

## Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

# Projet de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en génie  
mécanique

Thème :

**SUIVI SUR SITE D'UNE CIMENTRIE AVEC DES  
RELEVES EXPERIMENTAUX ET ANALYSE  
VIBRATOIRE**

Présenté par :  
BENROKIA Mohamed

Encadré par :  
Pr. RECHAK Saïd

## ملخص:

تهدف هذه الدراسة الى متابعة الحالة الاهتزازية على ارض الواقع للماكينات الدوارة، لتحقيق استراتيجية الصيانة الوقائية الشرطية لهذه الاخيرة.

الماكينات الدوارة المعنية بالمتابعة هي الهراس و المهواة ، اذن خلال تحضير مذكرتي قمت بدراسة معمقة على مستوى شركة إسمنت الجزائر بالرايس حميدو.

بصفة عملية، لجأنا الى أخذ قياسات ميدانية بواسطة جهاز التقاط الاهتزازات، المثبت في النقاط المثالية.

الإشارات الاهتزازية المجمعة، عولجت رقميا. بصفة عامة التحليل بالمؤشرات الاهتزازية أعطى نتائج مشجعة، التحليل الطيفي أمكننا بصفة جيدة من تحديد العيوب وإظهار مواقعها.

## كلمات مفتاحية:

استراتيجية المتابعة، الماكينات الدوارة، التحليل الاهتزازي، المؤشرات الاهتزازية، التحليل الطيفي.

## Résumé :

La présente étude consiste à un suivi sur site des machines tournantes, dans un but d'établir une stratégie de maintenance conditionnelle prédictive de ces dernières. Les machines tournantes en question sont des broyeurs et des ventilateurs de la société des ciments Algérois de Raïs Hamidou. Donc durant la préparation de mon mémoire d'ingénieur un stage a été effectué au sein de la dite entreprise.

D'une façon méthodologique, on procède à des prélèvements des mesures sur site à l'aide de capteurs placés dans des endroits optimaux.

L'analyse des signaux recueillis sont par suite numériquement traités. En mode global l'analyse par l'indicateur vibratoire donne déjà des résultats encourageants. L'étude des spectres de fréquences permet une meilleure compréhension de la détection et l'identification des défauts.

**Mots clés:** la stratégie de surveillance, machines tournantes l'analyse vibratoire, indicateur vibratoire, analyse spectrale.

**Abstract:**

The present study consists with a follow-up on site of the revolving machines, with an aim of establishing a strategy of predictive conditional maintenance of rotating machines. The revolving machines in question are crushers and ventilators of the company of Algiers cements of Raïs Hamidou. Thus during the preparation of my report of engineer a training course was carried out within the aforementioned company.

In a methodological way, one carries out taking away of the measurements on site using sensors placed on optimal places.

The analyses of the signals collected are consequently numerically treated. In global mode the analysis by the vibratory indicator gives already encouraging results. The study of the frequency spectrums allows a better comprehension of the detection and the identification of the defects.

**Keywords:** strategy of monitoring, the revolving machines, the vibratory analysis, vibratory indicator, spectral analysis.



## Remerciements

*Au terme de ce Mémoire je tiens à remercier tout naturellement en premier lieu **Dieu le tout Puissant** qui m'a donné la force, le courage et la patience de bien mener ce travail.*

*Ce travail a été réalisé sous la direction de Monsieur **S.RECHAK**, mon promoteur, qu'il trouve ainsi l'expression de ma profonde reconnaissance pour sa compétence, ses encouragements et ses précieux conseils durant le déroulement de ce travail.*

*A la même occasion, je remercie vivement Monsieur **BOUFENAR**, qui est participé au bon déroulement de mon projet de fin d'étude*

*Je tiens aussi à remercier chaleureusement monsieur **ZEBOUDJE**, Le Directeur générale de la société des ciments algérois pour m'avoir aidé avec compétence et bienveillance.*

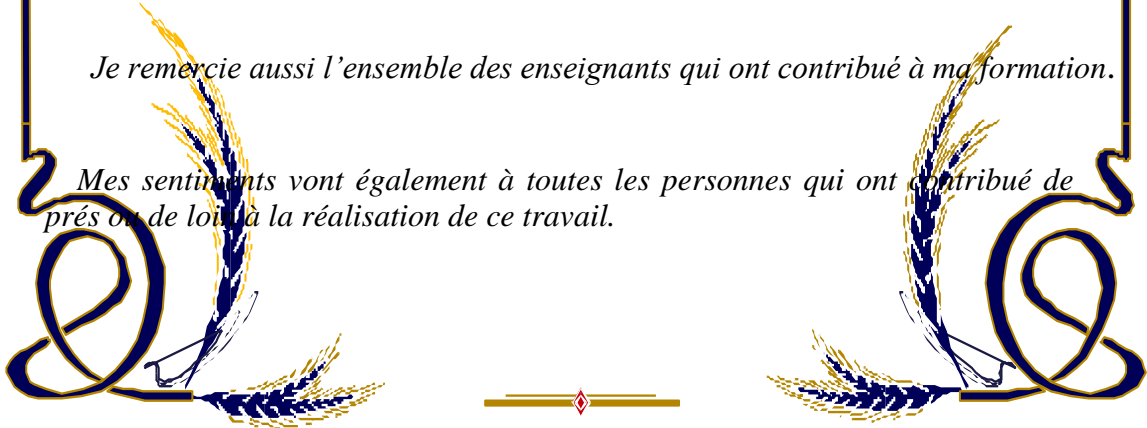
*Un grand remerciement s'adresse également à Monsieur **BENKHEDDA** ingénieur dans la cimenterie, toujours disponible et impliqué.*

*De plus, je remercie tous les employés de la SCAL de m'avoir accueilli comme un des leurs le long de mon travail et spécialement l'effectifs du BTC.*

*Je remercie Monsieur **BELKACEMI**, qui a bien voulu assurer la présidence du jury ainsi que Monsieur **MADANI**, et Monsieur **GUERGUEB** pour avoir accepté de juger ce modeste travail.*

*Je remercie aussi l'ensemble des enseignants qui ont contribué à ma formation.*

*Mes sentiments vont également à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*





# Dédicaces

*Au-delà des personnes, des lieux et des temps, je dédie ce travail avec ma profonde conviction, à tous ceux qui ont toujours cru et sans doute à la Science. Cette lumière qui éclaire les esprits et leur permet de transcender les limites installées par les sociétés et les cultures dans leurs périodes de dégénérescence.*

*Je le dédie aussi :*

*A la lumière de ma vie, mes chers parents en témoignage pour leur amour et leur sacrifice sans limites que je souhaite leurs bonne santé et que Dieu me les garde.*

*A mes deux frères (Y et M) et à ma sœur (A).*

*A tous mes amis.*

**Kamel**



## Table des matières

Nomenclature .....	xi
Liste des tableaux .....	xii
Liste des figures .....	xiii

### Introduction générale.

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

### Chapitre I : Présentation de la cimenterie.

I.1 Historique.....	5
I.2 Définition du ciment.....	5
I.3 Les étapes de fabrication du ciment à la SCAL.....	6
I.3.1 Extraction de la matière première.....	6
I.3.2 Atelier de concassage.....	6
I.3.3 Le stockage.....	6
I.3.4 Atelier de broyage du cru.....	6
I.3.5 Atelier homogénéisation.....	7
I.3.6 Atelier de cuisson.....	7
I.3.7 Le broyage du CLINKER.....	7
I.3.8 Obtention du Ciment.....	8
I.4 Circuit poussière et le but de son installation.....	9
I.5 Expédition du ciment.....	9
I.5.1 Mise en SAC et chargement.....	9
I.5.2 Chargement du VRAC.....	9
I.5.3 La nature des sacs utilisés pour l'ensachage.....	9
I.6 Répartition des effectifs à la SCAL.....	10

I.7 Les équipements rencontrés à la cimenterie.....	10
I.7.1 L'usine supérieure.....	10
I.7.2 L'usine inférieure.....	11
 <b>Chapitre II : Etude de choix et descriptions des machines tournantes.</b>	
II.1 Introduction aux machines tournantes.....	13
II.2 Définitions – Descriptions.....	13
II.2.1 Définition.....	13
II.2.1.1 Le rotor.....	14
II.2.1.2 La structure.....	14
II.2.1.3 Les liaisons.....	14
II.3 Le choix des machines concernées par le Suivi.....	15
II.4 Collecte des informations techniques sur le deux équipements.....	15
II.4.1 Le broyeur ciment AC BK III.....	15
II.4.2 Le ventilateur AAF1.....	19
II.5 Etude de leurs principaux défauts.....	19
II.5.1 Introduction.....	19
II.5.2 Le déséquilibre massique (défaut de balourd).....	20
II.5.2.1 Définition.....	20
II.5.2.2 Manifestations.....	20
II.5.3 Défaut d'alignement.....	21
II.5.3.1 Définition.....	21
II.5.3.2 Désalignement d'arbres accouplés.....	21
II.5.3.3 Désalignement des paliers.....	23
II.5.4 Défauts de serrage.....	23
II.5.5 Défauts de transmission par courroies.....	24

II.5.5.1 Fréquence caractéristique.....	24
II.5.6 Les défauts des engrenages.....	25
II.5.6.1 Définition.....	25
II.5.6.2 Fréquence d'engrènement.....	26
II.5.6.3 Signatures vibratoires des défauts d'engrènement.....	27
II.5.6.3.1 Détérioration d'une dent.....	27
II.5.6.3.2 Détérioration de deux dents sur les deux roues.....	28
II.5.6.3.3 Détérioration de l'ensemble de dentures.....	28
II 5.6.3.4 Entraxe insuffisant (jeu insuffisant au fond de denture).....	29
II.5.6.3.5 Jeu de fond de denture trop grand.....	29
II.5.6.3.6 Défauts induisant une modulation d'amplitude.....	30
II.5.7 Les défauts de roulements.....	30
II.5.7.1 Signatures vibratoires des principaux défauts.....	31
II.5.7.1.1 Défaut de type écaillage affectant la bague externe.....	31
II.5.7.1.2 Défaut de type écaillage affectant élément roulant.....	32
II.5.7.1.3 Défauts de type déversement de bague.....	32
II.5.8 Passages de pales.....	33
<b>Chapitre III : Méthodologie élaborée du travail expérimental.</b>	
III.1 Introduction.....	35
III.2 La chaîne de mesure.....	35
III.3.1 Le capteur.....	35
III.3.2 Système Microlog GX.....	36
III.3.2.1 Collecteur de données Microlog GX.....	36
III.3.2.2 Le logiciel Machine Analyst.....	36
III.4 Le paramétrage des points de mesures.....	37
III.5 Le banc d'essai du laboratoire.....	37



III.5.1 Le travail sur le banc d'essai.....	37
III.5.2 Description du banc d'essai.....	38
III.5.3 Caractéristiques techniques du banc d'essais.....	38
III.6 La surveillance du broyeur clinker et du ventilateur AAF.....	39
III.6.1 La configuration des points de mesure.....	40
III.6.2 Choix du mode d'investigation.....	41
III.6.3 La méthodologie de diagnostique.....	41
III.6.3.1 Niveau global accélération.....	42
III.6.3.1.1 Danger de l'effet de masque.....	42
III.6.3.1.2 Limites du suivi en mode global.....	42
III.6.3.2 Analyse spectrale.....	43
III.6.3.2.1 Les indicateurs spectraux.....	43
III.6.3.2.2 l'intérêt pratique de l'analyse spectrale.....	44

### **Chapitre IV : Etude Expérimentale.**

IV.1 Introduction.....	45
IV.1 Le broyeur.....	45
IV.2 Le ventilateur.....	52

### **Chapitre V : Interprétation des résultats.**

V.1 Introduction.....	56
V.2 Le travail sur banc d'essai.....	56
V.2.1 La chaine cinématique du banc d'essai.....	56
V.2.2 Calcul cinématique.....	57
V.2.3 Etude de cas (défaut de balourd).....	57
V.2.4 Conclusion.....	61
V.3 La surveillance des deux machines de la cimenterie.....	61
V.3.1 Etude cinématique des deux machines.....	61

---

V.3.1.1 Les chaînes cinématiques des deux équipements.....	61
V.3.1.2 Calcul des données techniques principales.....	62
V.3.2 Analyse des Résultats expérimentaux (LE BROYEUR).....	65
V.3.2.1 Analyse en niveau global accélération.....	65
V.3.2.1.1 Les courbes de tendance des paliers 2, 3, 4 et 5.....	66
V.3.2.2 L'analyse spectrale des mesures effectuées aux points 2, 3,4 et 5.....	69
V.3.2.2.1 Indicateur d'après la fréquence d'engrènement $F_e$ , avec ses harmoniques.....	72
V.3.3.2.2 Indicateur d'après la fréquence de rotation $F_r$ , avec ses harmoniques.....	75
V.3.3 Analyse des Résultats expérimentaux (LE VENTILATEUR).....	82
V.3.3.1 Analyse en niveau global accélération.....	82
V.3.2.1.1 Les courbes de tendance des paliers 2 et 3.....	82
V.3.3.2 L'analyse spectrale des mesures radiales.....	84
V.3.3.2.1 Indicateur d'après la fréquence de défaut de roulement.....	85
V.4 Conclusion.....	88
<b>Conclusion générale.</b>	
Conclusion générale.....	89
<b>Bibliographie</b> .....	91
<b>Annexe</b> .....	92

## Nomenclature.

$F_R$  : Fréquence de rotation.

