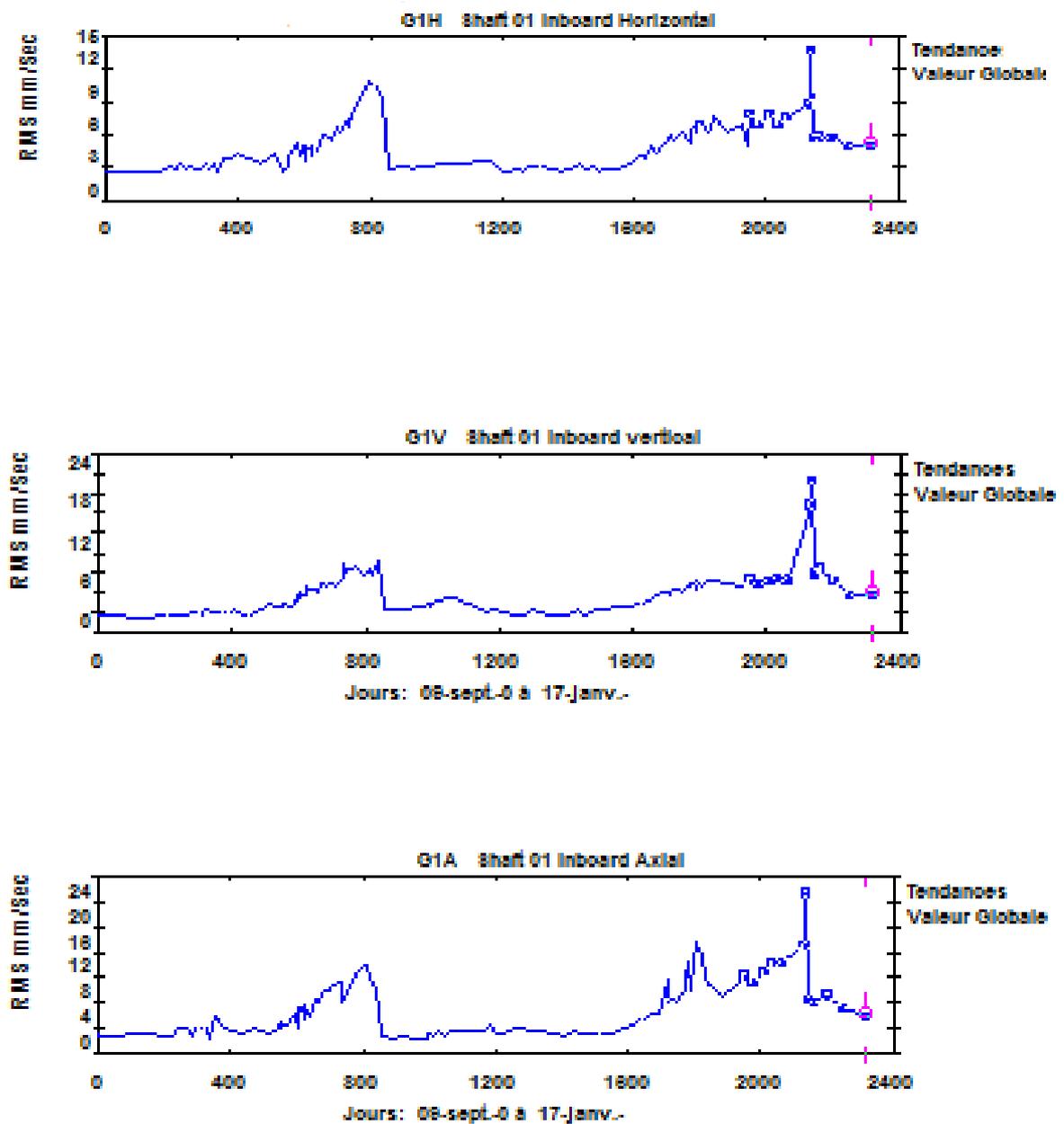


Figure V.3.a. Tendance point 1 09/09/2004-17/01/2011.

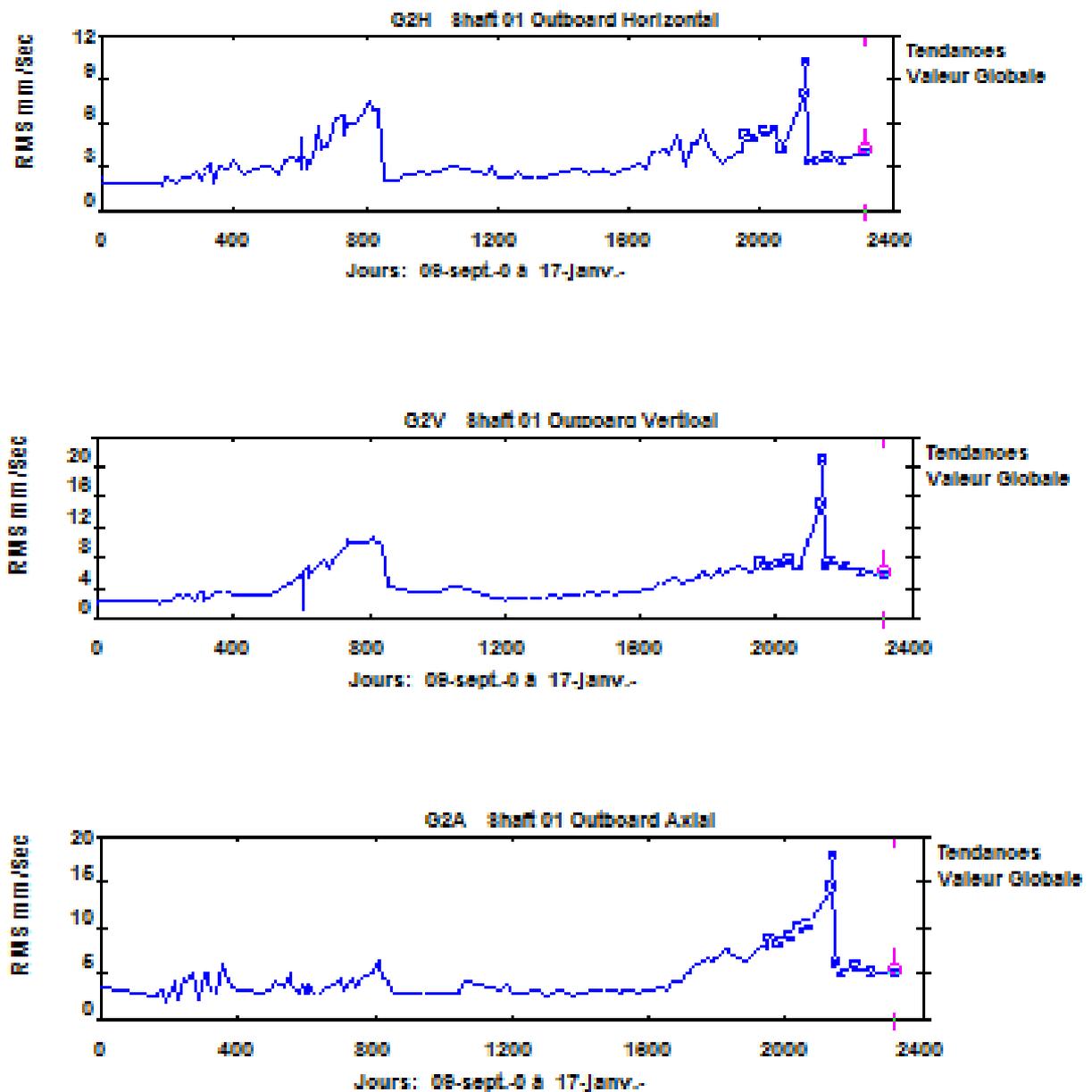


Figure V.3.b. Tendance point 2 09/09/2004-17/01/2011.

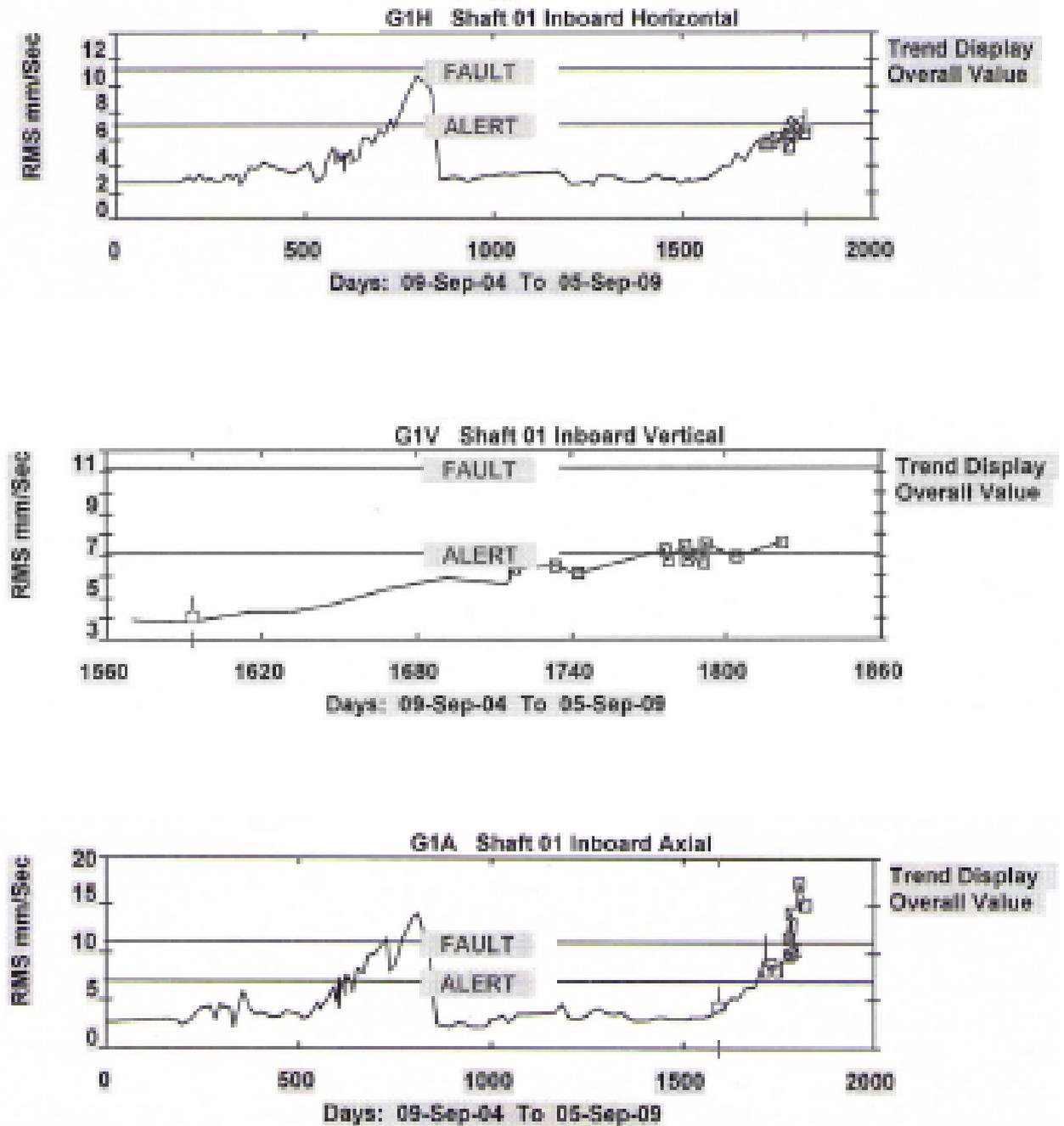


Figure V.4.a. Tendence point 1 09/09/2004-05/09/2009.

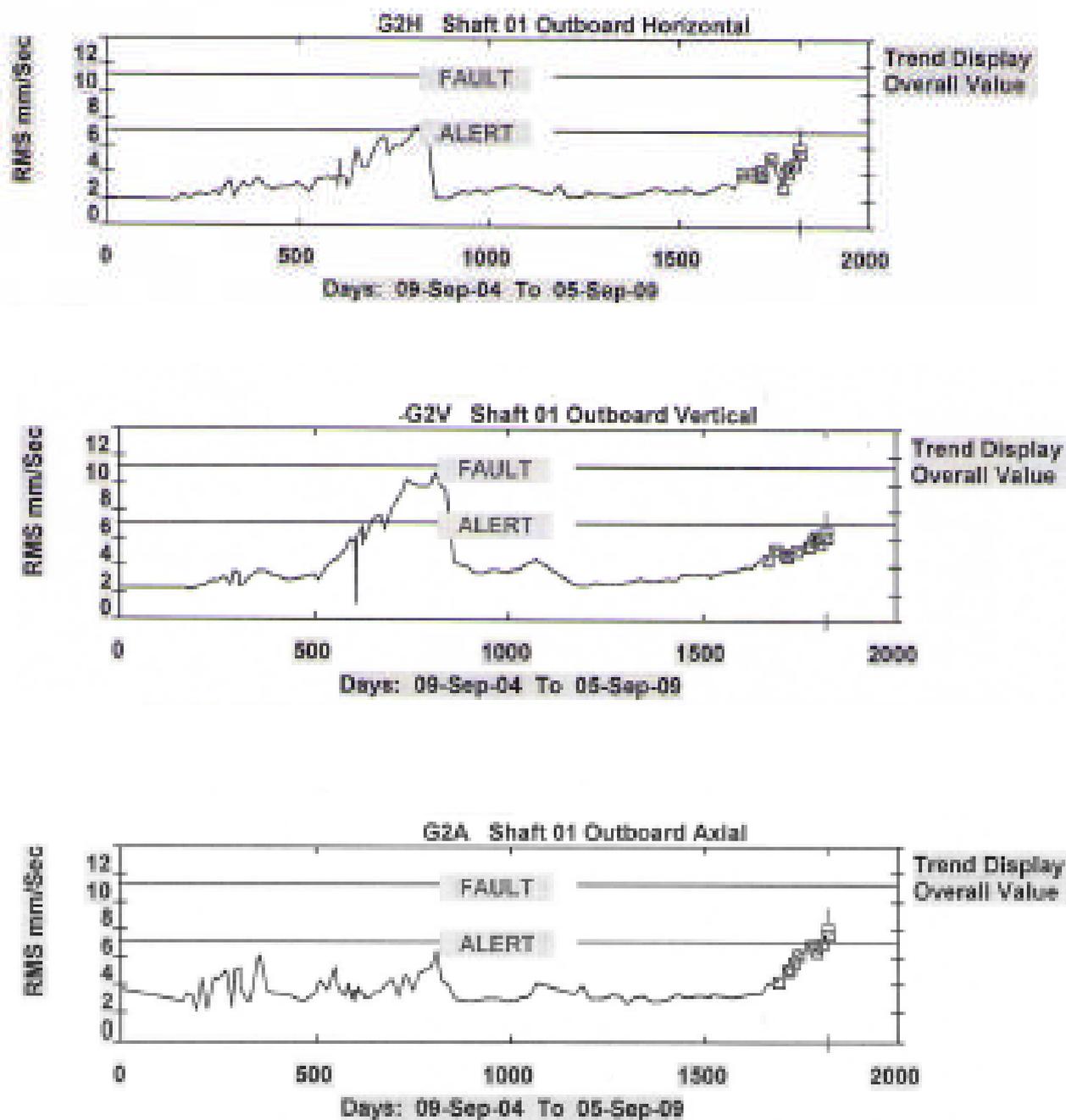


Figure V.4.b. Tendence point 2 09/09/2004-05/09/2009.

Liste de points en tendance

Point de mesure G1H --> Shaft 01 Inboard Horizontal

Paramètre: Valeur Globale (RMS mm/Sec)

DATE	HEURE	VALEUR
09-sept.-04	04:26	2.76
10-sept.-04	08:58	2.78
17-févr.-05	13:53	2.73
27-févr.-05	15:41	2.83

08-mars-05	10:36	2.95
20-mars-05	10:41	3.17
07-avr.-05	10:54	2.87
20-avr.-05	13:23	3.34
09-mai-05	12:10	2.86
17-mai-05	17:14	3.05
08-juin-05	11:26	2.83
22-juin-05	16:09	2.98
02-juil.-05	15:09	3.30
12-juil.-05	14:02	3.23
13-juil.-05	10:30	2.97
28-juil.-05	09:29	3.28
08-août-05	16:11	2.54
01-sept.-05	11:51	3.92
20-sept.-05	10:44	3.80
06-oct.-05	10:51	4.22
20-oct.-05	11:59	4.11
14-nov.-05	09:59	3.77
08-déc.-05	09:21	3.59
23-déc.-05	15:08	3.40
18-janv.-06	14:40	3.89
02-févr.-06	09:18	4.30
22-févr.-06	09:27	2.71
12-mars-06	09:29	3.23
17-mars-06	10:28	4.09
06-avr.-06	12:26	5.34
16-avr.-06	11:33	4.17
24-avr.-06	11:06	5.07
27-avr.-06	10:52	4.38
29-avr.-06	10:49	4.64
03-mai-06	11:26	4.76
06-mai-06	16:32	3.55
09-mai-06	17:28	4.93
10-mai-06	10:19	4.63
23-mai-06	10:02	5.19
25-mai-06	10:21	4.13
25-mai-06	17:06	4.84
27-mai-06	10:29	4.53
08-juin-06	09:40	4.49
23-juin-06	11:30	6.10
08-juil.-06	09:53	6.11
22-juil.-06	10:36	5.66
07-août-06	10:38	6.76
21-août-06	10:02	6.36
07-sept.-06	10:29	7.46
16-sept.-06	12:33	6.81
26-sept.-06	11:03	7.74
17-oct.-06	11:22	9.23
13-nov.-06	10:53	10.78
27-nov.-06	10:19	10.42
07-déc.-06	14:28	10.36
27-déc.-06	09:07	9.26
15-janv.-07	10:25	2.96
20-févr.-07	09:02	3.16
12-mars-07	13:51	3.09
27-mars-07	08:46	2.83
16-avr.-07	09:49	3.04
06-mai-07	10:11	3.17
26-mai-07	16:07	3.18
04-juin-07	13:28	3.20
14-juin-07	10:24	3.36
05-juil.-07	14:39	3.43
21-juil.-07	10:03	3.33
12-août-07	11:16	3.45
16-nov.-07	10:13	3.55
09-déc.-07	09:00	3.24
25-déc.-07	10:01	2.60
13-janv.-08	14:41	2.63

09-févr.-08	14:05	2.88
23-févr.-08	12:03	2.56
09-mars-08	13:56	3.20
30-mars-08	11:17	3.23
20-avr.-08	11:10	3.18
09-mai-08	10:57	2.97
02-juin-08	10:32	2.83
18-juin-08	11:21	2.79
16-juil.-08	10:47	2.98
11-août-08	17:01	3.31
02-sept.-08	11:05	2.96
24-sept.-08	11:29	3.05
16-oct.-08	10:23	2.64
05-nov.-08	09:23	3.02
05-nov.-08	11:31	2.90
07-déc.-08	09:38	2.97
27-déc.-08	09:44	3.12
19-janv.-09	10:27	3.53
10-févr.-09	09:49	4.02
26-févr.-09	10:06	3.98
14-mars-09	14:06	4.98
04-avr.-09	10:28	4.35
27-avr.-09	10:41	5.40
21-mai-09	15:18	6.05
23-mai-09	12:44	5.65
08-juin-09	12:26	5.79
17-juin-09	10:04	6.19
21-juil.-09	19:14	5.38
22-juil.-09	15:25	6.39
29-juil.-09	10:41	6.79
30-juil.-09	10:40	7.07
02-août-09	12:33	6.32
05-août-09	15:00	7.21
06-août-09	15:06	7.06
18-août-09	11:07	7.20
05-sept.-09	11:36	6.38
18-sept.-09	11:52	6.66
27-sept.-09	11:02	7.67
03-nov.-09	09:30	6.31
19-déc.-09	10:05	7.00
06-janv.-10	15:52	5.12
12-janv.-10	10:09	7.94
08-févr.-10	09:20	7.02
17-mars-10	09:42	7.95
13-avr.-10	10:00	6.94
03-mai-10	10:05	7.67
14-juil.-10	11:50	8.76
16-juil.-10	11:25	13.68
27-juil.-10	11:08	5.82
16-août-10	10:30	5.86
21-sept.-10	11:08	5.79
09-nov.-10	09:09	5.05
17-janv.-11	11:51	5.06

ALARMES:	ATTENTION	ALERTE	DEFAUT
	3.47	7.10	11.20

V.1.2 L'analyse spectrale

Les mesures de niveau 1 ne sont pas toujours suffisantes pour une localisation des défauts. Afin de localiser les défauts, les spectres des points seront évalués dans les trois directions.