$N$  : Vitesse de rotation tr/min.

$F_C$  : Fréquences caractéristique du défaut de courroies.

$F_e$  : fréquence d'engrènement.

$F_{dbe}$  : Fréquence caractéristique du défaut localisé sur la bague externe.

$F_{dbi}$  : Fréquence caractéristique du défaut localisé sur la bague interne.

$F_{er}$  : Fréquence caractéristique du défaut localisé sur l'élément roulant

$Z$  : nombre de billes.

$d$  : diamètre d'une bille.

$D$  : diamètre moyen du roulement.

$\varphi$  : Angle de contact.

$F_{pales}$  : fréquence caractéristique des défauts dus au passage des pales.

$n$  : nombre de pales.

$NG$  : Niveau global.

$R$  : radiale.

$A$  : axiale.

## Liste des tableaux.

<b>Tableau1.1</b> : répartition des effectifs à la SCAL.....	10
<b>Tableau1.2</b> : équipements d'usine supérieure.....	11
<b>Tableau1.3</b> : équipements d'usine inférieure.....	12
<b>Tableau III.1</b> : Localisation des défauts dans les transmissions de puissance à engrenages.....	39
<b>Tableau V.1</b> : la fréquence de rotation et ces harmoniques.....	57
<b>Tableau V.2</b> : Les fréquences caractéristiques du broyeur.....	63
<b>Tableau V.3</b> : Les fréquences caractéristiques du ventilateur.....	63
<b>Tableau V.4</b> : les fréquences des défauts des roulements du broyeur.....	64
<b>Tableau V.5</b> : les fréquences des défauts des roulements du ventilateur .....	64
<b>Tableau V.6</b> : les niveaux globaux en accélération pour tous les points de mesure.....	65
<b>Tableau V.7</b> : Les amplitudes prépondérantes à la fréquence d'engrènements et ces harmoniques pour le palier 02.....	73
<b>Tableau V.8</b> : Les amplitudes prépondérantes à la fréquence d'engrènements et ces harmoniques pour le palier 03.....	74
<b>Tableau V.9</b> : Les amplitudes prépondérantes à la fréquence d'engrènements et ces harmoniques pour le palier 04.....	74
<b>Tableau V.10</b> : Les amplitudes prépondérantes à la fréquence d'engrènements et ces harmoniques pour le palier 05 .....	74
<b>Tableau V.11</b> : les amplitudes prépondérantes aux harmoniques de la fréquence de rotation palier 02.....	81
<b>Tableau V.12</b> : les amplitudes prépondérantes aux harmoniques de la fréquence de rotation palier 03.....	81
<b>Tableau V.13</b> : les niveaux globaux en accélération pour tous les points de mesure durant notre suivi.....	82

**Liste des figures.**

<b>Figure II.1</b> : Éléments d'une machine tournante.....	13
<b>Figure II.2</b> : Le broyeur ciment AC BK II (vue sur cite) .....	15
<b>Figure II.3</b> : MOTEUR vue sur site.....	16
<b>Figure II.4</b> : ACCOUPLEMENT vue sur site.....	16
<b>Figure II.5</b> : REDUCTEURE vue sur cite.....	17
<b>Figure II.6</b> : ACCOUPLEMENT + les deux paliers vus réelle.....	17
<b>Figure II.7</b> : ACCOUPLEMENT vue sur site.....	18
<b>Figure II.8</b> : LA COURONNE vue sur cite.....	18
<b>Figure II.9</b> : Tolérances d'usinage sur un rotor.....	20
<b>Figure II.10</b> : Spectre réel d'un moteur tournant à 1502 tr/mn (25,03 Hz) traduisant la présence d'un balourd.....	21
<b>Figure II.10</b> : défauts d'alignement d'arbres.....	21
<b>Figure II.11</b> : Image vibratoire d'un défaut d'alignement radial.....	22
<b>Figure II.12</b> : Images vibratoires d'un défaut d'alignement angulaire.....	22
<b>Figure II.13</b> : Défaut d'usure d'accouplement.....	23
<b>Figure II.14</b> : Défaut de courroie.....	24
<b>Figure II.15</b> : Image vibratoire théorique d'un défaut de transmission par courroie.....	25
<b>Figure II.16</b> : Différents types d'engrenage.....	26
<b>Figure II.17</b> : Efforts sur les dents d'engrenage selon le type de denture.....	26
<b>Figure II.18</b> : Image vibratoire d'un engrenage sain.....	27
<b>Figure II.19</b> : Image vibratoire théorique d'un engrenage présentant une dent détériorée....	27
<b>Figure II.20</b> : Image vibratoire théorique d'une denture usée.....	28
<b>Figure II.21</b> : Image théorique et d'un engrènement en fond de denture.....	29
<b>Figure II.22</b> : Image vibratoire théorique d'un engrenage présentant une dent détériorée....	29
<b>Figure II.23</b> : Image théorique de la modulation d'amplitude de $F_e$ par $F_r$ .....	30

<b>Figure II.24</b> : les cotes de fabrication du roulement.....	31
<b>Figure II.25</b> : Image vibratoire théorique d'un défaut de type écaillage sur bague extérieure .....	32
<b>Figure II.26</b> : Image vibratoires théorique d'un défaut de type écaillage sur un élément roulant.....	32
<b>Figure II.27</b> : Image vibratoires théorique d'un défaut de type déversement de bague.....	33
<b>Figure III.1</b> : La chaîne de mesure.....	35
<b>Figure III.2</b> : le Microlog GX.....	36
<b>Figure III.3</b> : banc d'essai pour étudier le défaut de balourd, dégradations des roulements et le défaut de l'accouplement.....	38
<b>Figure III.4</b> : représentation des points de mesure de vibration.....	40
<b>Figure III.5</b> : représentation spectrale d'un signale vibratoire.....	43
<b>Figure IV.1</b> : Chaine cinématique du broyeur ciment AC BK II.....	45
<b>Figure IV.2</b> : les spectres du point 1R représentés en cascade [0-10000Hz] .....	46
<b>Figure IV.3</b> : les spectres du point 2R représentés en cascade [0-10000Hz] .....	46
<b>Figure IV.4</b> : les spectres du point 2A représentés en cascade [0-10000Hz].....	47
<b>Figure IV.5</b> : les spectres du point 3R représentés en cascade [0-10000Hz] .....	47
<b>Figure IV.6</b> : les spectres du point 3A représentés en cascade [0-10000Hz] .....	47
<b>Figure IV.7</b> : les spectres du point 4R représentés en cascade [0-10000Hz] .....	48
<b>Figure IV.8</b> les spectres du point 4A représentés en cascade [0-10000Hz] .....	48
<b>Figure IV.9</b> les spectres du point 5R représentés en cascade [0-10000Hz] .....	48
<b>Figure IV.10</b> : les spectres du point 5A en cascade [0-10000Hz] .....	49
<b>Figure IV.11</b> : les spectres du point 6R représentés en cascade [0-10000Hz] .....	49
<b>Figure IV.12</b> : les spectres du point 6A représentés en cascade [0-10000Hz] .....	49
<b>Figure IV.13</b> : les spectres du point 7R représentés en cascade [0-10000Hz] .....	50
<b>Figure IV.14</b> : les spectres du point 7A représentés en cascade [0-10000Hz] .....	50
<b>Figure IV.15</b> : les spectres du point 8R représentés en cascade [0-10000Hz] .....	50
<b>Figure IV.16</b> : les spectres du point 8A représentés en cascade [0-10000Hz] .....	51

<b>Figure IV.17</b> : les spectres du point 9R représentés en cascade [0-10000Hz] .....	51
<b>Figure IV.19</b> : les spectres du point 9A représentés en cascade [0-10000Hz] .....	51
<b>Figure IV.20</b> : Chaîne cinématique du ventilateur AAF1 .....	52
<b>Figure IV.21</b> : les spectres du point 1R représentés en cascade [0-10000Hz] .....	52
<b>Figure IV.22</b> : les spectres du point 1A représentés en cascade [0-10000Hz] .....	53
<b>Figure IV.22</b> : les spectres du point 2R représentés en cascade [0-10000Hz] .....	53
<b>Figure IV.23</b> : les spectres du point 2A représentés en cascade [0-10000Hz] .....	53
<b>Figure IV.24</b> : les spectres du point 3R représentés en cascade [0-10000Hz] .....	54
<b>Figure IV.25</b> : les spectres du point 3A représentés en cascade [0-10000Hz] .....	54
<b>Figure IV.26</b> : les spectres du point 4R représentés en cascade [0-10000Hz] .....	54
<b>Figure IV.27</b> : les spectres du point 4A représentés en cascade [0-10000Hz] .....	55
<b>Figure V.1</b> : chaîne cinématique du banc d'essai.....	56
<b>Figure V.2</b> : spectre du Palier N°1 sans ajout de masse.....	58
<b>Figure V.3</b> : spectre du Palier N°1 avec ajout de masse au niveau du disque 11.....	58
<b>Figure V.4</b> : spectre du Palier N°1 avec ajout de 2 masses (déphasage 0) .....	59
<b>Figure V.5</b> : spectre du Palier N°1 ajout de 2 masses (déphasage 180°).....	59
<b>Figure V.6</b> : spectre du Palier N°2 sans ajout de masse.....	59
<b>Figure V.7</b> : spectre du Palier N°2 avec ajout de masse au niveau du disque 11.....	60
<b>Figure V.8</b> : spectre du Palier N°2 avec ajout de 2 masses (déphasage 0) .....	60
<b>Figure V.9</b> : spectre du Palier N°2 avec ajout de 2 masses (déphasage 180°).....	60
<b>Figure V.10</b> : Chaîne cinématique du broyeur ciment AC BK II.....	62
<b>Figure V.11</b> : Chaîne cinématique du ventilateur AAF1.....	62
<b>Figure V.12</b> : La courbe de tendance du point 2R en NG Accélération.....	66
<b>Figure V.13</b> : La courbe de tendance du point 2A en NG Accélération.....	66
<b>Figure V.14</b> : La courbe de tendance du point 3R en NG Accélération.....	67
<b>Figure V.15</b> : La courbe de tendance du point 3A en NG Accélération.....	67
<b>Figure V.16</b> : La courbe de tendance du point 4R en NG Accélération.....	67

<b>Figure V.17</b> : La courbe de tendance du point 4A en NG Accélération.....	68
<b>Figure V.18</b> : La courbe de tendance du point 5R en NG Accélération.....	68
<b>Figure V.19</b> : La courbe de tendance du point 5A en NG Accélération.....	68
<b>Figure V.20</b> : les spectres du point 2R en cascade.....	69
<b>Figure V.21</b> : les spectres du point 2A en cascade.....	69
<b>Figure V.22</b> : les spectres du point 3R en cascade.....	70
<b>Figure V.23</b> : les spectres du point 3A en cascade.....	70
<b>Figure V.24</b> : les spectres du point 4R en cascade.....	70
<b>Figure V.25</b> : les spectres du point 4A en cascade.....	71
<b>Figure V.26</b> : les spectres du point 5R en cascade.....	71
<b>Figure V.27</b> : les spectres du point 5A en cascade.....	71
<b>Figure V.28</b> : spectre du point 2R après un zoom (le 15/06/2011) .....	72
<b>Figure V.29</b> : spectre du point 3R après un zoom (le 26/06/2011) .....	72
<b>Figure V.30</b> : spectre du point 4A après un zoom (le 30/06/2011) .....	73
<b>Figure V.31</b> : spectre du point 5R après un zoom (le 26/06/2011) .....	73
<b>Figure V.32</b> : spectre du point 2R après un zoom (le 15/06/2011) .....	75
<b>Figure V.32</b> : spectre du point 2R après un zoom (le 26/06/2011) .....	76
<b>Figure V.33</b> : spectre du point 2R après un zoom (le 30/06/2011) .....	76
<b>Figure V.34</b> : Spectre du point 2R après un zoom (le 10/07/2011) .....	76
<b>Figure V.35</b> : spectre du point 2A après un zoom (le 15/06/2011) .....	77
<b>Figure V.36</b> : spectre du point 2A après un zoom (le 26/06/2011) .....	77
<b>Figure V.37</b> : spectre du point 2A après un zoom (le 30/06/2011) .....	77
<b>Figure V.38</b> : spectre du point 2A après un zoom (le 10/07/2011) .....	78
<b>Figure V.39</b> : spectre du point 3R après un zoom (le 15/06/2011) .....	78
<b>Figure V.40</b> : spectre du point 3R après un zoom (le 26/06/2011) .....	78
<b>Figure V.41</b> : spectre du point 3R après un zoom (le 30/06/2011) .....	79
<b>Figure V.42</b> : spectre du point 3R après un zoom (le 10/07/2011) .....	79



<b>Figure V.43</b> : spectre du point 3A après un zoom (le 15/06/2011) .....	79
<b>Figure V.44</b> : spectre du point 3A après un zoom (le 26/06/2011) .....	80
<b>Figure V.45</b> : spectre du point 3A après un zoom (le 30/06/2011) .....	80
<b>Figure V.46</b> : spectre du point 3A après un zoom (le 10/07/2011) .....	80
<b>Figure V.47</b> : La courbe de tendance du point 2R en NG Accélération.....	83
<b>Figure V.48</b> : La courbe de tendance du point 2A en NG Accélération.....	83
<b>Figure V.49</b> : La courbe de tendance du point 3R en NG Accélération.....	83
<b>Figure V.50</b> : La courbe de tendance du point 3A en NG Accélération.....	84
<b>Figure V.51</b> : les spectres du point 2R en cascade .....	84
<b>Figure V.52</b> : les spectres du point 3R en cascade.....	85
<b>Figure V.53</b> : spectre du point 3R (le 10/07/2011) .....	85
<b>Figure V.54</b> : spectre du point 3R après un zoom (le 10/07/2011) .....	86
<b>Figure V.55</b> : spectre du point 3R après un zoom en indiquant la fréquence étudié (le 10/07/2011) .....	86
<b>Figure V.56</b> : spectre du point 3R après un zoom en indiquant la 8 <sup>ème</sup> harmonique de la fréquence étudié (le 10/07/2011) .....	86
<b>Figure V.57</b> : spectre du point 3R après un zoom en indiquant la 9 <sup>ème</sup> harmonique de la fréquence étudié(le 10/07/2011) .....	87
<b>Figure V.58</b> : spectre du point 3R après un zoom en indiquant la 13 <sup>ème</sup> harmonique de la fréquence étudié(le 10/07/2011) .....	87
<b>Figure V.59</b> : spectre du point 3R après un zoom en indiquant la 19 <sup>ème</sup> harmonique de la fréquence étudié(le 10/07/2011) .....	87

# **Introduction générale**

La vie des entreprises des pays industrialisés où en voie de l'être est caractérisée par des mutations profondes : technologiques, économiques et sociales.

Il en est ainsi pour notre pays avec l'édification d'une base industrielle importante souvent avec l'apport initial des technologies occidentales, et avec la mondialisation des marchés qui a accru le besoin de maintenance et d'optimisation du niveau de performance des outils de production.

Le patrimoine industriel rencontre des difficultés pour assurer une maintenance appropriée qui répond à un besoin nouveau : celui de maîtriser techniquement et économiquement des systèmes productifs automatisés dans un environnement fortement informatisé, tout en évitant de mettre en péril la sécurité des personnes, contribuant ainsi à la pérennité.

Or, comme les pannes et les incidents des systèmes de production sont l'un des fléaux majeurs de l'industrie et viennent amputer lourdement la capacité de production, voire accroître le prix de revient. Le problème d'accessibilité des éléments de machines peut être une cause dans la longueur de réparation de certaines pannes, le démontage est difficile et coûteux en temps et moyens. De plus, l'impact que peut laisser une fonction cachée dont la défaillance n'est pas évidente à l'équipage, durant les cours des rondes normales des opérateurs. Il faut signaler aussi, qu'un manque de pièce de rechange à un moment critique peut induire des frais directs et indirects importants, sinon une immobilisation des sommes importantes dans le stock de pièces de rechanges, la panne entraîne donc une perte de production, avec son inévitable coût, un glissement dans les délais de livraison qui rejaillit sur la crédibilité et l'image de la société sans compter les erreurs humaines inévitables, lors des arrêts et des remises en service.

Les pannes imprévues sont quelques fois très coûteuses. La perte de production pendant les réparations engendre un manque à gagner qui peut affecter les bénéfices de l'entreprise. Si l'on y ajoute les problèmes de sécurité insuffisante pour le personnel, la qualité de production amoindrie et la perte éventuelle de réputation pour l'entreprise, il devient évident que de telles pannes ne doivent pas être tolérées. Pour régler ce problème, il faut trouver une nouvelle approche de maintenance dans les ateliers.

Les méthodes traditionnelles de maintenance se contentent de faire fonctionner les machines jusqu'à rupture, ou bien d'effectuer la maintenance à intervalles fixes.

La première approche concerne les machines peu coûteuses et dupliquées, lorsqu'une perte de production peut être tolérée sur une unité. La seconde méthode, appelée maintenance préventive, présente le risque que des machines en parfaite état de marche soit arrêter inutilement, soit des machines sur le point de tomber en panne sont inconsciemment laissées sans surveillance.

L'approche moderne consiste à mesurer l'état d'une machine pendant son fonctionnement afin de n'intervenir que lorsque les paramètres l'indiquent. Cette méthode est appelée maintenance conditionnelle (prédictive).

Pour que la maintenance conditionnelle soit efficace, il faut des mesures précises et fiables de l'état des machines. Un certain nombre de variables des machines peuvent être utilisées: la température, la pression d'huile. Cependant, l'expérience a montré que le paramètre le plus adéquat qui donne d'une façon fiable et précise l'état de détérioration d'une machine tournante est **la vibration**.

Toutes les machines vibrent et, au fur et à mesure que l'état de la machine se détériore (déséquilibre d'un arbre, défaut de roulement ou de boîte de vitesse) le niveau de vibration augmente. En mesurant et en surveillant le niveau de vibration produit par une machine, on obtient un indicateur idéal sur son état.

Si l'augmentation de vibration de la machine permet de détecter un défaut, l'analyse des caractéristiques de vibration de la machine permet d'en identifier la cause. On peut ensuite en déduire avec précision le délai avant qu'il ne devienne critique.

Le monde de l'industrie et le monde des cimenteries disposent de machines et d'installations de plus en plus performantes et complexes. Les exigences de haute sécurité, la réduction des coûts d'exploitation et la maîtrise de la disponibilité des équipements donnent à la maintenance des systèmes un rôle prépondérant. Elle doit permettre de n'intervenir qu'en présence d'éléments défectueux, de minimiser le temps de réparation, et de fournir un diagnostic fiable et facilement interprétable malgré la complexité des équipements. Or, les coûts de maintenance des cimenteries représentent une part particulièrement importante du « **life cycle cost** » (LCC).

Dans leur majorité, suite à une enquête menée dans les cimenteries de l'Algérie, l'entretien des machines et le remplacement des pièces soumises à usure pouvaient être envisagés de deux manières : l'attente de la casse (maintenance curative) ou le remplacement à intervalles réguliers (maintenance préventive). L'attente de la casse n'est plus économique et les interventions systématiques sont souvent inutiles, coûteuses en pièces de rechange, main d'œuvre et perte de production, compte tenu des erreurs humaines inévitables, lors des arrêts et des remises en service. Ces interventions peuvent nuire à la fiabilité. Donc, l'idée est de ne plus combattre les effets, mais de traiter les causes. Aussi l'optimisation de ces coûts est un enjeu majeur dans ce secteur concurrentiel et stratégique dans les secteurs de l'habitat et la construction. L'extraction du ciment représente la partie en amont de cette industrie et à l'opposé, la partie en aval qui est la panne.

C'est pourquoi, on s'intéresse particulièrement dans ce travail, aux principales machines utilisées dans l'industrie du ciment.

Un stage a été effectué au sein de la société des ciments algérois durant un mois (du 15.06.2011 au 15.07.2011), on a arrivé à choisir deux machines tournantes pour faire le suivi

de leurs états vibratoires. La première machine est un broyeur qui est alimenté par un moteur qui tourne à 986 tr/min, sa chaîne cinématique comprend aussi un réducteur de vitesse, trois accouplements et neuf paliers. La deuxième machine est le ventilateur qui comprend un moteur de vitesse de rotation égale à 990tr/min et une transmission par courroies, une turbine et quatre paliers. Ces deux équipements ont une importance capitale dans la production des ciments.

La démarche pour l'investigation, consiste en premier lieu, de faire une analyse des NG acc (niveau globale accélération) qui déclare le problème dans son ensemble, ce qui nécessite de faire une analyse poussée utilisant la méthode de l'analyse spectrale pour identifier l'origine du problème à l'aide d'une chaîne d'acquisition qui comporte principalement un collecteur de données Microlog GX et un Ordinateur sur lequel est installé le logiciel Machine Analyst. Sur le logiciel machine analyst une hiérarchie est préalablement préparée selon la chaîne cinématique de l'équipement qu'on veut surveiller. Cette hiérarchie sera déchargée dans le collecteur Microlog GX pour effectuer les mesures appropriées au niveau des points de mesure choisis. Après la prise des relevés à l'aide de l'accéléromètre relié avec le Microlog, la hiérarchie sera chargée dans le logiciel machine analyst pour pouvoir manipuler facilement les spectres représentatifs de comportement vibratoire de notre structure collectés et traités par le Microlog, afin de recueillir les informations nécessaires sur l'état vibratoire de l'installation.

Les résultats aboutis sont satisfaisants de façon générale, on a pu détecter les défauts qui sont la cause de l'augmentation des niveaux vibratoire des deux machines.

Après cette introduction notre travail est organisé en cinq chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la présentation de la cimenterie de Raïs Hamidou, où j'ai effectué mon stage durant un mois en citant des généralités sur les étapes de fabrication des ciments et les machines tournantes rencontrées au sein de l'entreprise.

Le deuxième chapitre est commencé par quelques définitions concernant les machines tournantes et l'étude de choix de ces machines concernées par le suivi, ensuite on a cité leurs informations techniques nécessaires pour l'étude cinématique, et leurs principaux défauts qui peuvent manifester sur les signaux recueillis.

Le troisième chapitre a pour but de mentionner la méthodologie élaborée dans notre travail expérimental, et montré l'intérêt pratique de cette démarche, après avoir représenté la chaîne de mesure et décrire ces principaux appareils.

Le quatrième chapitre présente l'ensemble des mesures prises durant notre suivi. Les mesures sont représentées en cascade, qu'est une représentation en trois dimensions (amplitude, fréquence, date de la prise de mesure).

Le cinquième chapitre représente l'étude cinématique des machines choisis et l'analyse des résultats obtenus durant notre suivi, commençant par l'analyse des mesures avec l'indicateur vibratoire en niveau global d'accélération, cette première démarche est suivie par une étude

des spectres de fréquences. Ce chapitre valide bien la performance de l'analyse vibratoire dans les travaux de gestion de la maintenance.

Finalement, on termine ce travail par une conclusion générale et des recommandations destinées aux services de maintenance des entreprises et sociétés industrielles algériennes.