La figure V.5 représente le spectre de l'image vibratoire du point 2 selon les trois directions dans la gamme fréquentielle [0-10000KH] avec l'accélération en (g).

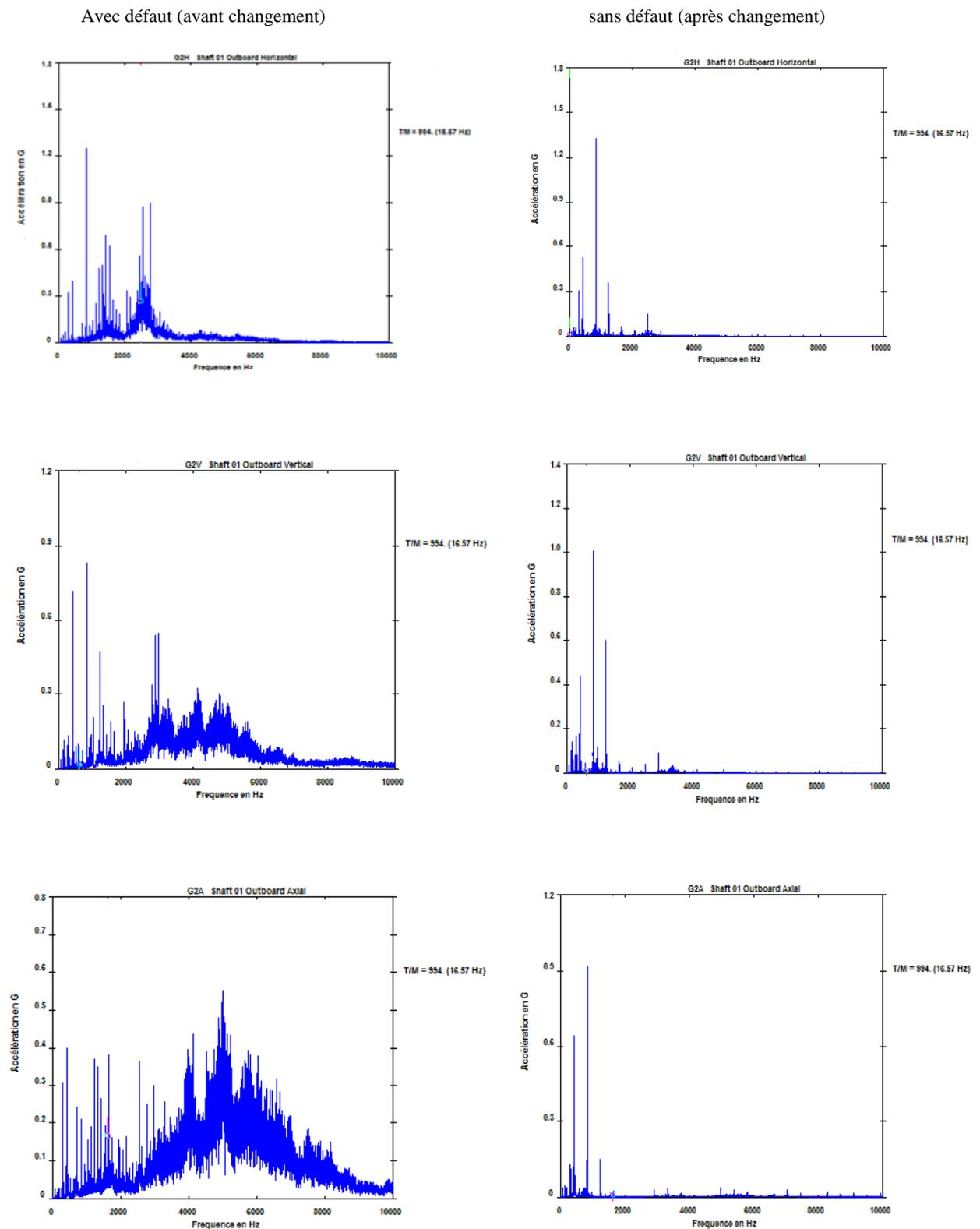


Figure V.5.a. Spectres des signaux vibratoires du point 2 avec et sans défaut.

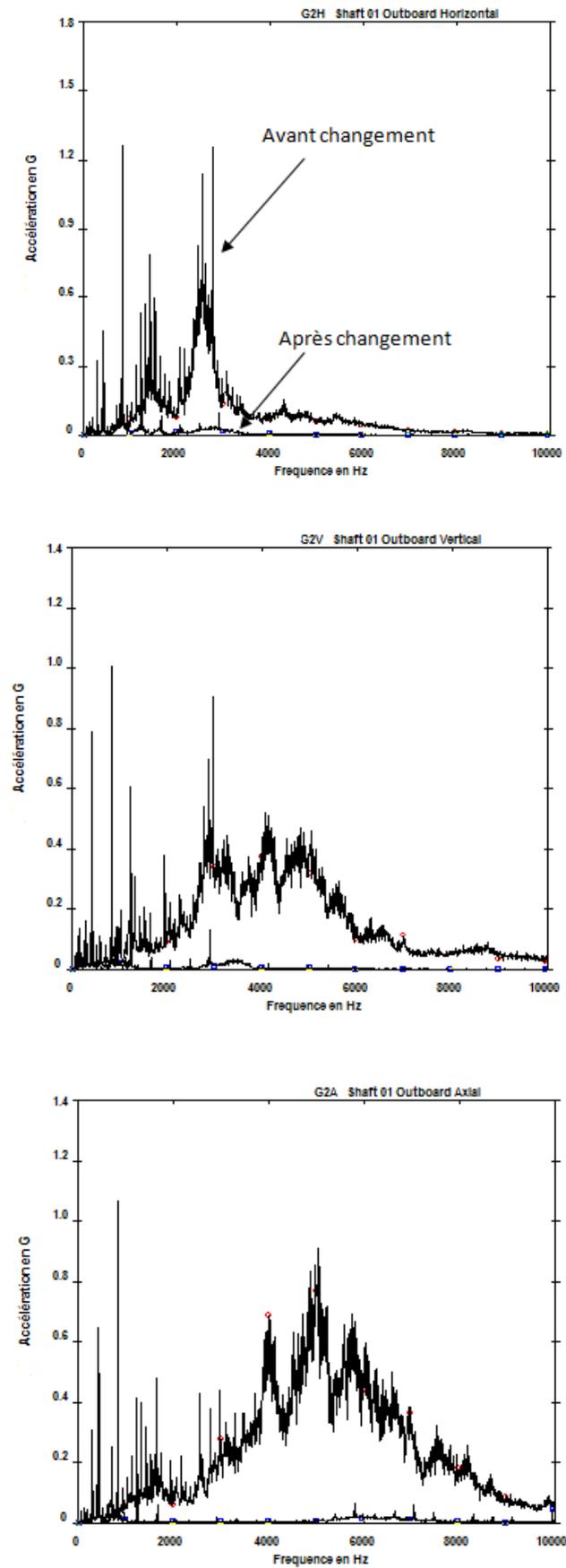


Figure V.5.b. Spectres superposés des signaux vibratoires du point 2 avec et sans défaut.

La figure V.6 présente le spectre d'enveloppe avant changement (avec défaut) et après changement (sans défaut) qui permet de déterminer la caractéristique cinématique du défaut.

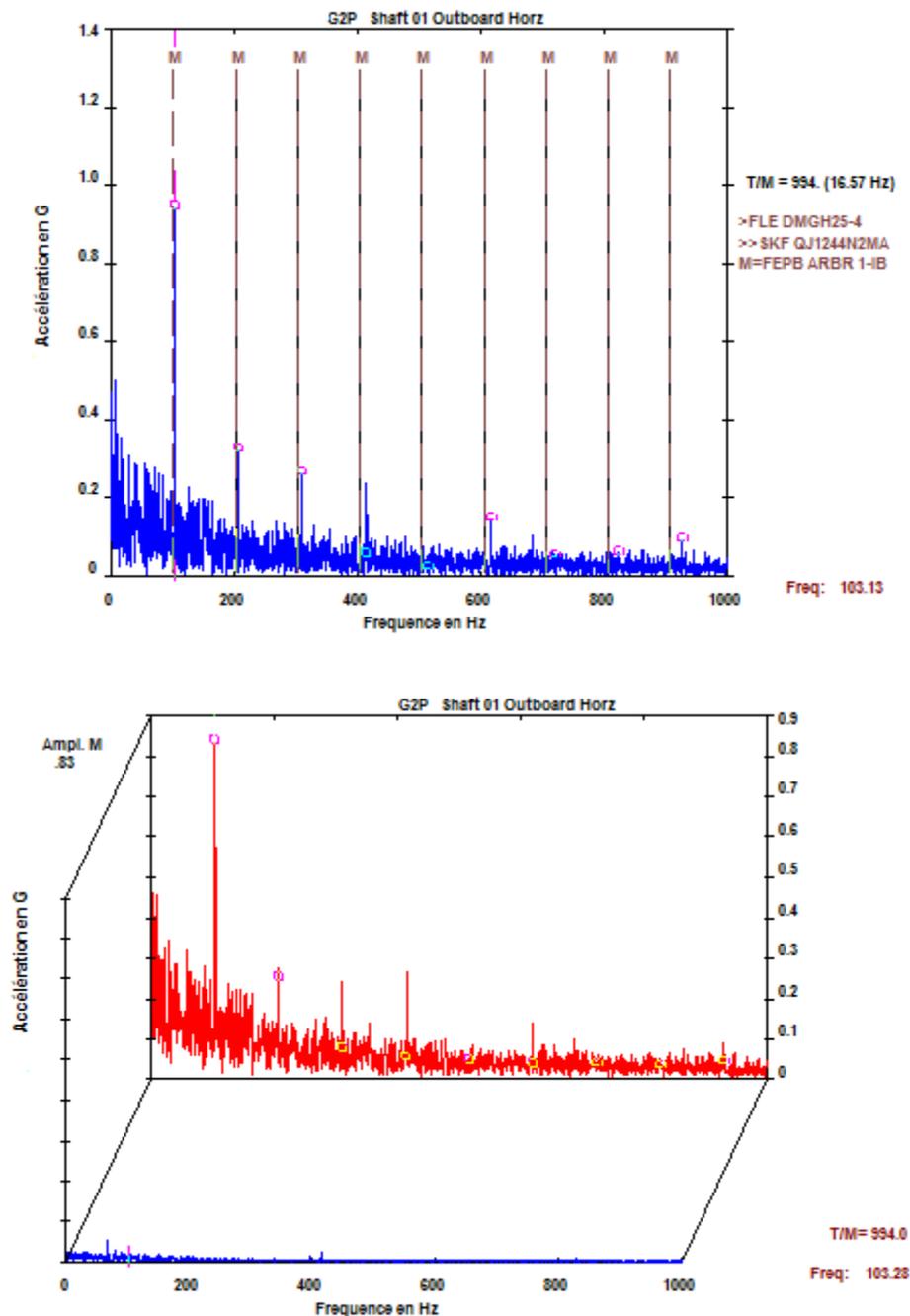
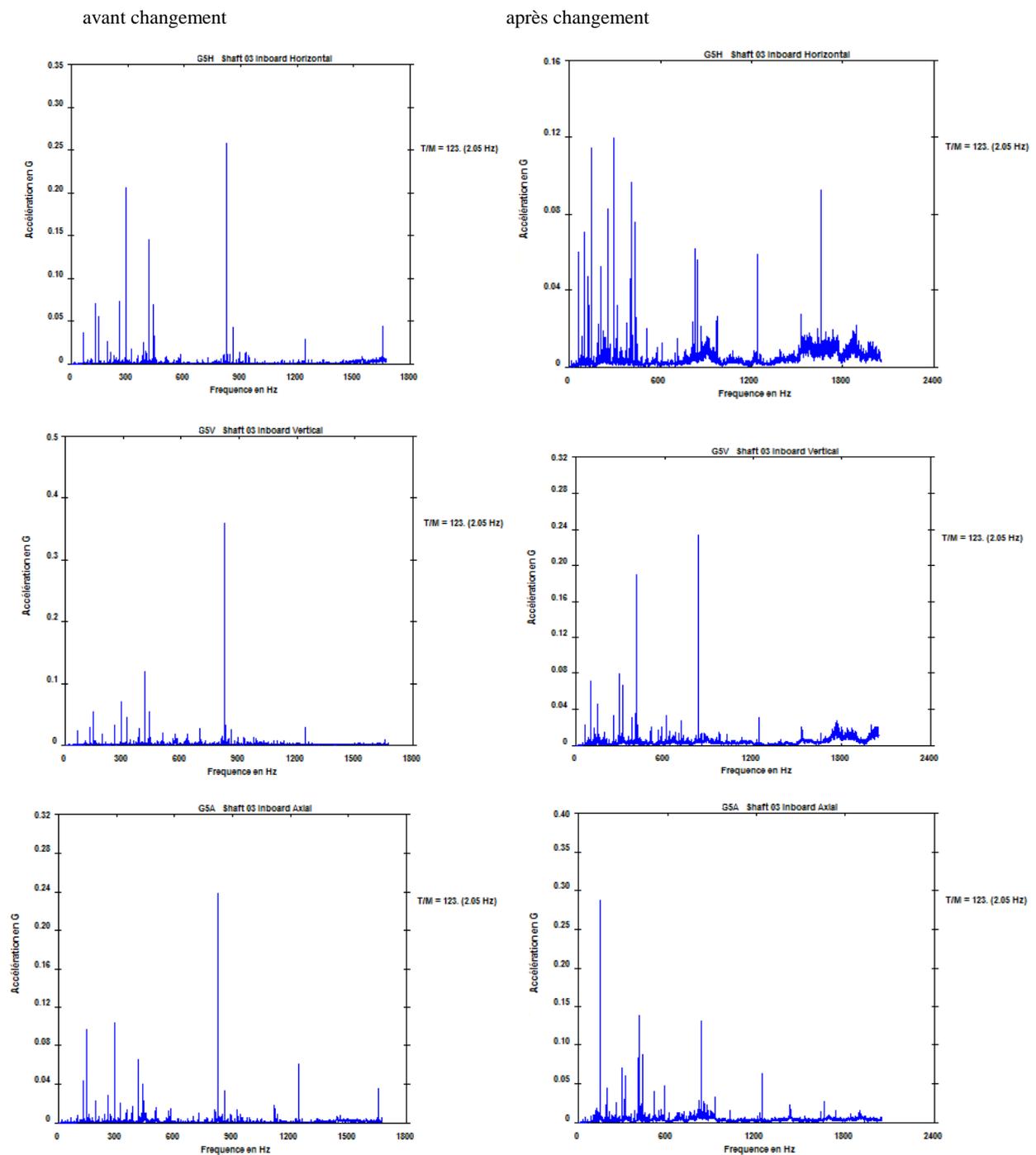


Figure V.6. Spectre d'enveloppe superposés des signaux vibratoires du point 2 avec et sans défaut.

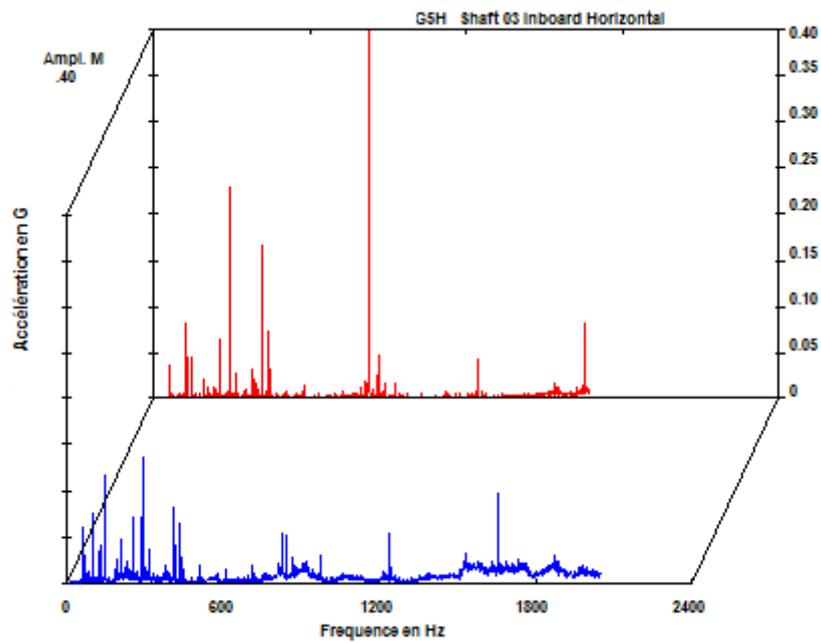
Nous observons que les spectres sont aplatis en absence du défaut, par contre, nous observons des pics de chocs on présence du défaut.

Le défaut est dû à l'usure de la bague extérieure du roulement QJ1244 N2MA, du fait que nous observons des pics de chocs aux hautes fréquences au voisinage de la fréquence du passage du défaut de la bague extérieure $M=FEPB$ ARBR1-IB.