# Chapitre I : Présentation de la cimenterie

## I.1 Historique

L'usine primitive a été édifiée sur les canaux d'une carrière de pierre, qu'exploitait la société « MARBRE » pour les travaux du port d'Alger avant 1914.

Au début, l'usine a commencé à travailler par voie sèche puis, en 1938 la voie sèche a été abandonnée pour la voie humide. Il convient de rappeler qu'une des grandes difficultés résidait dans des positions respectives de l'usine et de sa carrière. La solution adoptée était de faire deux usines une de cru dans la carrière, une autre de cuit dans l'ancienne usine et on les a reliées par une conduite descendant la pâte des ateliers de broyage du cru aux ateliers du cuit.

Il fallait aménager une route reliant la nouvelle usine supérieure à celle du bas, et amorcer un autre fond de carrière à une côte différente, propre à l'implantation d'un puissant et moderne atelier de concassage. Le problème consistait à faire également du neuf à la place de l'ancien, mais en n'arrêtant pas la production.

Le pouvoir révolutionnaire conscient de son devoir procède à la nationalisation de cette unité en 1968, actuellement, l'unité de RAIS HAMIDOU occupe une place prépondérante dans l'économie nationale. Sa production annuelle relativement importante est de 350.000 tonnes de ciment. Le produit fini c'est à dire le ciment est écoulé vers différents consommateurs, Sociétés Nationales ou particulières.

Cette unité existe depuis 1914, elle a été exploitée par la société « LA FARGE » jusqu'au 14 Juin 1998, et depuis elle est devenue autonome sous le nom de SCAL (société des ciments Algérois) « filiale ERCC », située sur le total de la côte ouest de la capitale Alger environ 7km à l'ouest d'Alger, commune de RAIS HAMIDOU Daïra de BAB EL OUED

## I.2 Définition du ciment

Le ciment est un liant hydraulique, une matière inorganique finement moule qui est mélangée avec de l'eau, forme une pâte faisant prise et durcissant progressivement au cours du temps même à l'abri de l'air, et notamment sous l'eau.

Le pourcentage de la matière première qui entre dans la composition du ciment portland élaboré dans la cimenterie de Rais Hamido est le suivant : 80% de calcaire ; 17% de l'argile ; 2% de sable ; 1% de minerai de fer.

L'unité RAIS HAMIDOU est destinée à la fabrication du ciment PORTLAND ARTIFICIEL CPJ CEM II A 32.5. La méthode adoptée dans celle-ci est la méthode humide ou fabrication par voie humide, c'est à dire par délayage des constituants.

### **I.3 Les étapes de fabrication du ciment au SCAL**

#### **I.3.1 Extraction de la matière première**

Le calcaire ainsi que le schiste, se trouvant au niveau de la carrière sous forme de gisement (couche minérale dans le sein de la terre). En premier lieu, on fait une exploration suivie par un sondage, puis le tir se fait par des explosifs. Une fois que le matériau est prêt, le chargement se fait à l'aide d'une pelle mécanique. Quant au transport, il est effectué par des camions « Bennes » tout terrain; jusqu'au concasseur.

#### **I.3.2 Atelier de concassage**

Les matières premières à savoir le calcaire et le schiste sont introduits dans un premier temps dans un concasseur à cloche afin de subir un concassage primaire, les rejets passent par un système de criblage; les matières inférieures à la dimension des mailles iront en produit fini, par contre l'autre partie subit un concassage secondaire ( concasseur à marteaux).

#### **I.3.3 Le stockage**

Les matières premières seront stockées dans un hall qui est partagé afin de permettre un meilleur stockage. La reprise de cette matière première fragmentée (calcaire, schiste) ainsi que le sable et minerai de fer se fait à l'aide d'un pont roulant vers les quatre trémies.

#### **I.3.4 Atelier de broyage du cru**

Il est équipé de deux broyeurs à boulets; dont chacun est doté de quatre doseurs dans lesquels sont amenées les quatre matières premières ; on fait également un dosage en eau estimée entre 32 et 35%. A la sortie du broyeur, la pâte bien homogénéisée passe à travers une grille refoulée par une pompe vers une conduite de 1500m de long qui relie la carrière (usine supérieure) à l'usine inférieure.

Au niveau de la préparation du cru s'individualisent les grands procédés cimentiers.

**1) Voie sèche.**

**2) Voie semi sèche.**

**3) Voie humide.**

La forme sous laquelle se présentent les matières premières, détermine le choix de la méthode de cuisson. C'est essentiellement la teneur en eau et l'élimination de celle-ci de point de vue économique qui tranchera sur l'utilisation d'une des deux voies de fabrication : humide ou sèche.

A l'unité de RAÏS HAMIDOU, la voie utilisée est la voie humide vue la constitution des minéraux utilisés qui sont riche en eau, facilement délayables et peu aptes au séchage.

### **I.3.5 Atelier homogénéisation**

Le cru fabriqué au niveau de la carrière est stocké dans huit caves de capacité identique, dont une est destinée pour la correction.

La 1ère homogénéisation est assurée par un système de soufflage d'air comprimé. La seconde homogénéisation au niveau des Chapuis (des grands bassins circulaires en béton), est assurée par un système d'agitation mécanique à deux bras.

### **I.3.6 Atelier de cuisson**

La cuisson au niveau de cette usine est assurée par deux fours rotatifs de vitesse et débit constant, mais de diamètres et longueurs différentes.

Le four est un long tube cylindrique incliné de 3 à 5% par rapport à l'horizontale et garni à l'intérieur de briques réfractaires et tourne à vitesse constante qui est de 45 tour /mn .Ces deux facteurs conjugués permettent à la matière de progresser dans de bonnes conditions.

La pâte introduite dans la partie supérieure du four traversera à contre-courant l'air chaud le long de son trajet. L'évacuation des gaz de fumée est assurée par des ventilateurs qui les amènent vers les électro-filtres

### **I.3.7 Le broyage du CLINKER**

Le CLINKER sortant du four est amené dans une fosse à l'aide d'une traînage qui le recueille à sa chute sous les ballonnets refroidisseurs avant d'aller vers le hall de stockage, le Clinker subit un concassage, la température maximum du Clinker à l'entrée du concasseur à marteaux ne dépasse pas 85°. A la sortie du concasseur, le Clinker est amené vers le hall de stockage ; là il est repris par benne des ponts roulants et étalé sur la largeur du hall.

Le repos du Clinker a pour but :

- de compléter le refroidissement.
- d'améliorer la quantité en laissant s'éteindre la chaux libre.



- de constituer un stock qui sert de régulateur à la fabrication et la marche du broyeur à cuisson indépendante.

Il est de ce fait recommandé d'alimenter le broyeur avec le Clinker le plus ancien.

L'obtention d'un ciment nécessite la création d'un produit de surface spécifique bien déterminée, et le broyage à boulet est l'appareil le mieux adapté pour cela.

Le broyage du Clinker se fait par voie sèche et en circuit fermé. Pour empêcher un sur broyage.

On ajoute aux broyeurs des séparateurs destinés à enlever immédiatement les particules suffisamment fines et à ne renvoyer aux broyeurs que des grains à réduire. Ceux-ci circulent jusqu'à ce qu'ils aient été suffisamment broyés pour sortir du séparateur.

L'usine inférieure compte trois broyeurs du cuit :

- Broyeur 1 construit par SMIDTH.
- Broyeur 2 et 3 construit par ALLIS-CHALMERS.

Ces broyeurs sont divisés en deux compartiments.

Le broyage du ciment le plus souvent par voie sèche, est un des gros consommateurs et de blindage, les principaux facteurs d'usine sont les suivants :

- Diamètre et type du broyeur.
- Nature des matériaux à broyer.
- Finesse recherchée du ciment.
- Qualité des boulets et blindage.

Lors du broyage du Clinker, la matière qui sort du broyeur est amenée à l'aide d'un aspirateur dans le séparateur ; c'est dans ce dernier que ce fait la classification.

### **I.3.8 Obtention du Ciment**

On appelle donc Ciment ; le Clinker broyé finement avec des ajouts (gypse, gravelettes ou la poussière). Le gypse régularise et retarde la prise en réagissant avec C3A celui-ci se trouve fixé sous la forme de sulfo-aluminates gélatineux ; le retard de prise permet en particulier à la chaux qui pourrait subsister à l'état non hydraté de s'hydrater sans provoquer l'expansion ultérieure dont le ciment durci.

## **I.4 Circuit poussière et le but de son installation**

Cette installation permet de véhiculer, stocker et remettre en circuit les poussières récupérées par les poussières électrostatiques au passage des gaz chargés de poussières provenant des fours rotatifs .Ces poussières centralisées sur une trémie tampon sont expédiées par une aéropompe verticale et aiguillée sur des trémies auxiliaires puis, sur les fours et les broyeurs de cuit par réseau de canalisation équipé de vannes de direction et de distributeur.

## **I.5 Expédition du ciment**

Le ciment issu du broyage est conservé afin que le plâtre formé par déshydratation du gypse, lors du passage dans le broyeur, puisse se réhydrater sous l'influence de l'air atmosphérique (ce qui permet d'éviter la fausse prise ultérieure du ciment).

### **I.5.1 Mise en SAC et chargement**

On utilise des sacs en papier que l'on remplit à l'aide de machine à plusieurs becs, disposés sur un même rang. Les sacs sont remplis au moyen d'une roue à palettes tournant rapidement, le ciment se trouve projeté dans le sac au moyen d'un tube à bec sur lequel celui-ci est emboîté. Le poids du ciment est mesuré par une balance et pour que le sac puisse quitter le bec de remplissage au moment voulu, on le fait reposer sur une sorte de palette pendue à une extrémité du fléau de la balance, quand le poids est atteint, le fléau bascule avec le sac et son support arrête ainsi l'écoulement du ciment et le sac se décroche.

Un homme peut servir trois becs et remplir plus de mille sacs par heure .Les sacs arrive sur une bande transporteuse pour être chargés sur des camions.

### **I.5.2 Chargement du VRAC**

Le Ciment pris dans les réserves des machines est amené au moyen de vis transporteur dans les camions, le transporteur est relié à l'ouverture de remplissage par un tube souple, mobile ou une manche tombante jusqu'au fond, pour éviter la chute du ciment et de la poussière.

Les camions citernes servant au transport du ciment en Vrac, sont des réservoirs cylindriques en acier à haute résistance, pourvus à leur partie inférieure de trémie qui servent au déchargement. Les camions sont déchargés par le bas au moyen de convoyeur pneumatique travaillant par aspirateur.

### **I.5.3 La nature des sacs utilisés pour l'ensachage**

Le papier utilisé pour la fabrication de ces sacs est un papier KRAFT pesant environ 70–75g/m<sup>2</sup>. Les sacs sont de forme rectangulaire et contiennent 50kg de ciment. La valve

servant au remplissage se ferme automatiquement et reste fermé par la pression du ciment contenue dans le sac.

Les sacs avant d'être utilisés doivent sécher durant au moins 08 jours environ après fabrication à une température ambiante de 20° ; l'humidité relative de l'air de l'atelier d'ensachage ne doit pas dépasser 80 à 90% pour éviter que les sacs se déchirent au cours de la manutention, on les fabrique en plusieurs plis, ils peuvent être à 3 ,4 ,5 ou 6 plis, suivant le genre d'expédition et la distance parcourue.

Pour l'exportation, on utilise les sacs à 5 plis, tandis que pour l'usage local, on utilise généralement les sacs à 03 plis.

## I.6 Répartition des effectifs à la SCAL

Les effectifs de la SCAL se répartie par catégories socioprofessionnelles, on distingue trois classification qui sont :

- a) **cadres** : personnes ayant un diplôme universitaire ou, une expérience appréciable (+10 ans) pouvant gérer efficacement une équipe d'ouvriers, de maitrises...
- b) **maitrises** : personnes ayant un niveau secondaire ou plus pouvant gérer une équipe d'ouvrier.
- c) **Exécutions** : effectifs d'ouvriers.

On rencontre aussi des employés qui ont un contrat à durée déterminée (C.D.D).

La répartition des effectifs de la SCAL selon le bilan du 31 .12. 2010 est citée dans le tableau ci-dessous :

Cadre	Maitrise	Exécution	C.D.D	TOTALE
62	167	109	134	472

Tableau1.1 : répartition des effectifs à la SCAL

## I.7 Les équipements rencontrés à la cimenterie

La cimenterie de RAÏS HAMIDOU comporte deux usines :

### I.7.1 L'usine supérieure

Elle est située à 1500m au sud de l'usine inférieure, elle englobe toutes les installations du cru, carrière, atelier de concassage, atelier de broyage, et un hall de stockage.

Les équipements en marche à l'usine supérieure sont indiqués dans le tableau ci-dessous :

<b>USINE SUPERIEURE</b>	
<b>ATELIER CONCASSAGE</b>	1. Concasseur Primaire ; 2. Concasseur Secondaire.
<b>ATELIER BROYAGE CRU</b>	1. Broyeur Cru 1 ; 2. Broyeur Cru 2.

**Tableau1.2** : équipements d'usine supérieure

### **I.7.2 L'usine inferieure**

Elle comporte toutes les installations du cuit :

Huit cuves (deux de correction et six contenant la pâte ; deux bassins d'homogénéisation (chapis) ; deux fours Rotatifs ; Un hall de stockage du Clinker (la matière semi-fini) ; trois broyeurs à ciment ; sept silos de stockage du ciment. Les équipements en marches à l'usine inferieure sont présentés dans le tableau ci-dessous :

USINE INFÉRIEURE		
<b>ATELIER CUISSON</b>	Première ligne	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Four 1 ;</li> <li>2. Aspirateur Four 1 ;</li> <li>3. Ventilateur AAF 1 ;</li> <li>4. Ventilateur Noos Ring 1 ;</li> <li>5. Ventilateur radial de la tuyère ;</li> <li>6. Ventilateur axial de la tuyère ;</li> <li>7. Ventilateur refroidisseur 1<sup>ère</sup> compartiment IKN ;</li> <li>8. Ventilateur refroidisseur 1<sup>ère</sup> compartiment IKN Bis ;</li> <li>9. Ventilateur refroidisseur 2<sup>ème</sup> compartiment ;</li> <li>10. Ventilateur refroidisseur 3<sup>ème</sup> compartiment ;</li> <li>11. Ventilateur filtre à manches Exhaure 1.</li> </ol>
	Deuxième ligne	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Four 2 ;</li> <li>2. Aspirateur Four 2 ;</li> <li>3. Ventilateur AAF ;</li> <li>4. Ventilateur refroidisseur VIM ;</li> <li>5. Ventilateur refroidisseur Prat 2 ;</li> <li>6. Ventilateur cyclone Exhaure 2.</li> </ol>
<b>ATELIER CIMENT</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Broyeur Ciment FLS-BK I ;</li> <li>2. Séparateur 14 '' BK I ;</li> <li>3. Broyeur Ciment AC BK II ;</li> <li>4. Séparateur 16 '' BK II ;</li> <li>5. Broyeur Ciment FL BK III ;</li> <li>6. Séparateur 16 '' BK III.</li> </ol>	

**Tableau1.3** : équipements d'usine inférieure

L'objectif donc de la société est la production du ciment qui est un liant hydraulique de nature minérale, et elle se charge de sa commercialisation.

# Chapitre II : Etude de choix et descriptions des machines tournantes

## II.1 Introduction aux machines tournantes

Les machines tournantes jouent un rôle souvent stratégique dans un procédé de fabrication. A l'image d'un broyeur dans une cimenterie ou d'une turbine dans une centrale électrique, elles font partie de ces équipements que l'on ne peut pas se permettre d'immobiliser à tout moment.

## II.2 Définitions – Descriptions [1]

### II.2.1 Définition

Les machines tournantes sont des systèmes (figure II.1) dans lesquels peut se distinguer :

- ✓ Un rotor ;
- ✓ Une structure ;
- ✓ Des liaisons.

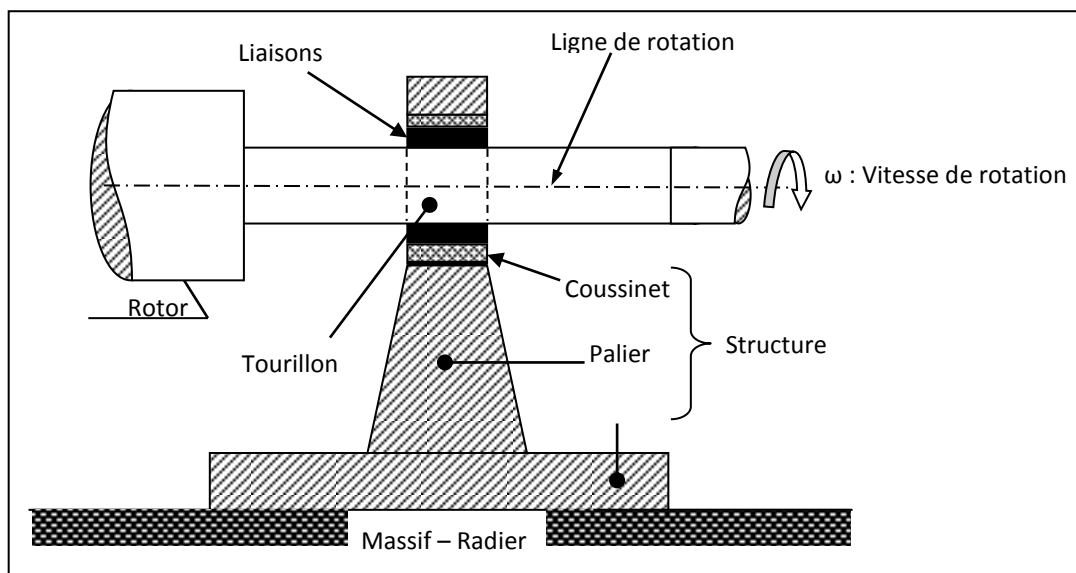


Figure II.1 : Éléments d'une machine tournante

### II.2.1.1 Le rotor

Le rotor est une structure dont les éléments tournent autour d'une ligne de rotation. Le rotor fait de plusieurs matériaux (acier, cuivre, bois, plastique...), réalise une fonction bien définie : (manipulation de fluides, de solides, parcours dans un champ électromagnétique...).

### II.2.1.2 La structure

La structure non rotative comprend les éléments essentiels suivants :

- ✓ **Les coussinets** de faibles dimensions au droit des tourillons du rotor. Des bagues peuvent être substituées aux coussinets : roulements ;
- ✓ **Les paliers** qui relient les coussinets (bague) au stator ;
- ✓ **Le stator** ou enveloppe de la machine ; il contient des éléments essentiels : circuit magnétique dans les machines électriques, ailette pour les turbomachines...etc.
- ✓ **Le massif** des systèmes embraqués peut prendre des formes beaucoup plus variées que celles des systèmes terrestres dont les massifs sont liés aux radies. Une interface adapte le stator au massif. Cette adaptation exige de résoudre un problème qui relève de la suspension des machines dont peut dépendre la tranquillité vibratoire, spécialement celle de l'envenimement.
- ✓ **Le radier** est un élément spécifique aux systèmes terrestres. Il assure la liaison entre le massif et sols et a pour mission de diminuer les pressions exercées au sol dans des limites acceptables. C'est par lui que les séismes perturbent les machines tournantes ; il peut être responsable de certains déliègnages entre les paliers.

### II.2.1.3 Les liaisons

Le rotor est lié à la structure non rotative par des liaisons qui assurent le guidage du rotor. Les liaisons sont classées dans trois ensembles :

- ✓ Les liaisons à fluides ;
- ✓ Les liaisons à roulements ;
- ✓ Les liaisons magnétiques.

### II.3 Le choix des machines concernées par le suivi

Afin de ne pas surveiller inutilement des machines qui n'ont pas une importance capitale, les industriels établissent souvent le classement suivant :

- **machines Vitales** : machines non doublées dont la panne entraîne l'arrêt de la production. Les frais et les délais de remise en état sont importants. Les pertes de production sont inacceptables ;
- **machines Importantes** : machines doublées ou non dont la panne entraîne une baisse sensible de la production. Les frais et délais de remise en état sont importants, les pertes de production aussi ;
- **machines Secondaires** : machines doublées dont une panne ne remet pas en cause les capacités de production.

Pour notre travail on a choisi deux machines, la première est le *broyeur ciment AC BK III*, qui se repère parmi les équipements de l'atelier ciment, la deuxième machine est le *ventilateur AAF1* qui se trouve parmi les équipements de l'atelier cuisson (première ligne).

Les deux machines choisies à une importance capitale à la cimenterie, on peut les classer parmi la catégorie des machines *Importantes* pour la production des ciments.

### II.4 Collecte des informations techniques sur le deux équipements

#### II.4.1 Le broyeur ciment AC BK III



**Figure II.2** : Le broyeur ciment AC BK II (vue sur site)



❖ **Eléments cinématiques**

1. Moteur : asynchrone à rotor bobine (démarrage par des résistances rotorique)

- Marque : jeumont SCHNEIDER
- Type : TN BB 560 16
- Puissance : 800 Kw
- Vitesse de rotation : 986 tr/min
- Tension U : 5000 V
- Intensité I : 114A
- Reference roulement palier 00 : NU 228 MC 3
- Reference roulement palier 01 : 6328 MC 3



**Figure II.3** : MOTEUR vue sur site

2. Accouplement : élastique à membrane (tampons)



**Figure II.4** : ACCOUPLEMENT vue sur site

3. Réducteur : Réducteur CITROËN – MESSIAN



**Figure II.5** : REDUCTEUR vue sur site

- Référence Roulement d'arbre GV Palier 02 : 22230 C
- Référence Roulement d'arbre GV Palier 03 : 22230 C
- Référence Roulement d'arbre PV Palier 04 : 23040 C
- Référence Roulement d'arbre PV Palier 05 : 23040 C
- Nombre de dents du pignon arbre GV Z1=26 dents
- Nombre de dents de la roue PV Z2=136 dents
- Module  $m=7.723$
- largeur de la dent  $l=395\text{mm}$

4. Accouplement : fléxidents

- Référence Roulement Palier 06 : 22244 C
- Référence Roulement Palier 07 : 22244 C



**Figure II.6** : ACCOUPLEMENT + les deux paliers vue sur site

### 5. Accouplement : fléxacier

- Référence Roulement Palier 08 : 22244 C
- Référence Roulement Palier 09 : 22244 C



**Figure II.7 : ACCOUPLEMENT** vue sur site

### 6.La Couronne :

- Nombre de dents du pignon d'attaque  $Z_3=15$  dents ; diamètre  $d_3= 485.08$  mm
- Nombre de dents de la couronne  $Z_4= 145$  dents ; diamètre  $d_4=4687.85$ mm
- Débit du broyeur  $Q=28$ t/h



**Figure II.8 : LA COURONNE** vue sur site

## II.4.2 Le ventilateur AAF1

### ❖ Eléments cinématiques

#### 1. Moteur :

- Marque : ELECTRIC COMPANY
- Type : 280 M
- Puissance : 90 kW
- Vitesse de rotation : 990 tr/min
- Tension U : 400 V
- Intensité I : 158 A
- Reference roulement palier 01 : 6319
- Reference roulement palier 02 : 6316

#### 2. Transmission par courroies :

- Poulie motrice  $\Phi = 300$  mm
- Poulie réceptrice  $\Phi = 436$  mm
- Nombre de gorge : 5
- Reference courroie : 17/6300

#### 3. Turbine :

- Nombre de pales : 12
- Diamètre  $\Phi = 2000$ mm
- $Q = 50$  m<sup>3</sup>/s
- Vitesse sortie = 675 tr/min
- Reference roulement palier 03 : 22222 K
- Reference roulement palier 04 : 22222 K

## II.5 Etude des principaux défauts du broyeur et du ventilateur [2]

### II.5.1 Introduction

Le diagnostic de l'état d'une machine n'est possible que si l'on connaît les symptômes vibratoires associés à chaque défaut susceptible d'affecter la machine considérée, c'est à dire si l'on connaît les images vibratoires induites par ces défauts. La connaissance de ces images vibratoires et de la cinématique de la machine permet de formuler un diagnostic de l'état de la machine. Malheureusement, une même image vibratoire peut correspondre à plusieurs défauts. Il faut donc établir la liste de tous les défauts correspondant à chaque image et, par déduction, entreprendre les analyses complémentaires et rechercher d'autres symptômes pour se diriger progressivement vers l'hypothèse la plus probable.