De même, les figures V.7 présentent l'image d'un défaut d'usure de la bague extérieure du roulement 23264 CAC.



Figures V.7.a. Spectres des signaux vibratoires du point 5 avec et sans défaut.



Figures V.7.b. Spectres superposés des signaux vibratoires du point 5 horizontal avec et sans défaut

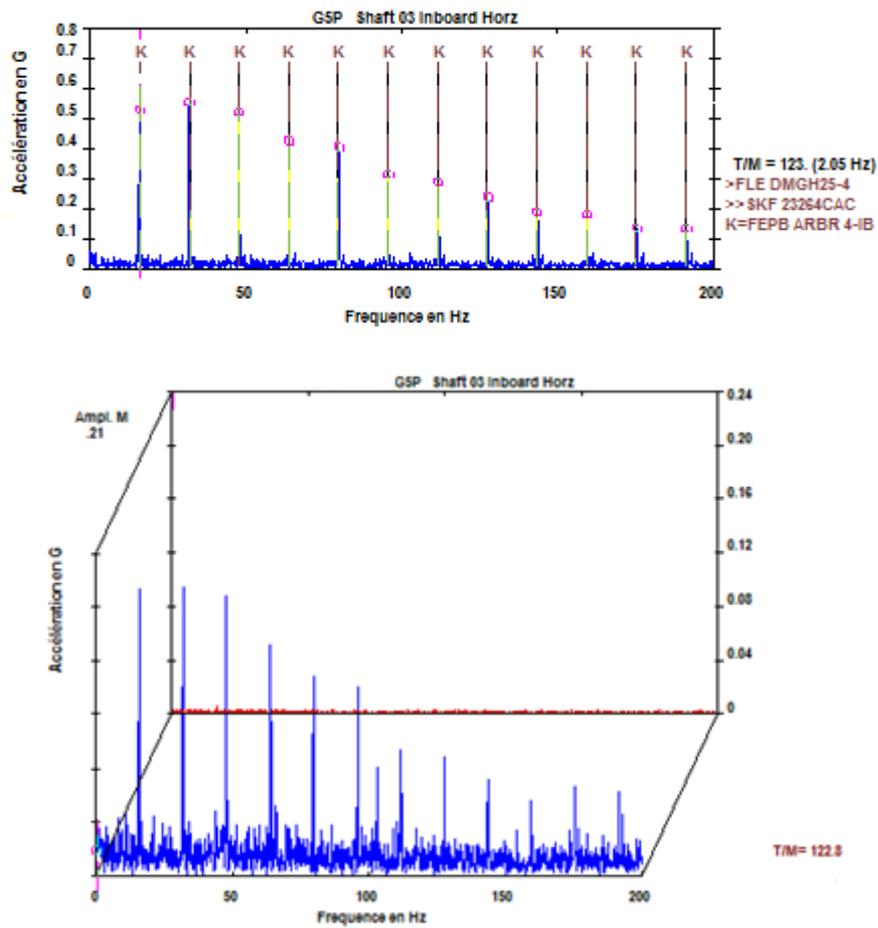


Figure V.8. Spectres d'enveloppes des signaux vibratoires du point 5 horizontal avec et sans défaut.

Il est à noter qu'en raisonnant sur l'amplitude du signal, la signature des défauts de roulement ne se propage pas à travers tout le système mécanique. Les défauts de roulements provoquent une augmentation sur l'amplitude des accélérations dans le palier où ils sont logés. En effet, dans le cas des défauts importants, leur effet peut se répercuter sur les paliers voisins, portés par le même arbre, à des vitesses très élevées. Les accélérations mesurées sur autre arbre (en liaison engrenage avec l'arbre porteur du défaut de roulement) ne sont pas affectées par les avaries.

Les figures suivantes présentent un défaut d'engrènement (détérioration d'une dent du pignon de l'arbre intermédiaire (point de mesure 4 horizontal)).

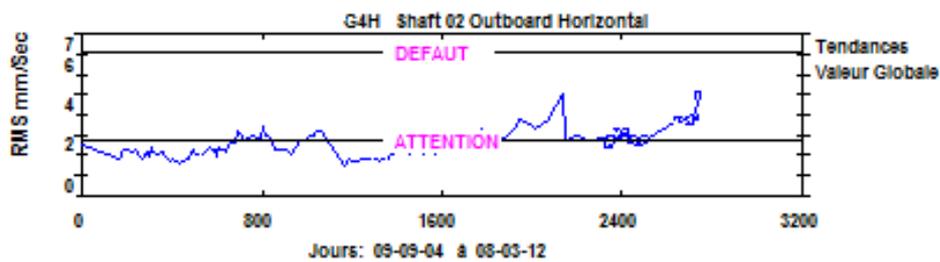


Figure V.9. Tendances point 4 horizontal 09/09/2004-08/03/2011.

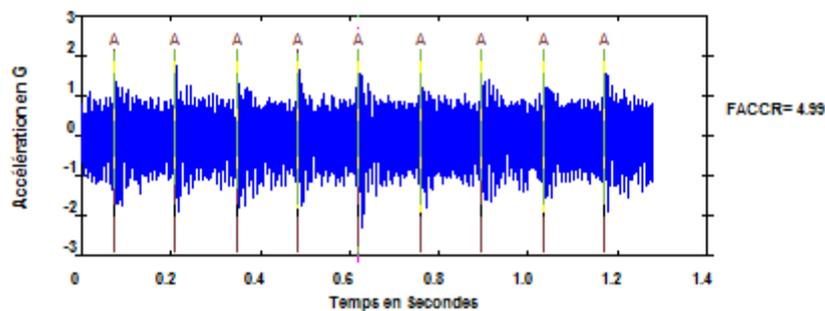


Figure V.10.a. Signal accélération point 4 horizontal avec un défaut d'engrènement.

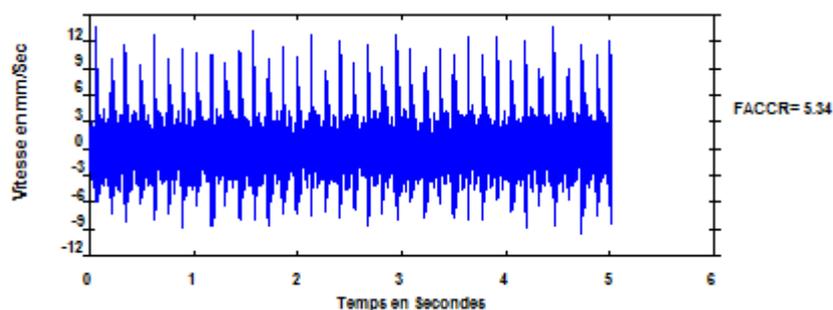


Figure V.10.b. Signal vitesse point 4 horizontal avec un défaut d'engrènement.

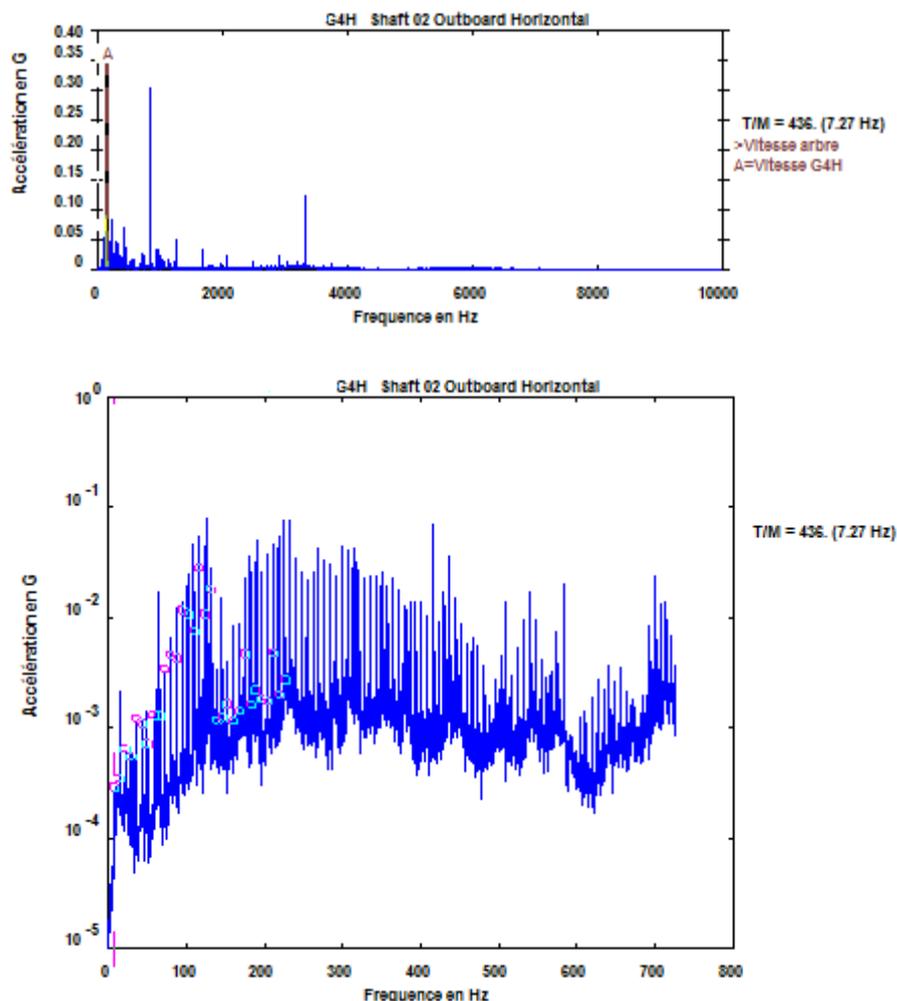


Figure V.10. c. Spectre du signal accélération du point 4 horizontal avec un défaut d'engrènement.

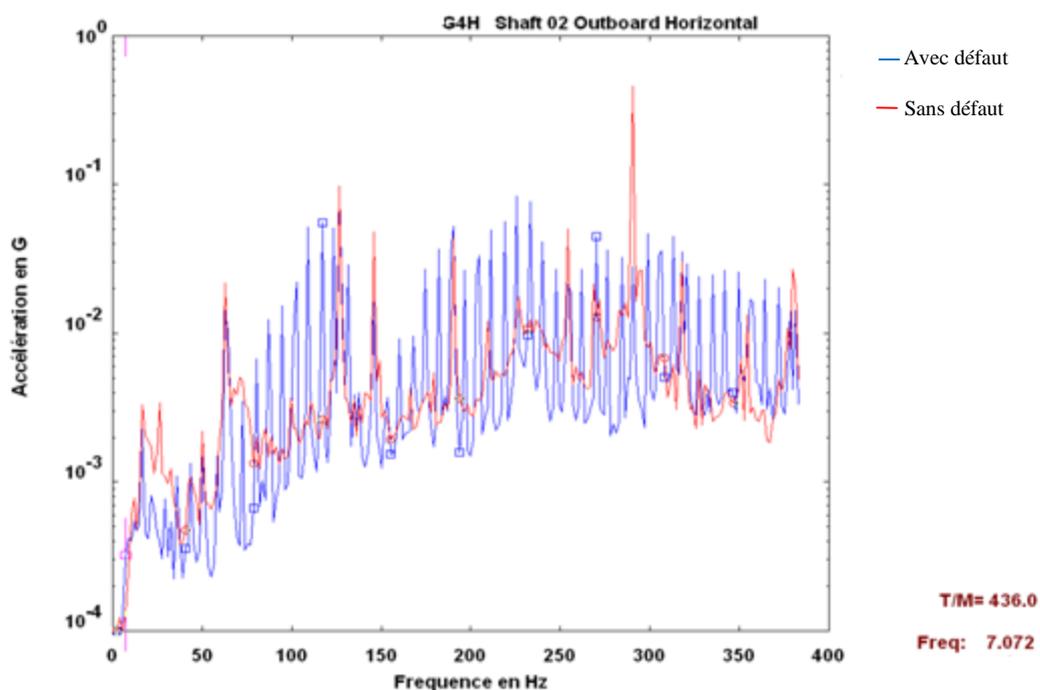


Figure V.10. d. Spectres superposés du point 4 horizontal avec et sans défaut.

Le signal présente par endroit des pics à l'enregistrement par l'accéléromètre de la participation de la dent endommagée à l'engrènement.

V.2 Automatisation du diagnostic par réseaux de neurones

Dans le processus de la maintenance conditionnelle, l'interprétation des signaux vibratoires reste le domaine du spécialiste. Il ressort d'études antérieures [92] que les systèmes experts permettent d'envisager une aide appréciable à la décision durant le processus de la maintenance où les raisonnements ne sont plus bridés par un algorithme. Sachant que ces systèmes experts simulent le raisonnement d'un (ou plusieurs) spécialistes de ce problème et comportent une base de connaissances, sous forme de règles, une base de faits et un moteur d'inférence. Un système expert peut être envisagé si l'on dispose d'une expertise suffisante et si cette expertise est formalisable en termes de règles. Dans le cas où les experts n'arrivent pas à dégager les règles qu'ils utilisent. Elles peuvent être générées à partir des données historiques de la machine et par l'utilisation de l'une des méthodes d'apprentissage automatique. Cette approche est appelée *data mining* qui vise à extraire des connaissances à partir des données [93].

Dans cette étude, on utilise l'approche d'apprentissage par réseaux de neurones, une branche de l'automatisation automatique, qui permet aux opérateurs relativement non qualifiés de prendre des décisions fiables sans connaître le mécanisme du système et analyser les données.

C'est dans ce contexte que s'inscrit cette étude à savoir d'appliquer l'approche des réseaux de neurones sur un ensemble de données issues des mesures réels sur roulements à billes QJ1244 et pignon de l'arbre intermédiaire sans ou avec défauts (défaut sur la bague extérieure et défaut cassure d'une dent du pignon intermédiaire).

V.2.1 Architecture du système automatique de diagnostic des défaillances

L'architecture du système automatique de diagnostic des défaillances, se compose de deux sous systèmes (voir figure V .11) :

- Un sous-système d'acquisition et de traitement de l'information ;
- Un sous-système d'interprétation de l'information.

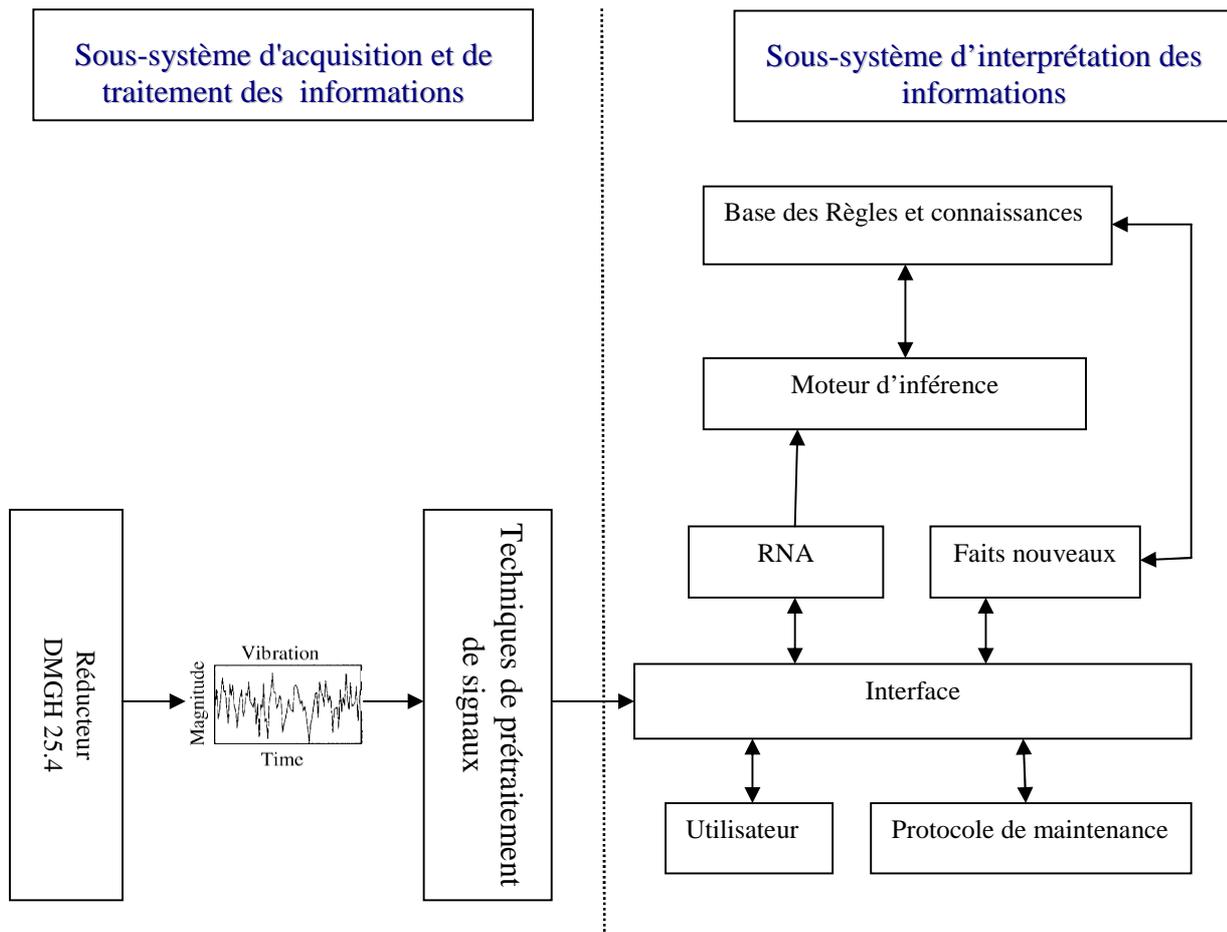


Figure V.11. Architecture du système automatique de diagnostic des défaillances.

V.2.1.1 Sous-système d'acquisition et de traitement de l'information

Le sous-système d'acquisition et de traitement de l'information comporte la chaîne de mesures du signaux des accélérations des huit points suivant les trois directions (dans notre application en se limite au point 2 et 4) et un module de traitement de l'information réalisé à base d'un logiciel d'analyse spectrale (logiciel AMS_{suite}).

V.2.1.2 Sous-système d'interprétation de l'information

Le sous-système d'interprétation de l'information est composé de :

- Un modèle de traitement qui sert à la détection du défaut qui est défini par le système de réseau de neurones ;
- Un système d'aide à la décision.

V.2.1.2.1 système d'aide à la décision

Les principaux éléments du système d'aide à la décision sont les suivants :

a. La base de connaissances (BC)

La base de connaissances, peut être imaginée comme étant pour le système expert, ce que constitue la base de données pour le système de gestion des bases de données (SGBD).