On se propose dans ce chapitre de donner un aperçu des principaux défauts et de leur manifestation vibratoire que l'on peut rencontrer sur les deux machines tournantes choisies.

## II.5.2 Le déséquilibre massique (défaut de balourd)

### II.5.2.1 Définition

Quel que soit le soin apporté à la construction des machines, il n'est pas possible de faire coïncider l'axe de rotation avec le centre de gravité de chaque tranche élémentaire du rotor. De cette non-concentricité, résulte l'application de forces centrifuges proportionnelle à la vitesse de rotation selon la relation  $F = Mr \omega^2$  qui déforment le rotor. On dit que le rotor présente un balourd.

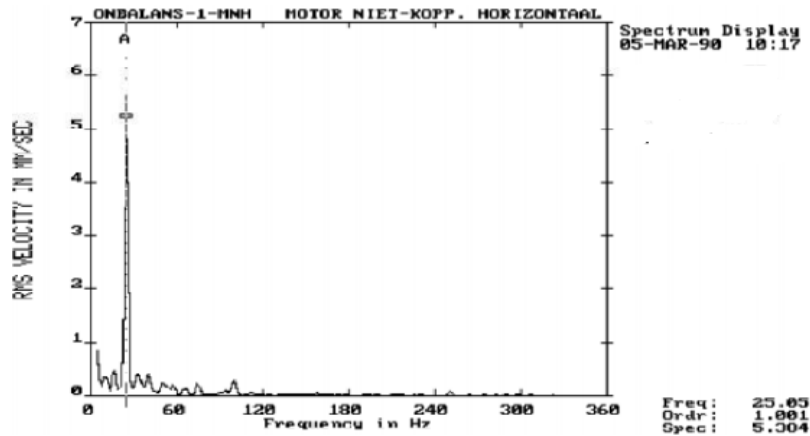


Figure II.9 : Tolérances d'usinage sur un rotor

### II.5.2.2 Manifestations

Augmentation du niveau global choisi en basses fréquences. Nette augmentation de l'amplitude de la fréquence fondamentale (fréquence de rotation  $F_R$ )

$F_R = N/60$  avec N vitesse de rotation (tr/min)



**Figure II.10** : Spectre réel d'un moteur tournant à 1502 tr/mn (25,03 Hz) traduisant la présence d'un balourd [2]

Ce balourd provient généralement de défauts d'usinage, d'assemblage et de montage

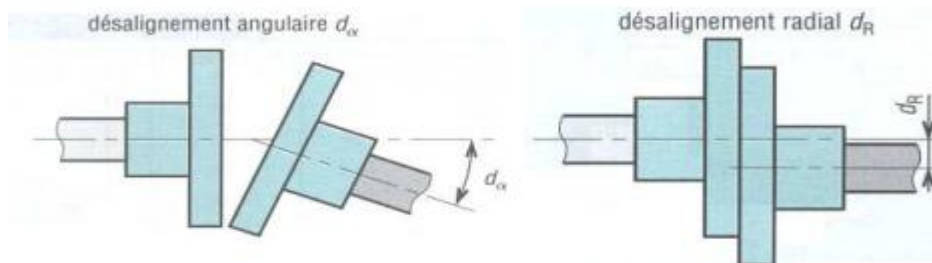
### II.5.3 Défaut d'alignement

#### II.5.3.1 Définition

Le défaut d'alignement est l'une des principales causes de réduction de la durée de vie des équipements. Il concerne soit deux arbres liés par un accouplement, soit deux paliers soutenant le même axe.

#### II.5.3.2 Désalignement d'arbres accouplés

Les axes des deux rotors peuvent présenter un désalignement angulaire au niveau de l'accouplement ou un désalignement radial (défaut de concentricité) ou la combinaison des deux.



**Figure II.10** : défauts d'alignement d'arbres

Un défaut d'alignement radial est révélé par un pic d'amplitude prépondérante à généralement, 2 fois la fréquence de rotation (parfois 3 ou 4 fois). Il apparaît une vibration dans la direction radiale, le même phénomène se manifeste dans la direction axiale.

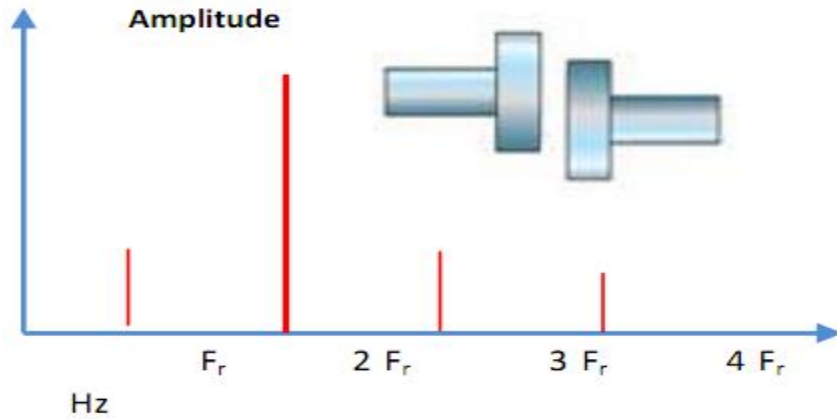


Figure II.11 : Image vibratoire d'un défaut d'alignement radial

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

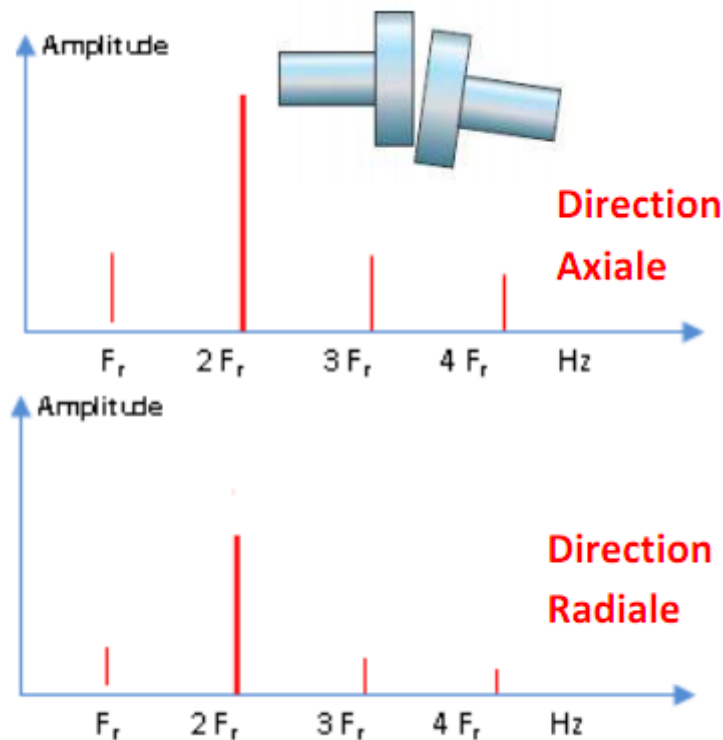


Figure II.12 : Images vibratoires d'un défaut d'alignement angulaire

### II.5.3.3 Désalignement des paliers

Les axes des deux paliers d'un même corps de machine ne sont pas concentriques. Cette anomalie peut être la conséquence d'un défaut de montage d'un palier, mais également d'un mauvais calage des pattes de fixation ou d'une déformation de châssis (par exemple à la suite de contraintes thermiques), qui se traduit par une flexion de l'arbre du rotor.

La manifestation spectrale de ce type de désalignement est identique à celle du désalignement angulaire.

### II.5.4 Défauts de serrage

Le mauvais serrage de la structure de la machine génère des vibrations et un certain bruit. Le spectre typique mesuré sur une machine dans laquelle il existe un jeu contient un grand nombre de pics, à des fréquences multiples de la fréquence de rotation. Il est également parfois possible de retrouver des pics à l'harmonique 1/2 ( $1/2 \times$  la fréquence de rotation de l'arbre) et ses multiples. Les causes d'un jeu sont principalement l'usure ou un mauvais montage. Comme exemples de jeu, on peut entre autre citer : accouplement dont le caoutchouc est usé, paliers montés avec un jeu excessif, ou boulons cassés (plus de jonction mécanique). Une roue à aubes dont les aubes touchent la carcasse nous donne un défaut semblable au jeu, amplifié. La figure II.13 montre un exemple spectre sur une machine dont le joint de l'accouplement est usé. La fréquence de rotation est de 24,25 Hz.

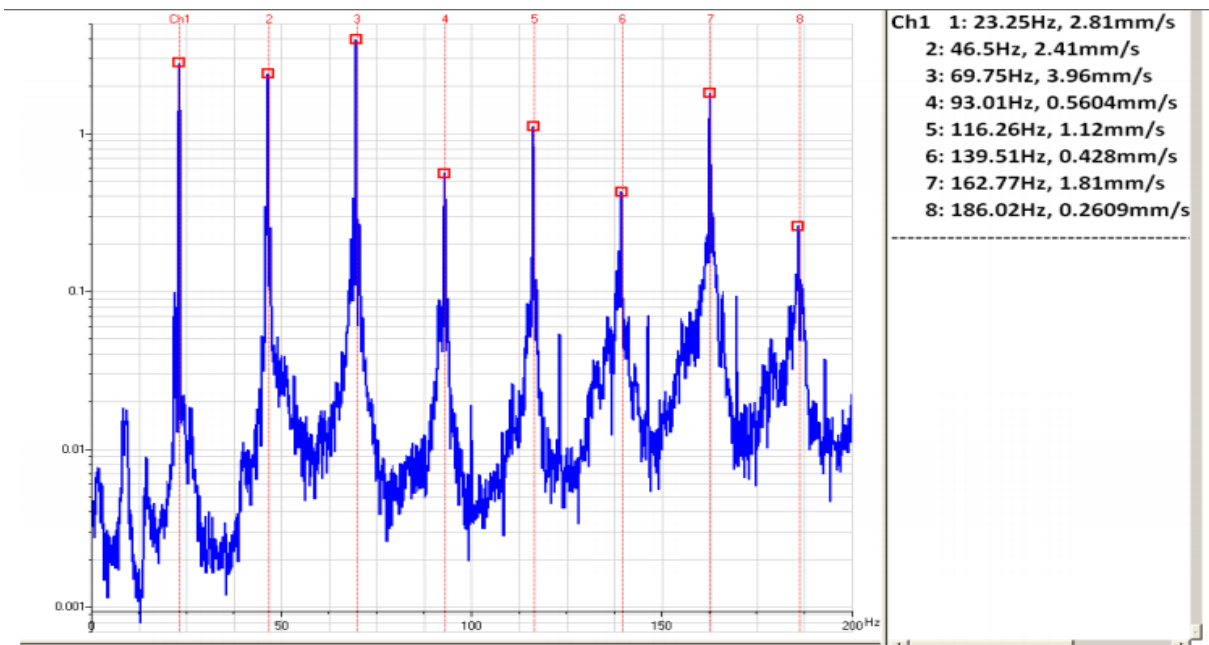


Figure II.13 : Défaut d'usure d'accouplement



## II.5.5 Défauts de transmission par courroies

### II.5.5.1 Fréquence caractéristique

Le principal défaut rencontré sur ce type de transmission est lié à une détérioration localisée d'une courroie : partie arrachée, défaut de jointure, (figure II.14), impliquant un effort ou un choc particulier à la fréquence de passage  $F_C$  de ce défaut, elle est définie par :