Cependant, une grande différence peut être remarquée: alors qu'une base de données ne contient que des données passives, la base de connaissances, quant à elle, contient à la fois des données passives (les faits) et des données actives (les règles). Ces dernières établissent des relations parmi les faits et déterminent comment les manipuler. L'ensemble des faits et des règles constituent la connaissance dont on dispose sur un sujet donné [94].

En général, les faits sont sous formes de simples énoncés tels que "l'action est un actif" alors que les règles sont de types : (Si "condition(s)" alors "conclusion(s)"). Les faits sont en réalité des règles dégénérées, c'est à dire qu'ils ne sont soumis à aucune condition. L'ensemble des conditions d'une règle s'appelle la prémisse d'une règle. Lorsque la prémisse d'une règle est vérifiée, on dit que la règle est applicable ou encore activable [95].

b. La base de faits (BF)

La base de faits contient à tout moment, à travers le RNA, ce que le réseau a appris sur le problème étudié.

c. Le moteur d'inférence

Le moteur d'inférence est un programme qui exploite la connaissance (pour ce faire, la définition d'une stratégie de contrôle s'impose). Il scrute à travers la base de connaissance et détermine comment les faits et règles doivent être gérés. Il comprend des mécanismes de raisonnement et résout les problèmes en exploitant la base de connaissances en fonction de la situation courante fournie par la base de faits [95].

d. L'interface

Outre ces composants de base, on retrouve différents éléments essentiels (interfaces) dont le rôle est d'échanger les informations, d'une part, entre le sous-système d'acquisition des données et le sous-système d'interprétation des informations et, d'autre part, entre le RNA et l'utilisateur en vue de lire (afficher) les informations délivrées par le RNA et d'introduire des données dans la base de connaissance.

V.2.1.2.2 Construction du bloc de RNA

Le réseau de neurones que nous avons choisi est un réseau multicouche qui utilise l'algorithme de rétro propagation pour son apprentissage.

La rétro propagation est basée sur des principes mathématiques (voir III 4.5.3). Cette méthode a donné de bons résultats dans de nombreuses applications. Pour l'appliquer il suffit d'avoir des données d'entrée et des données de sortie.

Les étapes de construction et de validation du réseau de neurones sont réparties en trois phases:

a. Choix des entrées du réseau

Les entrées sélectionnées sont les huit valeurs d'amplitudes du spectre d'accélération dans les trois directions pour le point 2 et les huit valeurs dans la direction horizontale pour le point 4; ce dernier possède 32 entrées sur la couche d'entrée qui sont les valeurs échantillonnées des spectres d'accélération (voir la figure V.12).

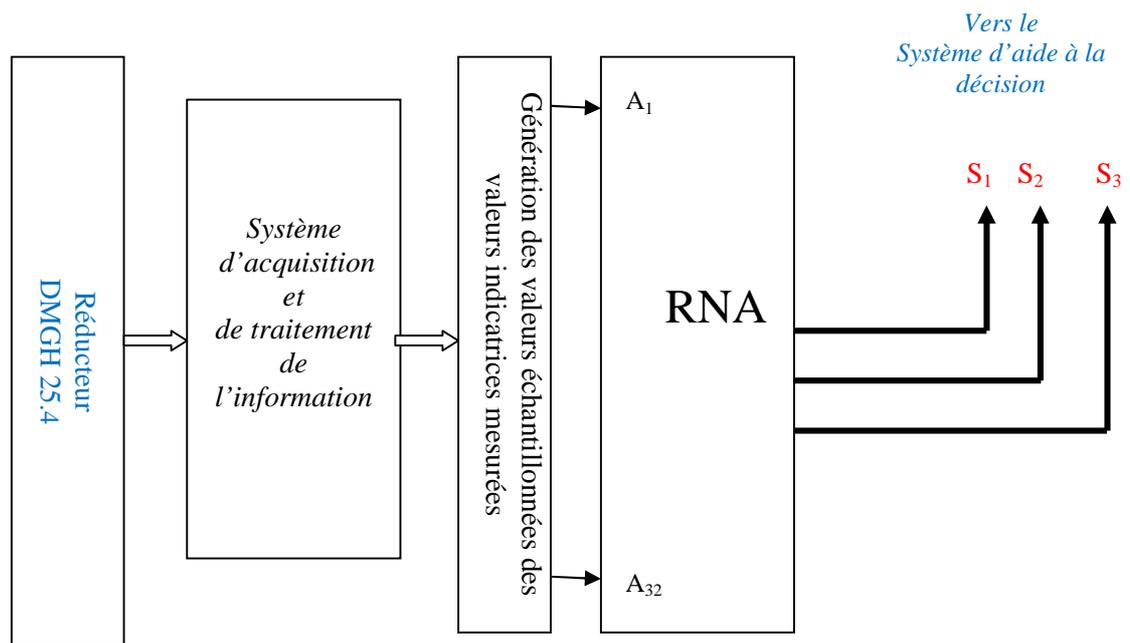


Figure V.12. Schéma du système de diagnostic par réseau de neurones.

b. Choix des sorties des réseaux

Notre réseau possède trois sorties, car les défauts considérés dans notre cas ne sont pas nombreux (voir figure V.12). Nous avons associé chaque défaut à un code, c'est-à-dire chaque défaut est représenté par les trois neurones de sortie (voir tableau V.4).

Lors de la détection d'un défaut, le réseau doit indiquer un nombre binaire quelconque (par exemple 100) à sa sortie, qui correspond à ce type de défaut (défaut d'usure de la bague extérieur du roulement QJ1244 N2MA). C'est-à-dire chaque sortie du réseau présente un seul chiffre soit 1 ou 0 (figure V.13).

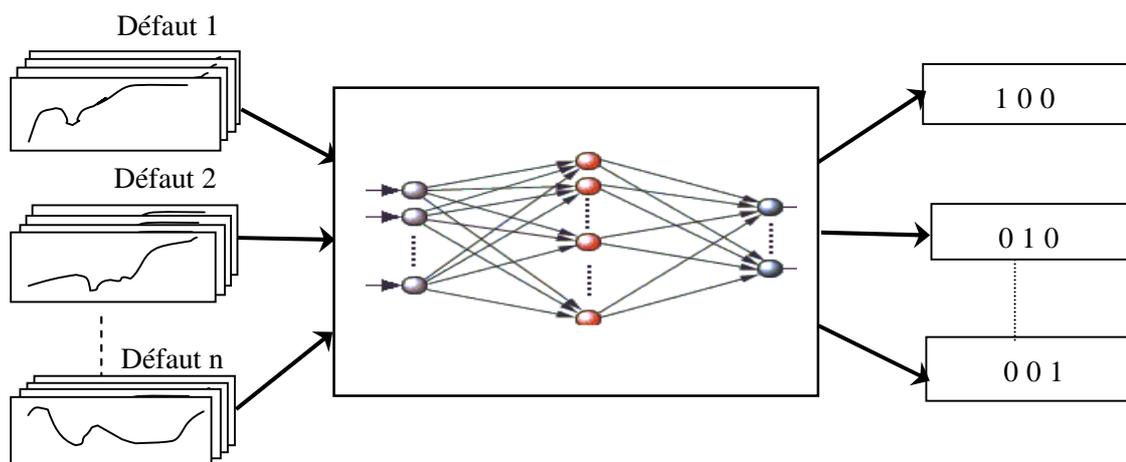


Figure V.13. Principe de classification des signaux des défaillances.

CATEGORIE	TYPE DE DEFAUT	SYMBOLE	CODE		
			S1	S2	S3
1	Sans Défaut	NF	0	0	0
2	Usure de la bague extérieure QJ1244	WBQJ1244	1	0	0
3	Détérioration d'une dent du pignon intermédiaire	DTGI	0	1	0

Tableau V.4 : Classification des types des défauts du broyeur horizontal DMGH 25.4 considérés.

V.2.2 Apprentissage et test du réseau de neurones sélectionné

Le réseau utilisé est un réseau multi couches (figure V.14), comportant une couche d'entrée qui correspond à la rétine, une couche de sortie qui correspond à la décision, et une couche cachée. Le nombre des neurones de chaque couche est donné par le tableau V.5.

Réseau construit	Couche d'entrée	Couche cachée	Couche de sortie
nombres de neurones	32	4	3

Tableau V.5 : Nombre de neurones dans chaque couche.

Le réseau sélectionné est entraîné par l'algorithme de rétro propagation. La rétro propagation est le paradigme des RNA le plus utilisé. Le terme désigne un algorithme permettant d'ajuster les

ponds de connections en un RNA multi couches. Pour l'appliquer il suffit d'avoir des données d'entrée et des données de sortie.

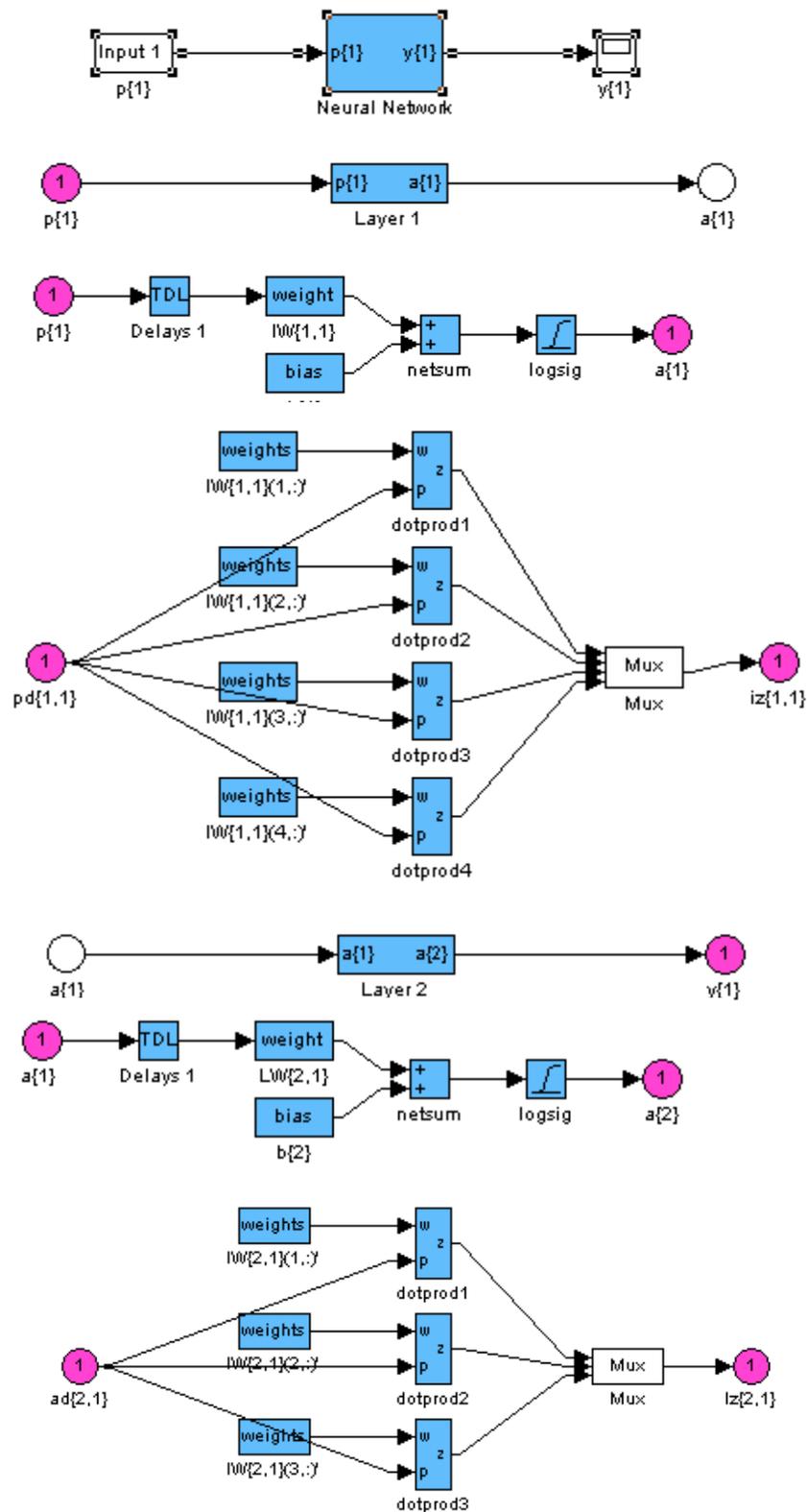


Figure V.14. Structure du réseau sélectionné.

On a effectué un apprentissage automatique à l'aide du logiciel MATLAB (SIMULINK) jusqu'à l'obtention de l'erreur quadratique la plus petite. L'erreur quadratique moyenne la plus petite est obtenue après 19 itérations et égal $2.0633\text{E-}11$ (figure V.15).

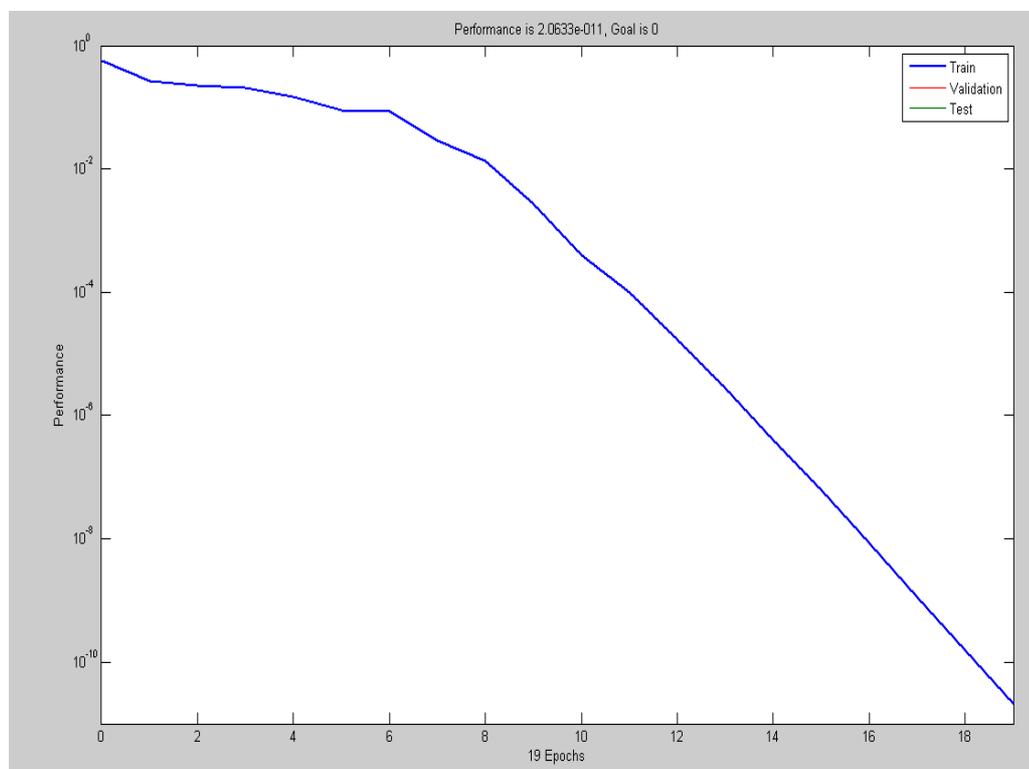


Figure V.15. Evolution de l'erreur quadratique moyenne.

Une fois que le réseau de neurones est construit et que son apprentissage a atteint des performances satisfaisantes, on passe à l'étape de test par des exemples à l'entrée du réseau. En fait, ces exemples appartiennent à deux bases de données, la première étant la base d'apprentissage et la deuxième étant la base de tests sur laquelle on procède aux tests de la capacité du réseau à reconnaître des exemples non appris (voir annexe III). Cette dernière opération permet d'estimer la capacité de généralisation du réseau (voir figure V.16). Les tests sont effectués selon la procédure suivante : système sain, puis défaut 1, système sain, puis défaut 2, système sain, puis défaut test non appris, et cela pendant une période de temps de 2s pour chaque essai.

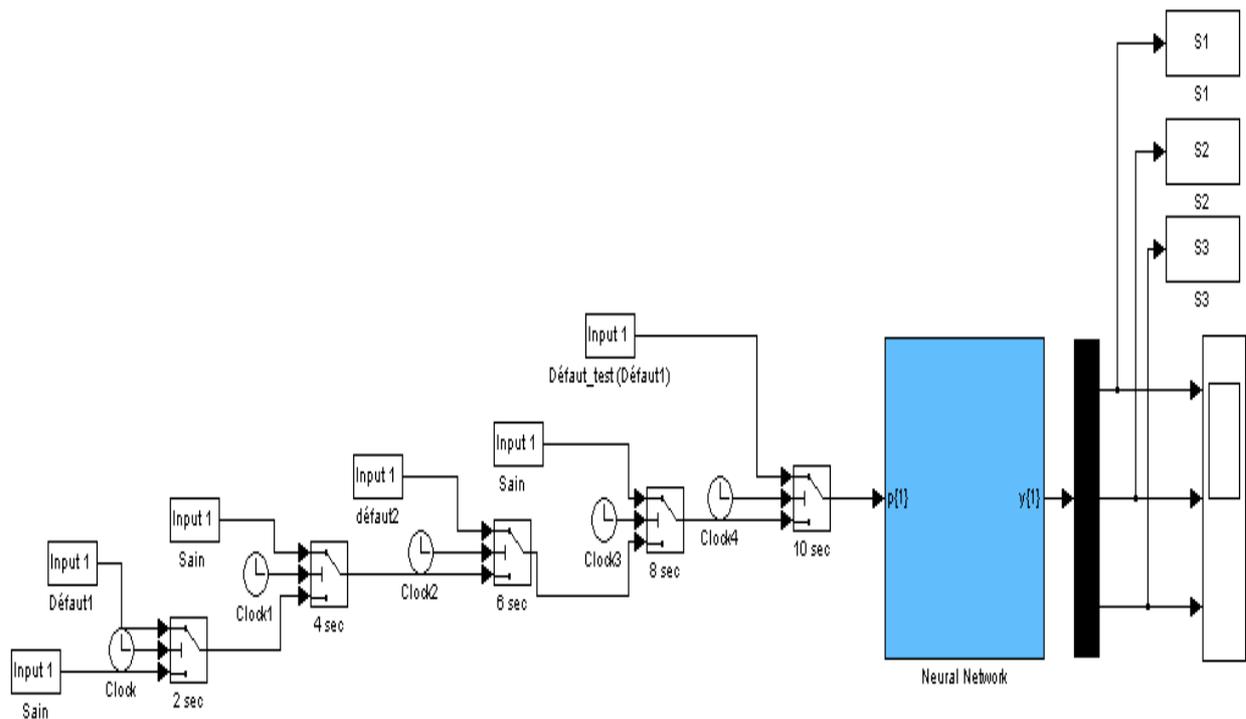


Figure V.16. Simulation de test du Réseau de neurones.