$$F_C = \frac{\pi D_1}{L} F_1 = \frac{\pi D_2}{L} F_2$$

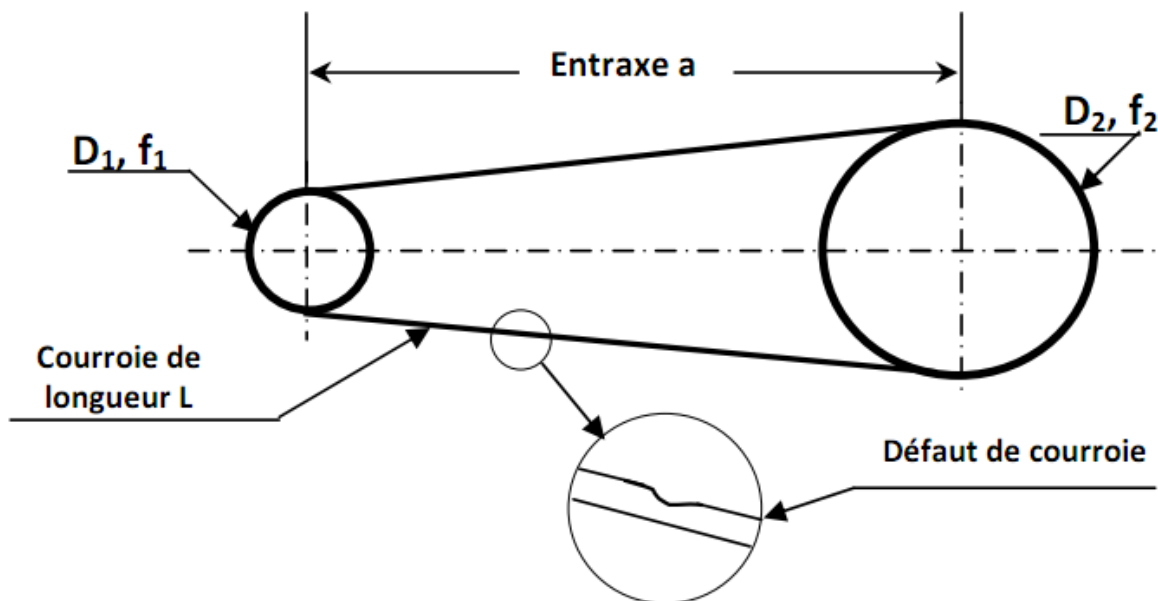
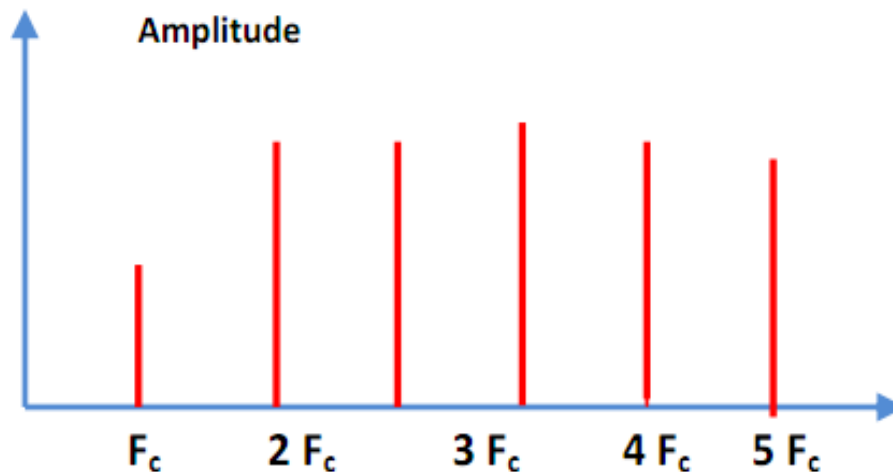


Figure II.14 : Défaut de courroie

- $F_C$  : fréquence de passage de la courroie.
- $D_1$  et  $D_2$  : diamètres des poulies 1 et 2.
- $F_1$  et  $F_2$  : fréquences de rotation des poulies 1 et 2.
- $L$  : la longueur de la courroie

L'image vibratoire donne un pic d'amplitude importante à la fréquence de passage des courroies, et ses harmoniques, figure II.15.



**Figure II.15 :** Image vibratoire théorique d'un défaut de transmission par courroie

Il existe deux autres types de défauts pour ce mode de transmission:

Lorsque les courroies sur transmission à courroies trapézoïdales ont subi une usure importante et qu'elles ont tendance à venir se coincer en fond de gorge, il apparaît une vibration d'amplitude importante aux hautes fréquences.

Lorsqu'une ou plusieurs courroies sont insuffisamment tendues, il peut se produire un phénomène de battement visible sur le spectre, créé par des fréquences de passage des courroies différentes et très proches les unes des autres; ces différences sont produites par un glissement plus ou moins important selon la tension exercée sur les courroies.

## II.5.6 Les défauts des engrenages

### II.5.6.1 Définition

Un engrenage est composé de l'ensemble de deux roues dentées engrenant l'une avec l'autre, permettant de transmettre de la puissance entre deux arbres rapprochés avec un rapport de vitesse constant. Selon la position relative des deux arbres, on distingue trois classes d'engrenages (figure II.16)

- ❖ Les engrenages parallèles (les 2 arbres sont parallèles).
- ❖ Les engrenages concourants (les 2 arbres sont tels que leurs prolongements se coupent).
- ❖ Les engrenages gauches (les 2 arbres occupent une position relative quelconque).



Figure II.16 : Différents types d'engrenage

Les dentures d'engrenage peuvent être droites, hélicoïdales ou à chevrons. Les efforts, en conséquence (figure II.17), sont :

- ❖ Uniquement radiaux sur les engrenages parallèles, à denture droite ou à chevrons ;
- ❖ Mixtes (radiaux et axiaux) sur les engrenages à denture hélicoïdales, les engrenages coniques et les engrenages à roue et vis sans fin.

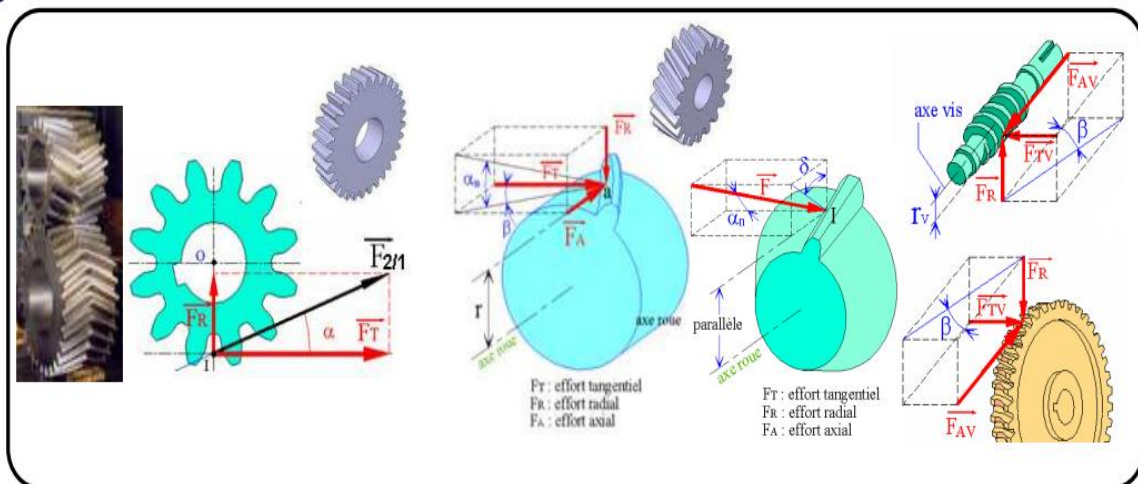


Figure II.17 : Efforts sur les dents d'engrenage selon le type de denture

### II.5.6.2 Fréquence d'engrènement

Observons un engrenage, composé de deux roues dentées 1 et 2, présentant  $Z_1$  et  $Z_2$  dents et tournant aux fréquences  $F_1$  et  $F_2$ . Chaque fois qu'une dent de la roue menante 1 s'engage dans la roue menée 2, il se produit une prise de charge périodique au rythme d'engagement des dents selon une fréquence d'engrènement  $F_e$  égale à la fréquence de rotation de la roue multipliée par son nombre de dents.

$$F_e = F_1 \cdot Z_1 = F_2 \cdot Z_2$$

- $F_e$  : Fréquence d'engrènement
- $F_1$  et  $F_2$  : fréquences de rotations des roues 1 et 2
- $Z_1$  et  $Z_2$  : Nombre des dents des roues 1 et 2.

Si la denture est correcte, le spectre (figure II.18), est constitué de composantes dont les fréquences correspondent à la fréquence d'engrènement ou à ses harmoniques.

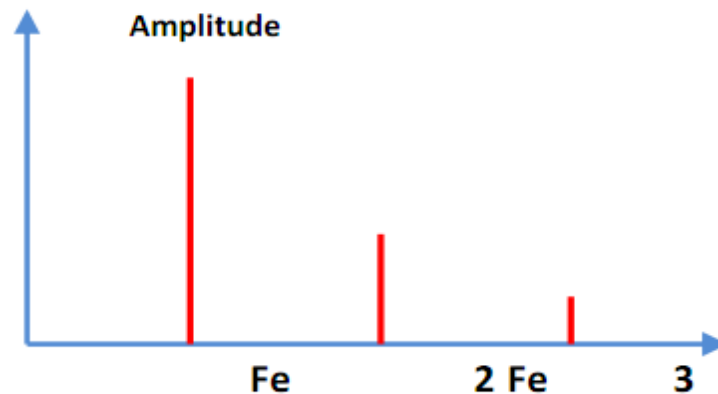


Figure II.18 : Image vibratoire d'un engrenage sain

### II.5.6.3 Signatures vibratoires des défauts d'engrènement

#### II.5.6.3.1 Détérioration d'une dent

Si l'une des roues présente une dent détériorée, il se produit un choc dur, à chaque tour du pignon. Le spectre correspondant (figure II.19) montre un peigne de raies dont le pas correspond à la fréquence de rotation du pignon détérioré s'étalant jusqu'aux hautes fréquences.

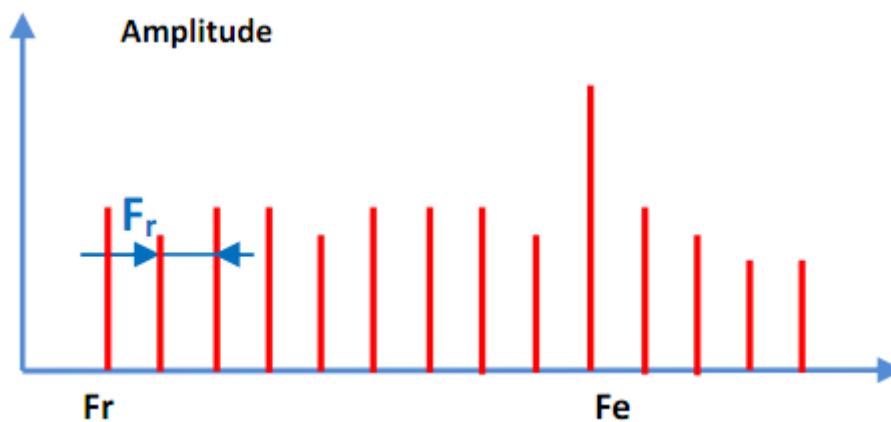


Figure II.19 : Image vibratoire théorique d'un engrenage présentant une dent détériorée.

### II.5.6.3.2 Détérioration de deux dents sur les deux roues

Si les deux roues dentées présentent chacune une dent détériorée, les chocs peuvent être importants lorsque les deux défauts se rencontrent «coïncidence ». La rencontre s'effectue à la fréquence  $F_{co}$ , appelée fréquence de coïncidence et telle que :

$$F_{co} = F_e / \text{PPCM} (Z_1, Z_2)$$

- $F_e$ : fréquence d'engrènement ;
- PPCM : plus petit commun multiple de  $Z_1$  et  $Z_2$  ;

La fréquence de coïncidence  $F_{co}$  est inférieure aux fréquences de rotation  $F_1$  et  $F_2$ . Le spectre montre non seulement les deux peignes correspondant aux fréquences de rotation de chaque roue, mais aussi un peigne de raies de pas correspondant à la fréquence de coïncidence  $F_{co}$ .

### II.5.6.3.3 Détérioration de l'ensemble de dentures

Lorsque l'ensemble de la denture est usé ou détérioré, les chocs se produisent au passage de chacune des dents. Le spectre est constitué d'un peigne de raies dont la fréquence correspond à la fréquence d'engrènement, mais cette fois avec une amplitude beaucoup plus élevée (figure II.20).