Il est évident que les tests du réseau de neurones sur les exemples appris (figure V.17) ou qui appartiennent à la base d'apprentissage du réseau ont donnés de meilleurs résultats, car tous les types de fonctionnement (les anomalies et le fonctionnement normal) ont été identifiés exactement par le réseau ; cela peut être expliqué par les résultats obtenus dans la phase d'apprentissage du réseau (dont la valeur de l'erreur quadratique moyenne est proche de zéro).

En ce qui concerne le test du réseau sur des exemples qui n'ont pas été appris dans la phase d'apprentissage (nouveaux exemples), nous avons testé le réseau par un signal voir annexe III dû à un défaut d'usure de la bague extérieure QJ 1244, son résultat est présenté dans la figure V.17.

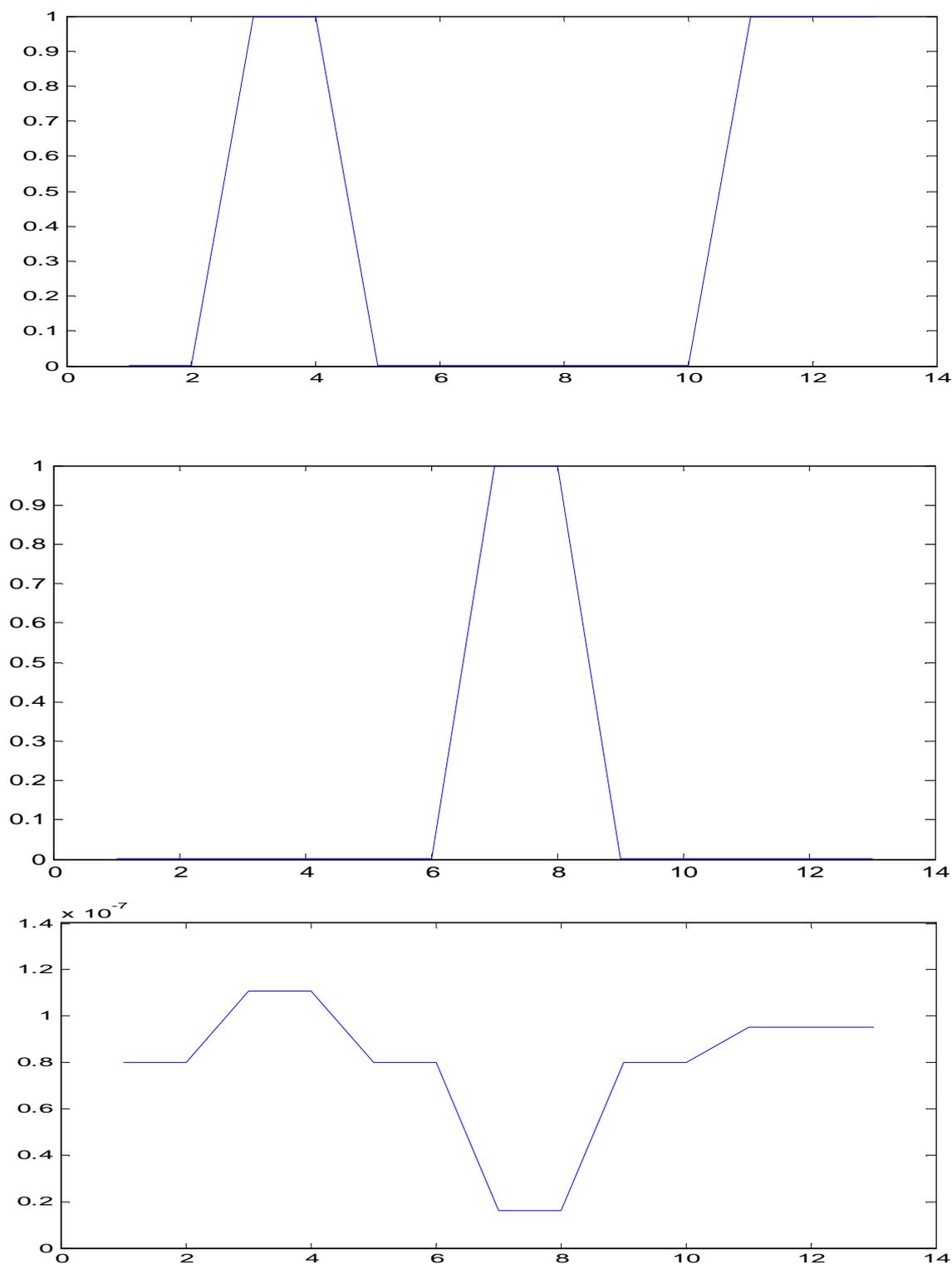


Figure V.17. Représentation graphique des tests du réseau de neurones.

A partir des résultats obtenus dans la phase des tests, on constate que les sorties du réseau évoluent conformément aux sorties désirées préétablies auparavant.

V.3 Conclusion

L'augmentation du niveau vibratoire global par rapport à un seuil est un signe de l'existence d'une anomalie et de faire une première idée des types de défauts qui affectent le système, mais ne permet pas d'établir un diagnostic précis. Ce type de mesure globale est considéré comme de niveau 1. Il permet la surveillance du système sans investissement important en matériel et en personnel.

Les mesures de niveau 1 ne sont pas toujours suffisantes pour une localisation des défauts. Afin de localiser les défauts, une analyse spectrale des points de mesures a été faite :

- En présence d'un défaut de la bague extérieure du roulement nous observons des pics de chocs aux hautes fréquences au voisinage de la fréquence du passage du défaut de la bague extérieure.
- En présence d'un défaut d'engrenage (détérioration d'une dent) le spectre correspondant montre un peigne de raies dont le pas correspondant à la fréquence de rotation.

La difficulté d'interprétation, d'une forme, d'une valeur, rendent délicates les opérations de suivi. L'automatisation de cette démarche par les réseaux de neurones à couche cachée, à apprentissage par rétro propagation à donner des résultats corrects. Ce travail a validé la performance des réseaux de neurones pour une telle application.

Conclusion générale

Dans la première partie la caractérisation de l'usure des roulements du réducteur à permet de conclure qu'il existe deux types d'usure des roulements :

- Le premier est un mode d'endommagement continue, quand les interactions entre les rugosités de surface des matériaux en contact peuvent avoir lieu. Ce mode d'endommagement amène un enlèvement de matière à chaque cycle de chargement.
- Le second mode est l'usure par un troisième corps, des débris d'usure en suspension dans l'huile. Ce sont les particules d'usure très dures qui usinent les matériaux en contact.
- L'écaillage provient de la propagation des fissures à travers l'épaisseur du matériau, fissure s'initiant généralement en sous-couche.

Dans la deuxième partie nous avons considérés que l'usure peut être vue comme étant une perte de fonctionnalité d'un système, ce qui influe sur l'image vibratoire des éléments constituant le système.

- l'étude des courbes de tendance a permis d'observer de manière globale le comportement des signaux mesurés en présence de défauts, mais ne permet pas d'établir un diagnostic précis. Il permet la surveillance du système sans investissement important en matériel et en personnel.
- L'analyse spectrale des points de mesures a permis :
 - En présence d'un défaut de la bague extérieur du roulement nous observons des pics de chocs aux hautes fréquences au voisinage de la fréquence du passage du défaut de la bague extérieur.
 - En présence d'un défaut d'engrenage le spectre correspondant montre un peigne de raies dont le pas correspondant à la fréquence de rotation.
 - L'effet des défauts de roulement est nettement plus observable que celle d'engrenage sur les signaux d'accélération aux paliers.
- L'automatisation de diagnostic par les réseaux de neurones à couche cachée, à apprentissage par rétro propagation à donner des résultats corrects. Ce travail a validé la performance des réseaux de neurones pour un problème de classification.

Perspectives

Les études à venir devraient se tourner sur :

- La simulation numérique de détachement de particules et leur éjection définitive du contact qu'ayant prouvé leur intérêt suite aux efforts de nombreux auteurs.
- Etude de l'influence des défauts combinés de roulement et engrenage sur le signal vibratoire.
- Généralisation de l'application des réseaux de neurones.
- Etude de l'usure des ailettes d'une turbine d'un ventilateur ciment de tirage.

Bibliographie

- [1] **Barrau Olivier.** Étude du frottement et de l'usure d'acier à outils de travail à chaud. *Thèse de doctorat, Institut national polytechnique Toulouse, France, 2004.*
- [2] **Zambelli G, Vincent L.** Matériaux et Contacts – une approche tribologique. *Presses polytechniques et Universitaires Romandes, 1998.*
- [3] **Barrau O, Boher C, Vergne C, Rezai-aria F, Gras R.** Investigations of friction and wear mechanisms of hot forging tool steels. *In Proceedings of the 6th International Conference on Tooling, Karlstad, pp. 81-94, 2002.*
- [4] **Stachowiak G.W, Batchelor A.W.** Engineering Tribology. (Second Edition), *Butterworth Heinemann, 2001.*
- [5] **Alexandra Souchet.** Comportement tribologique d'une phase MAX : Transition et effets d'échelle sur différents Ti₃SiC₂. *Thèse doctorat, école centrale de Lyon, France, 2004.*
- [6] **Georges J.M.** Frottement, usure et lubrification. *Eyrolles, 2000.*
- [7] **Mindlin B.D, H. Deresiewicz.** Elastic spheres in contact under varying oblique forces. *Journal of Applied Mechanics, pp 327-344, September 1953.*
- [8] **Ghislain Roméo Yantio.** Comportement Tribologique d'un alliage de titane traité et / ou revêtu en fretting à débattement libre. *Thèse doctorat, l'institut national polytechnique de Toulouse, France, 2007.*
- [9] **Cartier M., P Kapsa.** Usure des contacts mécaniques. Manifestation de l'usure. *Techniques de l'ingénieur, Traité de génie mécanique, BM 5067, 2001.*
- [10] **Archard J. F.** Contact and rubbing of flat surfaces. *Journal of Applied Physics, vol. 24, pp. 981-988, 1953.*
- [11] **Fouvry S., Duo P., Perruchaut Ph.** A quantitative approach of Ti-6Al-4V fretting damage: friction, wear and crack nucleation. *Wear, 257 Issues 9-10, pp 916-929, 2004.*
- [12] **Oqvist M.** Numerical simulations of mild wear using updated geometry with different step size approaches. *Wear, vol. 249, n°1-2, pp. 6-11, 2001.*
- [13] **Fillot N, Iordanoff I, Berthier Y.** A granular dynamic model for a degradation of Material. *ASME Journal of tribology, vol. 126, n° 3, pp 606-614, 2004.*
- [14] **Dragon-Louiset M.** On a predictive macroscopic contact–sliding wear model based on micromechanical considerations. *International Journal of Solids and Structures, vol. 38, pp. 1625-1639, 2001.*
- [15] **Achour Ali.** Etude du comportement en usure des outils de coupe en fonction du Revêtement. *Thèse doctorat d'état, université Constantine, 2006.*
- [16] **Meng H.C, Ludema K.C.** Wear models and predictive equations: their form and content. *Wear, vol 181-183, pp. 443-457, 1995.*
- [17] **Dumon P.** Revêtements par soudage et projection thermique *Tome1 Usure – Produit et procédés, Institut de Soudage, 1991.*
- [18] **Rabinowics E.** Friction and Wear of Material. *Willy, NY, 1966.*
- [19] **Gerald Zambelli, Leo Vincent.** Matériaux et contact. Une approche tribologique, 1998.
- [20] **Jean Blouet.** Usure et frottement. *Technique de l'ingénieur, A 3139.*
- [21] **Ayel J.** Les lubrifiants, moteur et pertes par frottement et usure. *Institut Français du Pétrole, 1979.*
- [22] **Emmanuel Tonicello.** Etude et modélisation de la fatigue de contact en présence d'indentation dans le cas de roulements tout acier et hybrides. *Thèse, Ecole Doctorale Matériaux de Lyon, 2012.*
- [23] **Stephane P.** Influence de la rugosité en fatigue de contact : rôle du rodage. *Thèse, Laboratoire de Mécanique des Solides (LMS) de l'Ecole Polytechnique France 2009.*
- [24] **Warlow-Davies E.J.** Fretting corrosion and fatigue strength: brief results of preliminary Experiments. *Proc. Inst. Mech. Eng., pp 32-38, 1941.*

- [25] **McDowell O. J.** Fretting corrosion tendencies of several combinations of material. *Symposium on fretting corrosion, ASTM STP vol 144, pp24-39, 1953.*
- [26] **Cattaneo C.** Sul contatto di due corpi elastici: distribuzione locale degli sforzi. *Rendiconti dell'Accademia dei Lincei, 27, pp 474-478, 1938.*
- [27] **Johnson K.L.** Contact mechanics. *Cambridge University Press, 1985.*
- [28] **Waterhouse R.B.** A historical introduction to fretting fatigue in Standardisation of fretting fatigue test methods and equipment. *ASTM STP 1159, pp. 8-9, 1992.*
- [29] **Christiner T, Reiser J, Godor I, Eichseder W, Trieb F, Stühlinger R.** Fretting Fatigue and Wear: Experimental Investigations and Numerical Simulation. *SAE Paper 2011-01-0199, 2011.*
- [30] **Amargier R, Fouvry S, Chambon L, Schwob C, Poupon C.** Stress gradient effect on crack initiation in fretting using a multiaxial fatigue framework. *International Journal of Fatigue, vol. 32, N° 12, pp. 1904-1912, Dec. 2010.*
- [31] **Heredia S, Fouvry S.** Introduction of a new sliding criterion to quantify partial, mixed and gross slip fretting regimes: correlation with wear and cracking processes. *Wear, vol 269, pp. 515-524, 2010.*
- [32] **Mohrbacher H, Blanpain B, Celis J.P, Roos J.R, Stals L, Van Stappen M.** Oxidational wear of TiN coating on tool steel and nitrided tool steel in unlubricated fretting. *Wear, vol 188, pp130-137, 1995.*
- [33] **Ramalho A, Miranda J. C,** The relationship between wear and dissipated energy in sliding systems. *Wear, vol 260, pp. 361-367, 2005.*
- [34] **Godet M.** The third body approach, a mechanical view of wear. *Wear, vol 100, pp 437-452, 1984.*
- [35] **Ludema K.** The third body concept interpretation of tribological phenomena. *Proceedings of the 22nd Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Tribology Series vol 31, Elsevier, Amsterdam, 3-19, 1996.*
- [36] **Berthier Y, Jacquemard P, Meurisse M.H.** The third body concept: interpretation of tribological phenomena. *Proceedings of the 22nd Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Tribology Series vol 31, Elsevier, Amsterdam, pp 91-102, 1996.*
- [37] **Berthier Y, Vincent L, Godet M.** Fretting fatigue and fretting wear. *Tribology International, vol 22(4), pp 235-242, 1989.*
- [38] **Berthier Y.** Experimental evidence for friction and wear modeling. *Wear, vol 139(1) pp 77-92, 1990.*
- [39] **Berthier Y.** Mécanismes et tribology. *Thèse d'état es-science, INSA de Lyon, 1988.*
- [40] **Descartes S, Berthier Y.** Rheology and flows of solid third bodies: background and application to an MoS_{1.6} coating. *Wear, vol 252 (7-8) pp 546-556, 2002.*
- [41] **Singer I.L, Pollock H.M.** Fundamentals of Friction: Macroscopic and Microscopic Processes *Series E. Applied Sciences, 220 Kluwer Academic Publishers pp 569-588, 1992.*
- [42] **Nicolas Fillot.** Etude mécanique de l'usure - Modélisation par Eléments Discrets des débits de troisième corps solide. *Thèse doctorat, INSA de Lyon, 2004.*
- [43] **Iordanoff I., Berthier Y., Descartes S., Heshmat H.** A Review of Recent Approaches for Modeling Third Bodies. *ASME Journal of Tribology, vol. 124, pp.725-735, 2002.*
- [44] **Descartes S., Berthier Y.** Rheology and flows of solid third bodies: background and application to an MoS_{1.6} coating. *Wear, vol. 252, pp. 546-556, 2002.*
- [45] **Mahe L.** Usure du polytétrafluoréthylène (PTFE) chargé: approche par les débits de troisième corps solide. Application aux segments de piston de compresseur. *Thèse de Mécanique, Villeurbanne : INSA de Lyon, 2000,*
- [46] **Seve B, Iordanoff I, Berthier Y, Jacquemard P.** The granular approach: a tool for understanding solid third body behavior in contact. *In: Japanese Society of Tribologists, vol. 2, pp.1103-1108, 2001.*

- [47] **Mekroud Abdesselam.** Influence du champ magnétique sur le comportement tribologique des couples métalliques glissants acier XC48/acier XC48, laiton/acier XC48 et aluminium/acier XC 48. . *Thèse doctorat en sciences, Constantine, 2008.*
- [48] **Stewart R.M.** The specification and development of standard for gearbox monitoring. *2nd International Conference on Vibration in Rotating Machines, Combridge, pp.353-358, 1980.*
- [49] **Sidahmed. M, Garnier. C.** Détection de défauts dans les engrenages. *Cetim informations, n°115, pp.71-74, 1991.*
- [50] **Claire Breneur,** éléments de maintenance préventive de machines tournantes dans le cas de défauts combinées d'engrenages et roulements. *Thèse, I.N.S.A, FRANCE 2002.*
- [51] **Trajin B.** Détection automatique et diagnostic des défauts de roulements dans une machine asynchrone par analyse spectrale des courants statoriques. *JCGE'08 Layon 16-17 décembre 2008.*
- [52] **Document S.N.R.** Causes de destruction prématurée des roulements. *n°10,1990.*
- [53] **Fontanive C, Prieur P.** Surveillance et diagnostic des engrenages. *Conférence International sur les progrès récents de méthodes de surveillance acoustiques et vibratoires – SENLIS 27-29 Octobre 1992.*
- [54] **Faure L.** Aspect des dentures d'engrenage après fonctionnement, *Senlis cetim, 1993.*
- [55] **Mathew.J.** Monitoring the vibrations of rotating machine elements, *an overview, The ASME Design Technical Conference on Mechanical Vibration and Noise, Montreal, pp 231-236, 1989.*
- [56] **Garreau D.** Surveillance des roulements par l'analyse des vibrations, *cetim informations, n°115,1990.*
- [57] **Bruel, Kjaer.** Détections des défauts des roulements, *Notes d'applications BO 0341-11, Copenhagen, 1995.*
- [58] **Boulanger A, Pachaud C.** Surveillance des machines par analyse des vibrations du dépistage au diagnostic. *AFNOR, 2^{ème} tirage 1998.*
- [59] **Philippe J.** Savoir ausculter les machines tournantes, *Laboratoire d'analyse des signaux et des processus industriels, université Jean Monnet, Paris.*
- [60] **Ahmadi H, Mollazada K.** Bearing fault diagnosis of a mine stone crusher by vibration condition monitoring technique. *Res.J.Appl.Sci.Eng.Technol, vol 1(3), pp 112-115,2009.*
- [61] **Kiuos M, Djeddi M.** Détection de défauts d'engrenage par analyse spectrale et cepstrale, *COMEA'96, TLEMEN, Algerian journal technologie, vol 4-1996.*
- [62] **Landolsi F.** Cours de techniques de surveillance. 2007.
- [63] **Yuh-Tay Sheen.** An envelope analysis based on the resonance modes of the mechanical system for the bearing defect diagnosis. *Measurement 43, pp 912-934, 2010.*
- [64] **Mazioud A, al,** Detection of rolling degradation using infrared thermography. *9th International Conference on Quantitative Infrared Thermography, Kakow, Poland, 2008.*
- [65] **McFadden .P.D,** Detection fatigue cracks in gears by amplitude and phase demodulation of Meshing vibration. *ASME Transaction Journal of Vibration Acoustics and Reliability in Design, vol 108, pp165-170, 1986.*
- [66] **Mol H.A.** Rolling bearing localized defect detection through vibration envelope analysis. *SKF Engineering and Research centre BV, Sweden, 2000.*
- [67] **Marie line Zani,** les roulements, des composants à surveiller de près. *Mesures 754, 2008*
- [68] **Randall R .B, Antoni jérôme.** Rolling element bearing diagnostics-A tutorial. *Mechanical systems and signal processing 25, pp485-520, 2011.*
- [69] **Harris C, Piersol A. G.** shock and vibration. *Handbook, McGraw-Hill, 2002.*
- [70] **Davalo E, Naim P.** Des réseaux de neurones. *Ed. Eyrolles, Paris, 1993.*
- [71] **Zwinnelsten G.** Diagnostic des défaillances : théorie et pratique pour les systèmes

- Industriels. *Ed. Hermès Paris. 1995.*
- [72] **Fukuda T, Shbata T.** Theory and application of neural networks for industrial systems. *IEEE Transaction on industrial electronics, vol 39, N° 6, pp472-489, December 1992.*
- [73] **Gondran M, Miller C.** Réseaux de neurones et apprentissage. *Revue REE n° 3, pp6-9, mars 1997.*
- [74] **Hérault J, Jutten C.** Réseaux neuronaux et traitement du signal. *Ed. Hermès, Paris, 1994.*
- [75] **Freeman J.A, Skapura D.M.** Neural networks: algorithm, applications and programming Techniques. *CNS, Computation and neural systems series, 1992.*
- [76] **Patrick, Simpson K.** Foundations of neural network. *Technologie Update series, IEEE, pp 1-20 1996.*
- [77] **Yang D.M, A., Stronach A.F, MacConnell P.** Third order spectral techniques for the diagnosis of motor bearing condition using artificial neural networks. *Mechanical Systems and Signal Processing 16(2-3), pp 391-411, 2002.*
- [78] **DJOUADA Mohamed, al.** Diagnostic des défauts par un Couplage réseaux de neurones artificiels - algorithmes génétiques. *4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP' 2007.*
- [79] **Castejon C, Lora O and Garcia-Prada J.C.** Automated diagnosis of bearing using MRA and neural networks. *Mechanical systems and signal processing, vol 24, pp 289-299, 2010.*
- [80] **Kolodziejczyk T, al.** Artificial intelligence as efficient technique for ball bearing fretting wear damage prediction. *Wear, vol 268, pp 309-315, 2010.*
- [81] **Wang H, Chen P.** Intelligent diagnosis method for rolling element bearing faults using possibility theory and neural network. *Computers & industrial engineering, vol 60, pp 511-518, 2011.*
- [82] Manuel d'utilisation du broyeur ciment Flender
- [83] Catalogue général SKF, *Publication 6000FR, mai 2006.*
- [84] **Savan A, Boving, Fluehman E, Hintermann H.E.** Increased performance of bearings using Tic-coated balls. *JOURNAL DE PHYSIQUE IV, November 1993.*
- [85] **Sigrid Binkowski, Woydet M.** Durcissement inhabituel de l'acier 100Cr6 dans un roulement à rouleaux de céramique hybride défectueux. *Revue de Matérielographie, Struers. 8/2005.*
- [86] **Molinder R, Comyn T. P, N. Hondow N, J. E. Parker J.E and Dupont V.** In situ X-ray diffraction of CaO based CO₂ sorbents. *DOI: 10.1039/C2EE21779A. Energy Environ. Sci., N°5, pp8958-8969, 2012.*
- [87] **Mottana A, Ferraris G, Brunori M.** The centennial of X-ray diffraction (1912-2012) Foreword. *DOI: 10.1007/s 12210-013-0225-5, Acc. Lincci. 2013.*
- [88] **Barrow A.T.W, Kang J.H, Rivera-D'iaz-del-Castillo P.E.J.** $\varepsilon \rightarrow \eta \rightarrow \theta$ transition in 100Cr6 and the effect on mechanical properties. *SKF University Technology Centre, Department of Materials Science and Metallurgy, University of Cambridge, United Kingdom.*
- [89] **Sidiroff C.** Analyse microstructurale et modélisation des évolutions dimensionnelles de l'acier 100Cr6 : structure martensitique et bainitique. *Thèse, INSA de Lyon, 2002.*
- [90] **Bulancea V.** The microstructure in the cryogenic treated bearing steels. *Annals of the university of Craiova, electrical engineering series, No.30.2006.*
- [91] **Eberhart J.P.** Méthodes physiques d'étude des minéraux et des matériaux solides. *Dion, Editeurs, 1976.*
- [92] **Desort A.M.J, Wawak F, Jolly D.** Conception d'un système d'aide à la décision utilisant les théories floues et possibiliste. *APII-JESA, vol 33, n°3. pp337-357, 1999.*
- [93] **BOUKHOBZA M, MIMI M.** Détection automatique de la présence d'anomalie sur une mammographie par réseau de neurones artificiels. *Courrier du Savoir – N°13, pp.103-108, Avril 2012.*

- [94] **Khodja DJ, Chetate B.** Development of Neural Network module for fault identification in Asynchronous machine using various types of reference signals. *2nd International Conference PHYSICS and CONTROL, August,24-26, pp537-542, , Physcon 2006, S^t Ptersburg Russia.2006.*
- [95] **Karkan J.M, Tjoen G.** Systèmes experts, un nouvel outil pour l'aide à la décision. *Ed, MASSON,1993.*

Name and formula

Reference code: 01-085-1410
Mineral name: Iron
ICSD name: Iron
Empirical formula: Fe
Chemical formula: Fe

Crystallographic parameters

Crystal system: Cubic
Space group: Im-3m
Space group number: 229
a (Å): 2,8860
b (Å): 2,8860
c (Å): 2,8860
Alpha (°): 90,0000
Beta (°): 90,0000
Gamma (°): 90,0000
Calculated density (g/cm³): 7,71
Measured density (g/cm³): 7,87
Volume of cell (10⁶ pm³): 24,04
Z: 2,00
RIR: 10,81

Subfiles and Quality

Subfiles: Inorganic
Mineral
Alloy, metal or intermetallic
Corrosion
Modelled additional pattern
Quality: Calculated (C)

Comments

Additional pattern: See PDF 6-696.
ICSD collection code: 064795
Test from ICSD: Calc. density unusual but tolerable.
No R value given.
At least one TF missing.

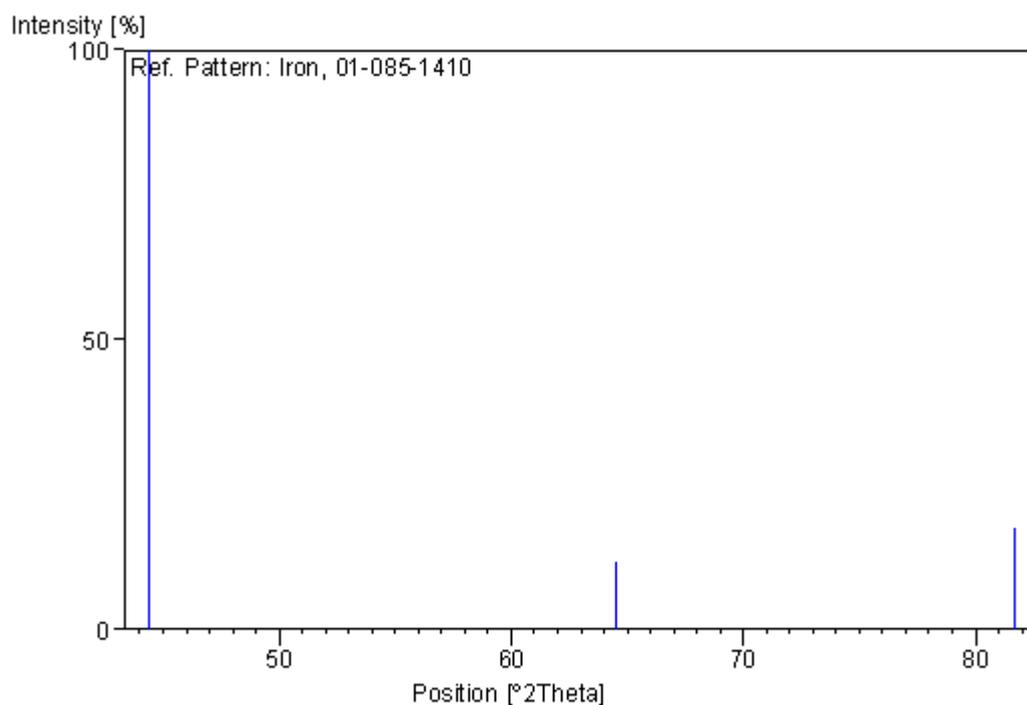
References

Primary reference: *Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997)*
Structure: Swanson, H.E., Tatge, E., *Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539, 539, 4, (1955)*

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	0	2,04071	44,354	100,0
2	2	0	0	1,44300	64,528	11,6
3	2	1	1	1,17820	81,657	17,6

Stick Pattern



Name and formula

Reference code: 00-020-0509
Common name: hogg carbide
PDF index name: Iron Carbide
Empirical formula: C_2Fe_5
Chemical formula: Fe_5C_2

Crystallographic parameters

Crystal system: Monoclinic
Space group: $C2/c$
Space group number: 15
a (Å): 11,5630
b (Å): 4,5730
c (Å): 5,0580
Alpha (°): 90,0000
Beta (°): 97,7000
Gamma (°): 90,0000
Calculated density (g/cm³): 7,59
Volume of cell (10⁶ pm³): 265,04
Z: 4,00
RIR: -

Status, subfiles and quality

Status: Marked as deleted by ICDD
Subfiles: Inorganic
Alloy, metal or intermetallic
Quality: Blank (B)

Comments

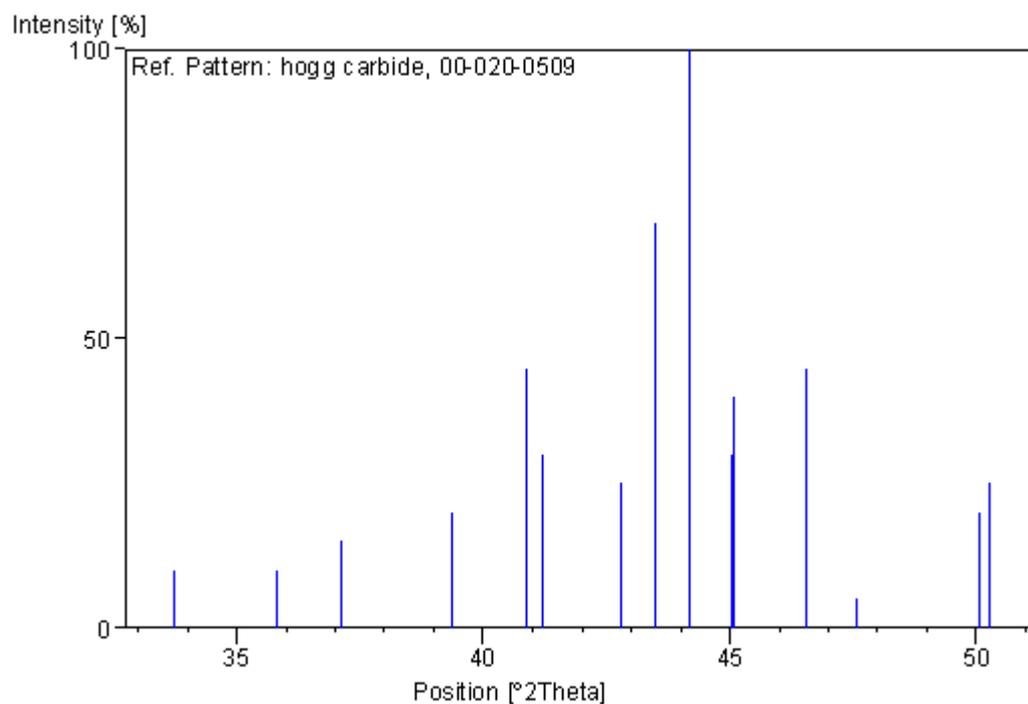
Deleted by: Deleted by 36-1248.
Additional pattern: See also 20-508.

References

Primary reference: Senateur., *Ann. Chim. (Paris)*, **2**, 103, (1967)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	-3	1	1	2,65300	33,758	10,0
2	0	0	2	2,50600	35,803	10,0
3	-2	0	2	2,42100	37,105	15,0
4	0	2	0	2,28700	39,366	20,0
5	-1	1	2	2,20600	40,875	45,0
6	2	0	2	2,19000	41,187	30,0
7	1	1	2	2,11200	42,781	25,0
8	0	2	1	2,08000	43,473	70,0
9	5	1	0	2,04900	44,165	100,0
10	-3	1	2	2,01100	45,045	30,0
11				2,01000	45,068	40,0
12				1,95000	46,535	45,0
13	6	0	0	1,91000	47,569	5,0
14	5	1	1	1,82100	50,049	20,0
15	3	1	2	1,81400	50,256	25,0

Stick Pattern

Name and formula

Reference code: 00-006-0683
 PDF index name: Carbon Chromium
 Empirical formula: C_3Cr_7
 Chemical formula: Cr_7C_3

Crystallographic parameters

Crystal system: Unknown
 RIR: -

Status, subfiles and quality

Status: Marked as deleted by ICDD
 Subfiles: Inorganic
 Quality: Blank (B)

Comments

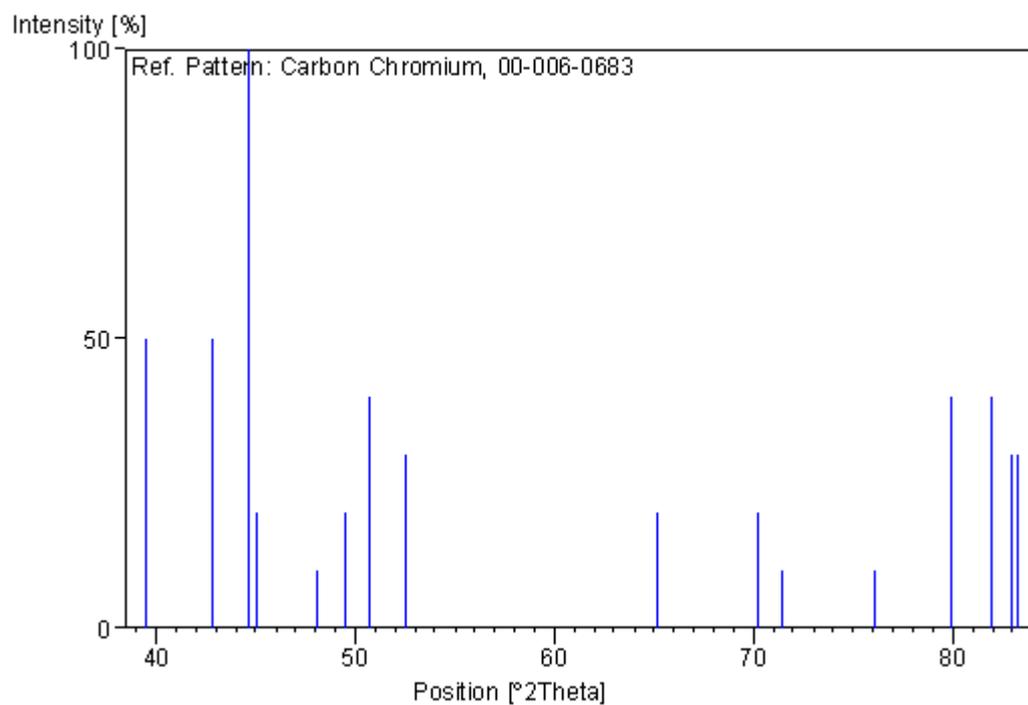
Deleted by: Weissmann parcel March 30, 1959.

References

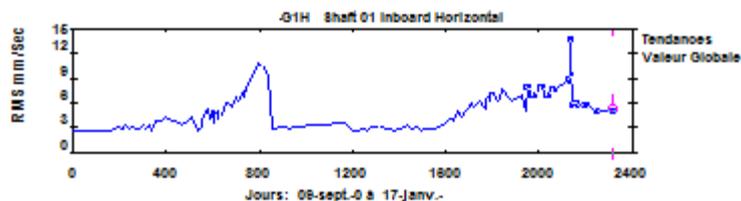
Primary reference: Crafts, Lamont., *Trans. Am. Inst. Min. Eng.*, **185**, 957, (1949)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1				2,28000	39,492	50,0
2				2,11000	42,824	50,0
3				2,03000	44,600	100,0
4				2,01000	45,068	20,0
5				1,89000	48,104	10,0
6				1,84000	49,498	20,0
7				1,80000	50,674	40,0
8				1,74000	52,553	30,0
9				1,43000	65,186	20,0
10				1,34000	70,178	20,0
11				1,32000	71,403	10,0
12				1,25000	76,084	10,0
13				1,19900	79,950	40,0
14				1,17500	81,926	40,0
15				1,16300	82,957	30,0
16				1,15900	83,307	30,0

Stick Pattern

Point de mesure G1H --> Shaft 01 Inboard Horizontal
 Paramètre: Valeur Globale (RMS mm/Sec)



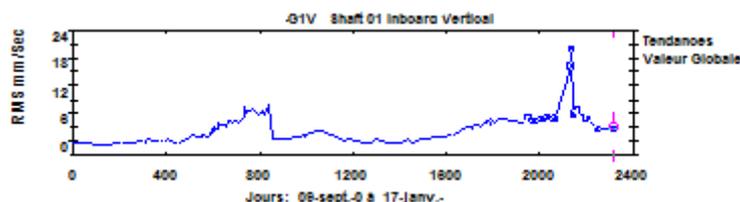
DATE	HEURE	VALEUR
----	-----	-----
09-sept.-04	04:26	2.76
10-sept.-04	08:58	2.78
17-févr.-05	13:53	2.73
27-févr.-05	15:41	2.83
08-mars-05	10:36	2.95
20-mars-05	10:41	3.17
07-avr.-05	10:54	2.87
20-avr.-05	13:23	3.34
09-mai-05	12:10	2.86
17-mai-05	17:14	3.05
08-juin-05	11:26	2.83
22-juin-05	16:09	2.98
02-juil.-05	15:09	3.30
12-juil.-05	14:02	3.23
13-juil.-05	10:30	2.97
28-juil.-05	09:29	3.28
08-août-05	16:11	2.54
01-sept.-05	11:51	3.92
20-sept.-05	10:44	3.80
06-oct.-05	10:51	4.22
20-oct.-05	11:59	4.11
14-nov.-05	09:59	3.77
08-déc.-05	09:21	3.59
23-déc.-05	15:08	3.40
18-janv.-06	14:40	3.89
02-févr.-06	09:18	4.30
22-févr.-06	09:27	2.71
12-mars-06	09:29	3.23
17-mars-06	10:28	4.09
06-avr.-06	12:26	5.34
16-avr.-06	11:33	4.17
24-avr.-06	11:06	5.07
27-avr.-06	10:52	4.38
29-avr.-06	10:49	4.64
03-mai-06	11:26	4.76
06-mai-06	16:32	3.55
09-mai-06	17:28	4.93
10-mai-06	10:19	4.63
23-mai-06	10:02	5.19
25-mai-06	10:21	4.13
25-mai-06	17:06	4.84
27-mai-06	10:29	4.53
08-juin-06	09:40	4.49
23-juin-06	11:30	6.10
08-juil.-06	09:53	6.11
22-juil.-06	10:36	5.66
07-août-06	10:38	6.76
21-août-06	10:02	6.36
07-sept.-06	10:29	7.46
16-sept.-06	12:33	6.81
26-sept.-06	11:03	7.74
17-oct.-06	11:22	9.23
13-nov.-06	10:53	10.78
27-nov.-06	10:19	10.42

07-déc.-06	14:28	10.36
27-déc.-06	09:07	9.26
15-janv.-07	10:25	2.96
20-févr.-07	09:02	3.16
12-mars-07	13:51	3.09
27-mars-07	08:46	2.83
16-avr.-07	09:49	3.04
06-mai-07	10:11	3.17
26-mai-07	16:07	3.18
04-juin-07	13:28	3.20
14-juin-07	10:24	3.36
05-juil.-07	14:39	3.43
21-juil.-07	10:03	3.33
12-août-07	11:16	3.45
16-nov.-07	10:13	3.55
09-déc.-07	09:00	3.24
25-déc.-07	10:01	2.60
13-janv.-08	14:41	2.63
09-févr.-08	14:05	2.88
23-févr.-08	12:03	2.56
09-mars-08	13:56	3.20
30-mars-08	11:17	3.23
20-avr.-08	11:10	3.18
09-mai-08	10:57	2.97
02-juin-08	10:32	2.83
18-juin-08	11:21	2.79
16-juil.-08	10:47	2.98
11-août-08	17:01	3.31
02-sept.-08	11:05	2.96
24-sept.-08	11:29	3.05
16-oct.-08	10:23	2.64
05-nov.-08	09:23	3.02
05-nov.-08	11:31	2.90
07-déc.-08	09:38	2.97
27-déc.-08	09:44	3.12
19-janv.-09	10:27	3.53
10-févr.-09	09:49	4.02
26-févr.-09	10:06	3.98
14-mars-09	14:06	4.98
04-avr.-09	10:28	4.35
27-avr.-09	10:41	5.40
21-mai-09	15:18	6.05
23-mai-09	12:44	5.65
08-juin-09	12:26	5.79
17-juin-09	10:04	6.19
21-juil.-09	19:14	5.38
22-juil.-09	15:25	6.39
29-juil.-09	10:41	6.79
30-juil.-09	10:40	7.07
02-août-09	12:33	6.32
05-août-09	15:00	7.21
06-août-09	15:06	7.06
18-août-09	11:07	7.20
05-sept.-09	11:36	6.38
18-sept.-09	11:52	6.66
27-sept.-09	11:02	7.67
03-nov.-09	09:30	6.31
19-déc.-09	10:05	7.00
06-janv.-10	15:52	5.12
12-janv.-10	10:09	7.94
08-févr.-10	09:20	7.02
17-mars-10	09:42	7.95
13-avr.-10	10:00	6.94
03-mai-10	10:05	7.67
14-juil.-10	11:50	8.76
16-juil.-10	11:25	13.68
27-juil.-10	11:08	5.82
16-août-10	10:30	5.86

21-sept.-10 11:08 5.79
 09-nov.-10 09:09 5.05
 17-janv.-11 11:51 5.06

ALARMES: ATTENTION ALERTE DEFAUT
 3.47 7.10 11.20

Point de mesure G1V --> Shaft 01 Inboard Vertical
 Paramètre: Valeur Globale (RMS mm/Sec)



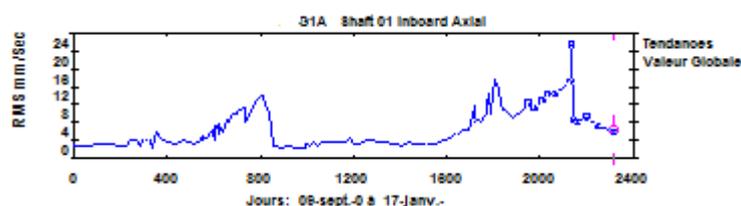
DATE	HEURE	VALEUR
----	-----	-----
09-sept.-04	04:27	2.87
10-sept.-04	08:59	2.80
17-févr.-05	13:53	2.34
27-févr.-05	15:42	2.54
08-mars-05	10:37	2.53
20-mars-05	10:42	2.71
07-avr.-05	10:54	2.65
20-avr.-05	13:23	2.62
09-mai-05	12:11	2.59
17-mai-05	17:14	2.45
08-juin-05	11:26	2.41
22-juin-05	16:09	2.91
02-juil.-05	15:09	2.55
12-juil.-05	14:02	2.55
13-juil.-05	10:30	3.08
28-juil.-05	09:29	3.37
08-août-05	16:11	2.92
01-sept.-05	11:51	3.12
20-sept.-05	10:44	3.08
06-oct.-05	10:51	3.18
20-oct.-05	11:59	3.45
14-nov.-05	09:59	2.88
08-déc.-05	09:21	2.79
23-déc.-05	15:08	2.91
18-janv.-06	14:41	3.30
02-févr.-06	09:18	4.34
22-févr.-06	09:27	4.20
12-mars-06	09:29	3.94
17-mars-06	10:28	4.45
06-avr.-06	12:27	4.21
16-avr.-06	11:34	4.43
24-avr.-06	11:07	5.70
27-avr.-06	10:54	5.00
29-avr.-06	10:49	5.06
03-mai-06	11:26	5.52
06-mai-06	16:33	6.23
09-mai-06	17:28	6.03
10-mai-06	10:20	5.17
23-mai-06	10:02	5.48
25-mai-06	10:21	5.40
25-mai-06	17:07	6.76
27-mai-06	10:29	6.00
08-juin-06	09:40	6.54
23-juin-06	11:31	6.24
08-juil.-06	09:53	7.35

22-juil.-06	10:36	7.20
07-août-06	10:38	7.25
21-août-06	10:03	6.96
07-sept.-06	10:30	8.43
16-sept.-06	12:34	10.19
26-sept.-06	11:04	9.17
17-oct.-06	11:22	9.95
13-nov.-06	10:53	8.60
27-nov.-06	10:19	9.54
07-déc.-06	14:28	8.53
27-déc.-06	09:08	10.90
15-janv.-07	10:25	3.66
20-févr.-07	09:03	3.43
12-mars-07	13:51	3.29
27-mars-07	08:46	3.49
16-avr.-07	09:49	3.77
06-mai-07	10:13	4.03
26-mai-07	16:07	4.34
04-juin-07	13:29	4.21
14-juin-07	10:24	4.56
05-juil.-07	14:39	4.82
21-juil.-07	10:04	5.26
12-août-07	11:16	5.29
16-nov.-07	10:13	3.12
09-déc.-07	09:01	3.42
25-déc.-07	10:02	3.03
13-janv.-08	14:41	3.01
09-févr.-08	14:05	2.67
23-févr.-08	12:03	2.57
09-mars-08	13:56	2.67
30-mars-08	11:18	3.26
20-avr.-08	11:10	3.00
09-mai-08	10:57	2.82
02-juin-08	10:33	2.55
18-juin-08	11:21	2.48
16-juil.-08	10:48	2.60
11-août-08	17:02	3.54
02-sept.-08	11:06	2.70
24-sept.-08	11:30	3.05
16-oct.-08	10:23	3.41
05-nov.-08	09:24	3.25
05-nov.-08	11:35	3.35
07-déc.-08	09:38	3.76
27-déc.-08	09:45	3.99
19-janv.-09	10:27	3.87
10-févr.-09	09:50	4.33
26-févr.-09	10:07	4.31
14-mars-09	14:07	4.69
04-avr.-09	10:28	5.47
27-avr.-09	10:41	5.92
21-mai-09	15:18	5.67
23-mai-09	12:46	6.41
08-juin-09	12:26	6.51
17-juin-09	10:08	6.15
21-juil.-09	19:15	7.28
22-juil.-09	15:26	6.77
29-juil.-09	10:42	7.47
30-juil.-09	10:41	6.73
02-août-09	12:35	7.08
05-août-09	15:03	6.70
06-août-09	15:06	7.57
18-août-09	11:07	6.98
05-sept.-09	11:40	7.65
18-sept.-09	11:52	7.57
27-sept.-09	11:03	7.71
03-nov.-09	09:31	7.26
19-déc.-09	10:06	7.10
06-janv.-10	15:56	7.31

12-janv.-10	10:10	8.02
08-févr.-10	09:20	7.35
17-mars-10	09:43	7.67
13-avr.-10	10:00	8.12
03-mai-10	10:06	7.98
14-juil.-10	11:50	19.28
16-juil.-10	11:25	22.99
27-juil.-10	11:09	8.75
16-août-10	10:30	9.83
21-sept.-10	11:09	7.68
09-nov.-10	09:09	5.53
17-janv.-11	11:52	5.38

ALARMES:	ATTENTION	ALERTE	DEFAUT
	3.16	7.10	11.20

Point de mesure G1A --> Shaft 01 Inboard Axial
 Paramètre: Valeur Globale (RMS mm/Sec)



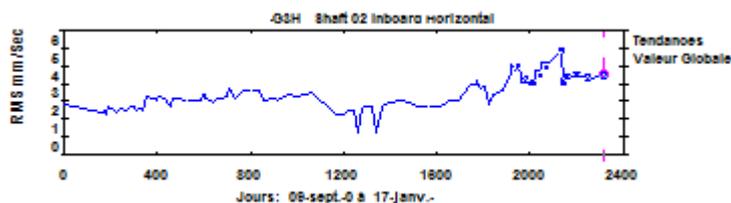
DATE	HEURE	VALEUR
----	-----	-----
09-sept.-04	04:27	3.34
10-sept.-04	08:59	2.74
17-févr.-05	13:54	3.07
27-févr.-05	15:42	3.02
08-mars-05	10:37	2.97
20-mars-05	10:42	2.53
07-avr.-05	10:54	2.74
20-avr.-05	13:26	2.88
09-mai-05	12:11	3.95
17-mai-05	17:14	4.24
08-juin-05	11:27	4.36
22-juin-05	16:10	2.91
02-juil.-05	15:10	4.52
12-juil.-05	14:02	4.42
13-juil.-05	10:31	4.23
28-juil.-05	09:30	4.30
08-août-05	16:11	2.35
01-sept.-05	11:51	5.86
20-sept.-05	10:45	3.93
06-oct.-05	10:52	3.38
20-oct.-05	12:00	3.80
14-nov.-05	10:00	3.28
08-déc.-05	09:21	3.45
23-déc.-05	15:08	3.89
18-janv.-06	14:41	3.60
02-févr.-06	09:18	3.04
22-févr.-06	09:28	3.36
12-mars-06	09:31	4.74
17-mars-06	10:28	4.12
06-avr.-06	12:27	5.08
16-avr.-06	11:34	5.98
24-avr.-06	11:07	6.43
27-avr.-06	10:55	4.91
29-avr.-06	10:49	5.34
03-mai-06	11:26	7.38
06-mai-06	16:33	4.32
09-mai-06	17:31	6.65

10-mai-06	10:21	5.83
23-mai-06	10:03	7.64
25-mai-06	10:21	5.57
25-mai-06	17:07	7.11
27-mai-06	10:30	7.53
08-juin-06	09:40	5.95
23-juin-06	11:31	8.35
08-juil.-06	09:54	7.86
22-juil.-06	10:37	9.80
07-août-06	10:39	9.92
21-août-06	10:03	10.69
07-sept.-06	10:30	11.39
16-sept.-06	12:34	8.01
26-sept.-06	11:04	8.75
17-oct.-06	11:22	11.51
13-nov.-06	10:53	13.82
27-nov.-06	10:20	14.04
07-déc.-06	14:29	12.33
27-déc.-06	09:08	10.41
15-janv.-07	10:26	2.62
20-févr.-07	09:03	2.36
12-mars-07	13:52	2.81
27-mars-07	08:47	2.66
16-avr.-07	09:49	2.36
06-mai-07	10:12	2.29
26-mai-07	16:08	2.44
04-juin-07	13:29	3.12
14-juin-07	10:24	3.00
05-juil.-07	14:39	3.37
21-juil.-07	10:04	2.75
12-août-07	11:16	3.64
16-nov.-07	10:13	3.76
09-déc.-07	09:01	4.63
25-déc.-07	10:02	3.23
13-janv.-08	14:41	3.15
09-févr.-08	14:05	3.49
23-févr.-08	12:04	3.98
09-mars-08	13:57	4.30
30-mars-08	11:18	3.77
20-avr.-08	11:11	3.56
09-mai-08	10:58	3.78
02-juin-08	10:33	3.17
18-juin-08	11:22	3.02
16-juil.-08	10:48	2.94
11-août-08	17:03	3.36
02-sept.-08	11:06	3.32
24-sept.-08	11:30	3.11
16-oct.-08	10:24	3.17
05-nov.-08	09:24	3.08
05-nov.-08	11:37	3.23
07-déc.-08	09:39	3.23
27-déc.-08	09:45	3.44
19-janv.-09	10:28	3.94
10-févr.-09	09:51	4.52
26-févr.-09	10:07	5.34
14-mars-09	14:07	5.27
04-avr.-09	10:29	6.34
27-avr.-09	10:42	6.51
21-mai-09	15:19	9.48
21-mai-09	16:54	11.91
23-mai-09	12:26	8.26
08-juin-09	12:23	8.79
17-juin-09	10:47	8.22
21-juil.-09	19:15	9.81
22-juil.-09	15:27	11.60
29-juil.-09	10:43	14.24
30-juil.-09	10:41	10.00
02-août-09	12:37	10.65

05-août-09	15:04	10.64
06-août-09	15:07	10.35
18-août-09	11:08	17.45
05-sept.-09	11:49	15.08
18-sept.-09	11:53	12.20
27-sept.-09	11:03	10.91
29-sept.-09	15:35	11.39
03-nov.-09	09:31	9.03
19-déc.-09	10:06	10.80
06-janv.-10	15:59	11.69
12-janv.-10	10:11	12.18
08-févr.-10	09:21	11.09
17-mars-10	09:43	12.88
13-avr.-10	10:01	14.33
03-mai-10	10:07	14.29
14-juil.-10	11:51	17.08
16-juil.-10	11:26	25.21
27-juil.-10	11:09	8.40
16-août-10	10:31	7.93
21-sept.-10	11:10	9.14
09-nov.-10	09:09	7.28
17-janv.-11	11:52	5.88

ALARMES:	ATTENTION	ALERTE	DEFAULT
	5.07	7.10	11.20

Point de mesure G3H --> Shaft 02 Inboard Horizontal
 Paramètre: Valeur Globale (RMS mm/Sec)



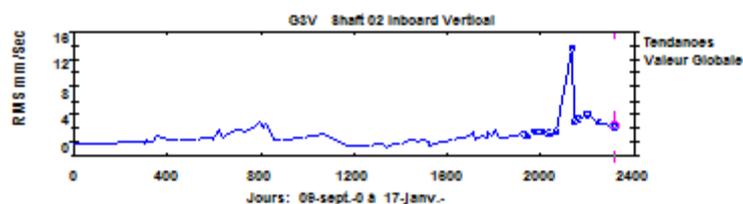
DATE	HEURE	VALEUR
----	-----	-----
09-sept.-04	04:32	2.8241
17-févr.-05	14:00	2.3320
27-févr.-05	15:45	2.4737
08-mars-05	10:40	2.2453
20-mars-05	10:51	2.6589
20-avr.-05	13:31	2.3884
09-mai-05	12:15	2.6247
08-juin-05	11:30	2.4333
22-juin-05	16:18	2.7462
02-juil.-05	15:14	2.6626
12-juil.-05	14:08	2.4275
13-juil.-05	11:42	2.4996
28-juil.-05	09:39	2.5834
08-août-05	16:17	2.4660
01-sept.-05	11:55	3.3164
20-sept.-05	10:51	3.1858
06-oct.-05	10:55	3.0982
20-oct.-05	12:04	3.2160
14-nov.-05	10:04	3.1841
08-déc.-05	09:27	2.6662
23-déc.-05	15:13	3.1175
18-janv.-06	14:45	3.1685
02-févr.-06	09:27	3.0462
22-févr.-06	09:37	3.0317
12-mars-06	09:35	3.0260
06-avr.-06	12:33	3.0714
16-avr.-06	11:40	3.0704

27-avr.-06	11:03	3.4111
06-mai-06	16:42	3.3013
09-mai-06	15:57	3.3751
10-mai-06	10:28	3.1461
23-mai-06	10:09	3.1123
08-juin-06	09:44	2.8717
23-juin-06	11:36	3.1271
08-juil.-06	09:59	3.1270
22-juil.-06	10:42	3.1746
07-août-06	10:44	3.2228
21-août-06	10:09	3.6744
07-sept.-06	10:39	3.1913
17-oct.-06	11:26	3.6217
13-nov.-06	10:59	3.6438
27-nov.-06	10:28	3.6610
07-déc.-06	14:36	3.5645
27-déc.-06	09:15	3.5506
15-janv.-07	10:42	3.0250
20-févr.-07	09:07	3.1236
12-mars-07	13:56	3.0919
27-mars-07	08:52	3.1760
16-avr.-07	09:57	3.2922
06-mai-07	10:18	3.3912
26-mai-07	16:12	3.2467
04-juin-07	13:35	3.3100
14-juin-07	10:31	3.2809
05-juil.-07	14:44	3.3353
21-juil.-07	10:10	3.3455
12-août-07	11:22	3.4602
16-nov.-07	10:19	2.2683
09-déc.-07	09:07	2.2822
25-déc.-07	10:07	2.2154
13-janv.-08	14:46	2.4772
09-févr.-08	14:10	2.5315
23-févr.-08	12:12	1.2008
09-mars-08	14:03	2.5812
30-mars-08	11:27	2.7041
20-avr.-08	11:18	2.7419
09-mai-08	11:09	1.2144
02-juin-08	10:40	2.7285
18-juin-08	11:29	2.7894
16-juil.-08	10:56	2.8745
14-août-08	14:56	3.0376
02-sept.-08	11:13	3.0525
24-sept.-08	11:37	2.9473
16-oct.-08	10:31	2.8238
05-nov.-08	09:31	2.6857
05-nov.-08	12:13	2.7254
07-déc.-08	09:46	2.7001
27-déc.-08	09:53	2.6857
19-janv.-09	10:34	2.7629
10-févr.-09	09:57	2.7088
26-févr.-09	10:15	2.8392
14-mars-09	14:15	2.9920
04-avr.-09	10:36	3.0512
27-avr.-09	10:48	2.9864
21-mai-09	15:27	3.3491
23-mai-09	13:03	3.4964
17-juin-09	10:48	3.9193
21-juil.-09	19:05	3.9760
22-juil.-09	15:49	4.1033
05-août-09	15:21	3.6924
18-août-09	11:15	3.8111
05-sept.-09	12:38	2.7902
27-sept.-09	11:11	3.3750
03-nov.-09	09:39	3.6527
19-déc.-09	10:14	4.8482
06-janv.-10	16:19	4.9381

08-févr.-10	09:28	4.1946
17-mars-10	09:51	4.0382
13-avr.-10	10:08	4.5217
03-mai-10	10:14	4.9614
16-juil.-10	11:35	5.8285
27-juil.-10	11:16	4.0694
16-août-10	10:39	4.3734
21-sept.-10	11:17	4.4655
09-nov.-10	09:16	4.2834
17-janv.-11	11:59	4.4241

ALARMES:	ATTENTION	ALERTE	DEFAUT
	3.0542	4.2000	7.1000

Point de mesure G3V --> Shaft 02 Inboard Vertical
 Paramètre: Valeur Globale (RMS mm/Sec)



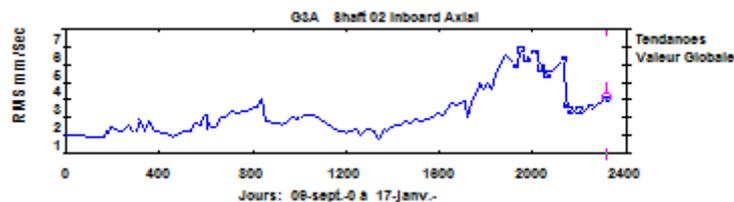
DATE	HEURE	VALEUR	ALARME
----	----	-----	-----
09-sept.-04	04:32	1.87	
17-févr.-05	14:00	1.77	
27-févr.-05	15:46	1.91	
08-mars-05	10:40	1.83	
20-mars-05	10:51	1.94	
20-avr.-05	13:31	2.14	
09-mai-05	12:15	2.05	
08-juin-05	11:30	1.96	
22-juin-05	16:18	2.02	
02-juil.-05	15:14	1.82	
12-juil.-05	14:08	2.18	
13-juil.-05	11:42	2.04	
28-juil.-05	09:39	2.12	
08-août-05	16:17	2.04	
01-sept.-05	11:56	2.82	
20-sept.-05	10:51	2.51	
06-oct.-05	10:56	2.26	
20-oct.-05	12:04	2.43	
14-nov.-05	10:04	2.34	
08-déc.-05	09:27	2.31	
23-déc.-05	15:14	2.35	
18-janv.-06	14:45	2.33	
02-févr.-06	09:27	2.33	
22-févr.-06	09:37	2.29	
12-mars-06	09:35	2.63	
06-avr.-06	12:33	2.77	
16-avr.-06	11:40	2.68	
24-avr.-06	11:16	2.43	
27-avr.-06	11:04	2.56	
06-mai-06	16:42	2.75	
09-mai-06	15:57	2.58	
10-mai-06	10:28	2.88	
23-mai-06	10:09	3.68	
08-juin-06	09:44	2.66	
23-juin-06	11:38	3.30	
08-juil.-06	09:59	3.05	
22-juil.-06	10:42	3.37	
07-août-06	10:45	3.72	

21-août-06	10:09	3.81	
07-sept.-06	10:40	3.55	
17-oct.-06	11:26	3.99	
13-nov.-06	11:00	4.83	C
27-nov.-06	10:28	4.01	
07-déc.-06	14:36	4.68	C
27-déc.-06	09:16	3.81	
15-janv.-07	10:42	2.41	
20-févr.-07	09:07	2.40	
12-mars-07	13:57	2.32	
27-mars-07	08:52	2.25	
16-avr.-07	09:57	2.59	
06-mai-07	10:18	2.81	
26-mai-07	16:12	2.80	
04-juin-07	13:35	2.72	
14-juin-07	10:31	2.83	
05-juil.-07	14:44	2.86	
21-juil.-07	10:10	2.94	
12-août-07	11:22	3.13	
16-nov.-07	10:20	1.27	
09-déc.-07	09:07	1.53	
25-déc.-07	10:07	1.52	
13-janv.-08	14:46	1.47	
09-févr.-08	14:10	1.56	
23-févr.-08	12:12	1.28	
09-mars-08	14:03	1.36	
30-mars-08	11:28	1.65	
20-avr.-08	11:19	1.82	
09-mai-08	11:09	1.20	
02-juin-08	10:41	1.84	
18-juin-08	11:30	1.87	
16-juil.-08	10:56	1.87	
14-août-08	14:56	2.21	
02-sept.-08	11:14	2.28	
24-sept.-08	11:38	2.11	
16-oct.-08	10:32	2.35	
05-nov.-08	09:32	2.13	
05-nov.-08	12:14	1.46	
07-déc.-08	09:47	1.84	
27-déc.-08	09:53	2.00	
19-janv.-09	10:35	2.00	
10-févr.-09	09:58	2.25	
26-févr.-09	10:15	2.25	
14-mars-09	14:15	2.59	
04-avr.-09	10:38	2.79	
27-avr.-09	10:49	2.99	
21-mai-09	15:28	3.54	
23-mai-09	13:06	2.31	
17-juin-09	10:51	2.95	
21-juil.-09	19:06	2.79	
22-juil.-09	15:50	3.58	
05-août-09	15:22	2.89	
06-août-09	14:52	2.86	
18-août-09	11:15	3.62	
05-sept.-09	12:41	2.51	
27-sept.-09	11:11	2.56	
03-nov.-09	09:40	3.01	
19-déc.-09	10:15	3.05	
06-janv.-10	16:20	2.83	
08-févr.-10	09:29	3.45	
17-mars-10	09:51	3.38	
13-avr.-10	10:08	3.32	
03-mai-10	10:15	3.47	
16-juil.-10	11:36	15.62	D
27-juil.-10	11:17	4.81	C
16-août-10	10:39	5.32	C
21-sept.-10	11:18	5.80	C
09-nov.-10	09:17	4.89	C

17-janv.-11 12:00 4.05

ALARMES:	ATTENTION	ALERTE	DEFAULT
	2.35	4.20	7.10

Point de mesure G3A --> Shaft 02 Inboard Axial
 Paramètre: Valeur Globale (RMS mm/Sec)



DATE	HEURE	VALEUR	ALARME
----	-----	-----	-----
09-sept.-04	04:32	2.0657	
17-févr.-05	14:00	1.8884	
27-févr.-05	15:46	2.1976	
08-mars-05	10:41	2.1347	
20-mars-05	10:51	2.4495	
20-avr.-05	13:31	2.2242	
09-mai-05	12:15	2.2515	
08-juin-05	11:31	2.5450	
22-juin-05	16:18	2.2884	
02-juil.-05	15:14	2.2965	
12-juil.-05	14:08	2.5173	
13-juil.-05	11:42	2.8902	
28-juil.-05	09:39	2.5371	
08-août-05	16:17	2.1967	
01-sept.-05	11:56	2.7719	
20-sept.-05	10:52	2.2839	
06-oct.-05	10:56	2.2231	
20-oct.-05	12:05	2.1737	
14-nov.-05	10:05	2.1230	
08-déc.-05	09:27	1.9525	
23-déc.-05	15:14	2.0348	
18-janv.-06	14:45	2.1357	
02-févr.-06	09:27	2.2387	
22-févr.-06	09:37	2.2837	
12-mars-06	09:35	2.6695	
06-avr.-06	12:33	2.6187	
16-avr.-06	11:40	3.0172	
24-avr.-06	11:16	3.0832	
27-avr.-06	11:04	3.1945	
06-mai-06	16:43	3.1286	
09-mai-06	15:58	2.3386	
10-mai-06	10:28	2.9163	
23-mai-06	10:09	2.4016	
08-juin-06	09:44	2.5238	
23-juin-06	11:38	2.8628	
08-juil.-06	10:00	2.9614	
22-juil.-06	10:42	3.0732	
07-août-06	10:45	3.2153	
21-août-06	10:09	3.4190	
07-sept.-06	10:40	3.2673	
17-oct.-06	11:26	3.3897	
13-nov.-06	11:00	3.5282	
27-nov.-06	10:28	3.6231	
07-déc.-06	14:37	3.5557	
27-déc.-06	09:16	4.0408	
15-janv.-07	10:42	2.8093	
20-févr.-07	09:07	2.7036	
12-mars-07	13:57	2.7323	
27-mars-07	08:52	2.5570	

16-avr.-07	09:57	2.8586	
06-mai-07	10:18	2.9774	
26-mai-07	16:12	2.9158	
04-juin-07	13:36	2.9979	
14-juin-07	10:31	3.0209	
05-juil.-07	14:45	3.0914	
21-juil.-07	10:10	3.1765	
12-août-07	11:22	3.2082	
16-nov.-07	10:20	2.2962	
09-déc.-07	09:07	2.2525	
25-déc.-07	10:07	2.1654	
13-janv.-08	14:47	2.2869	
09-févr.-08	14:10	2.3590	
23-févr.-08	12:12	2.0089	
09-mars-08	14:03	2.2954	
30-mars-08	11:28	2.3697	
20-avr.-08	11:19	2.2591	
09-mai-08	11:10	1.7865	
02-juin-08	10:42	2.3642	
18-juin-08	11:30	2.3051	
16-juil.-08	10:57	2.5797	
14-août-08	14:57	2.5621	
02-sept.-08	11:14	2.8614	
24-sept.-08	11:38	2.7187	
16-oct.-08	10:32	2.9483	
05-nov.-08	09:33	2.7504	
05-nov.-08	12:15	2.8207	
07-déc.-08	09:48	2.9470	
27-déc.-08	09:54	3.0761	
19-janv.-09	10:36	3.2860	
10-févr.-09	09:59	3.1968	
26-févr.-09	10:16	3.4745	
14-mars-09	14:16	3.7797	
04-avr.-09	10:39	3.7644	
27-avr.-09	10:50	3.8288	
21-mai-09	15:28	3.9241	
23-mai-09	13:09	2.9831	
17-juin-09	10:51	4.1337	
21-juil.-09	19:06	4.7163	C
22-juil.-09	15:51	4.9458	C
06-août-09	14:47	4.6355	C
18-août-09	11:16	4.9790	C
05-sept.-09	12:44	4.6440	C
27-sept.-09	11:12	5.4029	C
03-nov.-09	09:41	6.5167	C
19-déc.-09	10:16	5.9531	C
12-janv.-10	10:14	6.7528	C
08-févr.-10	09:30	6.2736	C
17-mars-10	09:52	6.6347	C
13-avr.-10	10:09	5.7817	C
03-mai-10	10:15	5.4191	C
16-juil.-10	11:37	6.2355	C
27-juil.-10	11:18	3.7236	
16-août-10	10:40	3.4014	
21-sept.-10	11:19	3.3947	
09-nov.-10	09:18	3.5290	
17-janv.-11	12:00	3.9977	

ALARMES:	ATTENTION	ALERTE	DEFAUT
	3.0939	4.2000	7.1000

VECTEUR D'APPRENTISSAGE

$a = [0.032 \ 0.037 \ 0.029 \ 0.022 \ 0.012 \ 0.010 \ 0.007 \ 0.005 \ 0.015 \ 0.017 \ 0.019 \ 0.019 \ 0.017 \ 0.015 \ 0.013 \ 0.011 \ 0.019 \ 0.017$
 $0.023 \ 0.017 \ 0.021 \ 0.040 \ 0.015 \ 0.010 \ 0.07153 \ 0.00518 \ 0.00504 \ 0.00646 \ 0.05592 \ 0.01643 \ 0.03112 \ 0.01276;$
 $0.083 \ 0.610 \ 0.142 \ 0.066 \ 0.061 \ 0.047 \ 0.032 \ 0.020 \ 0.091 \ 0.343 \ 0.377 \ 0.318 \ 0.103 \ 0.120 \ 0.057 \ 0.036 \ 0.057 \ 0.282$
 $0.688 \ 0.764 \ 0.457 \ 0.371 \ 0.181 \ 0.091 \ 0.07153 \ 0.00518 \ 0.00504 \ 0.00646 \ 0.05592 \ 0.01643 \ 0.03112 \ 0.01276;$
 $0.032 \ 0.037 \ 0.029 \ 0.022 \ 0.012 \ 0.010 \ 0.007 \ 0.005 \ 0.015 \ 0.017 \ 0.019 \ 0.019 \ 0.017 \ 0.015 \ 0.013 \ 0.011 \ 0.019 \ 0.017$
 $0.023 \ 0.017 \ 0.021 \ 0.040 \ 0.015 \ 0.010 \ 0.02837 \ 0.00596 \ 0.00977 \ 0.04857 \ 0.07245 \ 0.07291 \ 0.09173 \ 0.06418];$

VECTEUR DE TEST

$0.091 \ 0.377 \ 0.068 \ 0.031 \ 0.028 \ 0.023 \ 0.005 \ 0.004 \ 0.071 \ 0.485 \ 0.126 \ 0.084 \ 0.058 \ 0.023 \ 0.017 \ 0.012 \ 0.076 \ 0.136$
 $0.275 \ 0.607 \ 0.364 \ 0.169 \ 0.088 \ 0.060 \ 0.07153 \ 0.00518 \ 0.00504 \ 0.00646 \ 0.05592 \ 0.01643 \ 0.03112 \ 0.01276;$

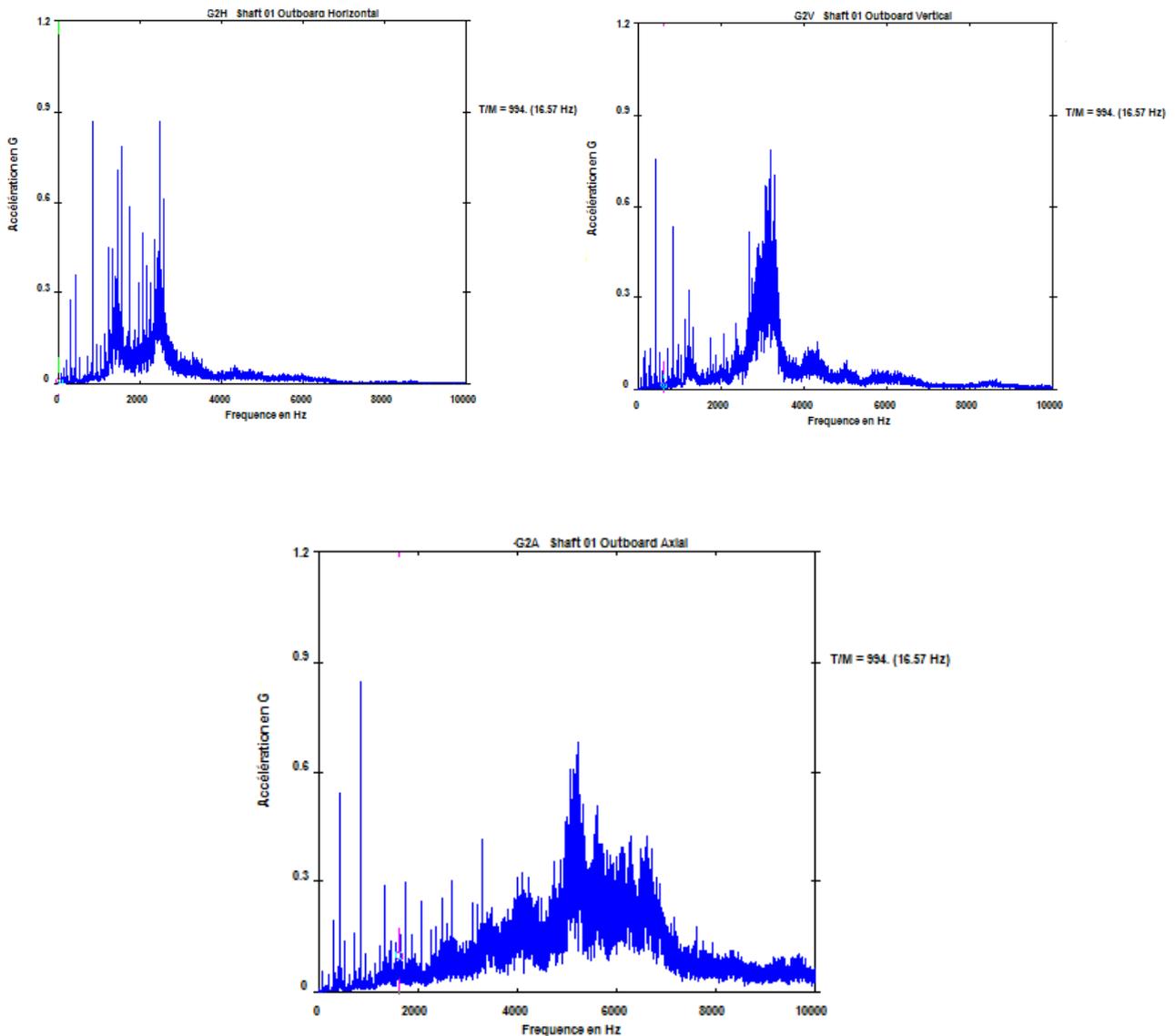


Figure annexe .III. Spectre du signal de test non appris.