Le spectre peut présenter des raies à la fréquence de rotation correspondant à des équilibrages imparfaits

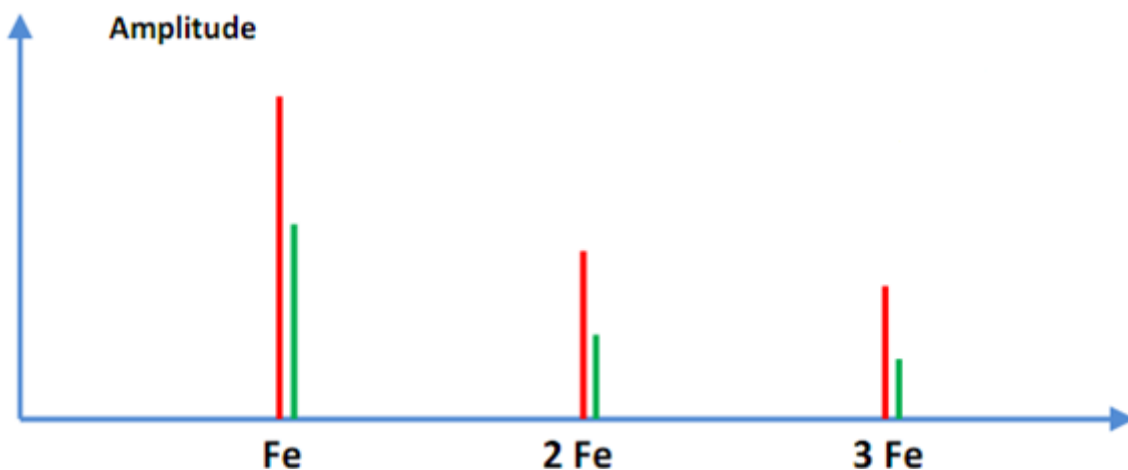


Figure II.20 : Image vibratoire théorique d'une denture usée

#### II.5.6.3.4 Entraxe insuffisant (jeu insuffisant au fond de denture)

Si l'entraxe des arbres portant les deux roues est insuffisant, il se produit un engrènement en fond de denture. La dent menante force à l'engagement et au déengagement ce qui provoque une usure des deux côtés de la denture. En analyse spectrale ce phénomène se traduit par l'apparition d'une raie d'amplitude prépondérante à deux fois la fréquence d'engrènement  $F_e$  et la disparition partielle, voire totale de l'amplitude à cette fréquence (figure II.21).

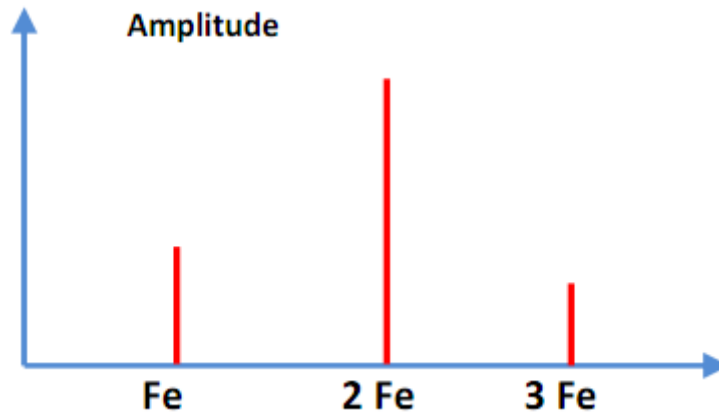


Figure II.21 : Image théorique et d'un engrènement en fond de denture

L'identification de ce phénomène nécessite de s'assurer que les harmoniques d'ordre supérieur ne sont pas présentes à un niveau élevé : on serait alors en présence d'un choc dur.

#### II.5.6.3.5 Jeu de fond de denture trop grand

Un jeu de fond de denture trop grand a pour conséquence un choc dur à chaque passage d'une dent à l'autre ("rattrapage" du jeu). On obtient alors un spectre de choc dur, périodique, à la fréquence d'engrènement (présence de nombreuses harmoniques de niveau du même ordre de grandeur) (figure II.22).

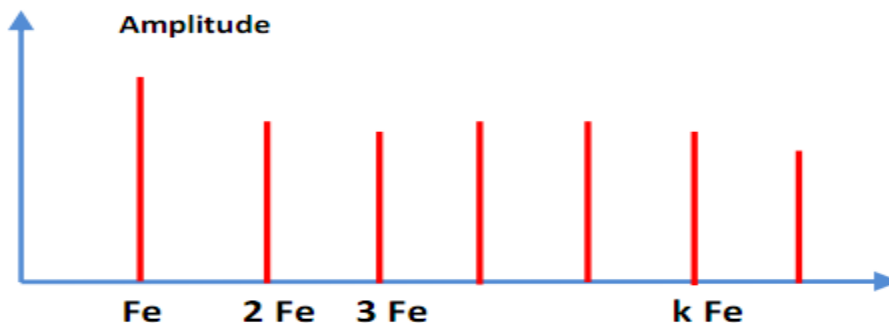


Figure II.22 : Image vibratoire théorique d'un engrenage présentant une dent détériorée.

Ce jeu trop grand peut être :

- ❖ Une conséquence de l'usure de la surface de denture, le spectre est alors une "suite logique" de celui de la figure II.22 (nombre et niveau des harmoniques élevés).
- ❖ Dû au montage, le spectre apparaît dès l'origine.

### II.5.6.3.6 Défauts induisant une modulation d'amplitude

Si l'arbre ou le pignon présente un défaut d'excentricité, ou de faux rond, il va apparaître une modulation d'amplitude du signal vibratoire par la fréquence de rotation due à la modélisation de l'effort d'engrènement. L'image vibratoire théorique (figure II.23), présente autour de la fréquence d'engrènement (fréquence porteuse) ou de ses harmoniques, des raies latérales dont le pas correspond à la fréquence de rotation de l'arbre qui porte le défaut. C'est ce qu'on appelle des bandes latérales de modulation d'amplitude. Il faut noter que les amplitudes de ces bandes latérales sont généralement très faibles devant l'amplitude de la fréquence porteuse (entre 2 et 20 fois inférieures).

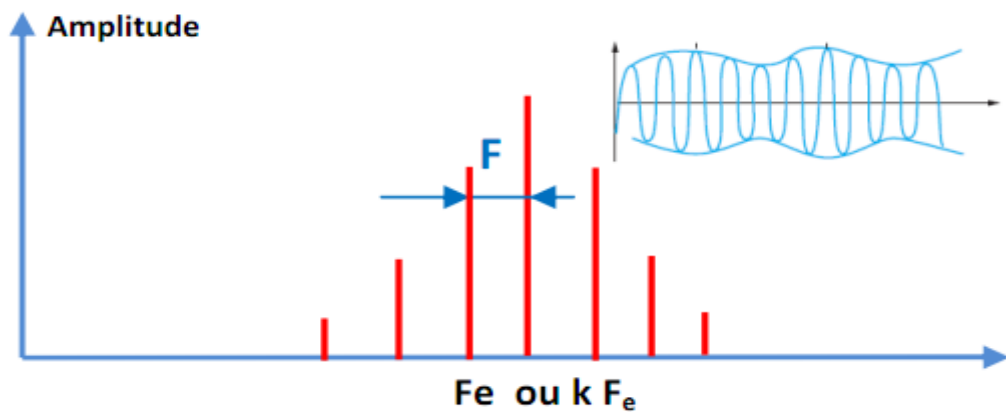


Figure II.23 : Image théorique de la modulation d'amplitude de  $F_e$  par  $F_r$

## II.5.7 Les défauts de roulements

Les roulements sont parmi les composants les plus sollicités des machines et représentent une source de panne fréquente. Les défauts que l'on peut y rencontrer sont les suivants : écaillage, grippage, corrosion (qui entraîne l'écaillage), etc. Dans la plupart des cas, la dégradation se traduit par un écaillage d'une des pistes ou d'un élément roulant du roulement, produisant un choc à chaque passage. Les roulements défectueux génèrent des vibrations de fréquences égales aux vitesses de rotation de chaque pièce du roulement. Ils correspondent notamment à la rotation des billes, des rouleaux ou de la cage et au passage des billes sur les bagues.

Pour chaque type de roulement et en fonction de ses cotes de fabrication (figure II.24), on peut considérer les fréquences caractéristiques données par les formules ci-dessous.

Les fréquences caractéristiques des défauts localisés sur les parties d'un roulement sont les suivantes:[3]

$$\text{Pour la bague externe : } F_{d_{be}} = \frac{1}{2} Fr .Z(1 - (d / D)\cos \varphi)$$

$$\text{La bague interne : } F_{d_{bi}} = \frac{1}{2} Fr .Z(1 + (d / D)\cos \varphi)$$

$$\text{L'élément roulant : } F_{de} = \frac{1}{2} Fr .\frac{D}{d} (1 - ((d / D)\cos \varphi)^2)$$



défaut : écaillage de la bague interne

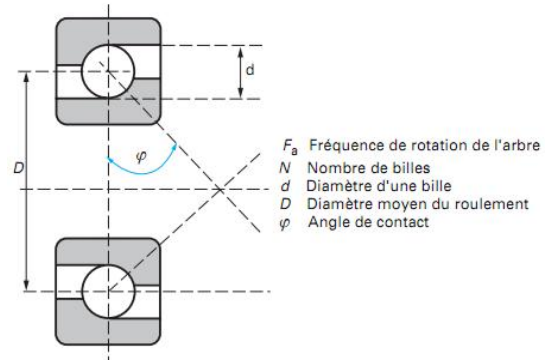


schéma d'un roulement

**Figure II.24 :** les cotes de fabrication du roulement

Tel que :  $Z$  : nombre de billes ;  $Fr$  : fréquence de rotation de l'arbre ;  $d$  : diamètre d'une bille

$D$  : diamètre moyen du roulement ;  $\varphi$  : angle de contact

Aujourd'hui, la plupart des fabricants de roulements fournissent des tables de référence qui permettent de s'affranchir de ces calculs.

Le grippage étant le stade ultime d'un défaut sur roulement et pouvant amener par blocage la dégradation brutale du rotor.

### II.5.7.1 Signatures vibratoires des principaux défauts

#### II.5.7.1.1 Défaut de type écaillage affectant la bague externe

Un défaut de type écaillage affectant la bague externe d'un roulement à pour image vibratoire un peigne de raies dont le pas correspond à la fréquence du défaut.

À chaque composante de ce peigne, est associée une paire de bandes latérales espacées de la fréquence de rotation, en cas de charge dynamique importante (figure II.25).



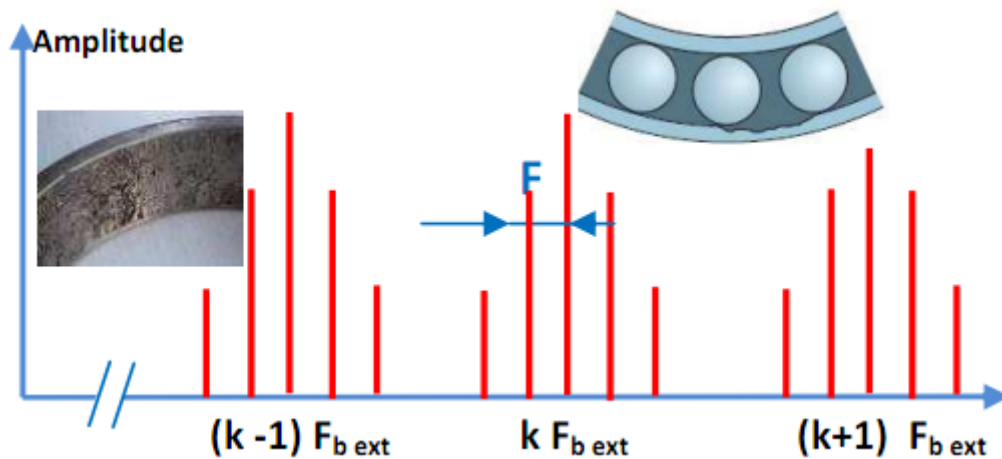


Figure II.25 : Image vibratoire théorique d'un défaut de type écaillage sur bague extérieure

### II.5.7.1.2 Défaut de type écaillage affectant élément roulant

Un défaut de type écaillage sur un élément roulant (bille, rouleau ou aiguille) a pour image vibratoire un peigne de raies. A chaque composante de ce peigne, sont associées plusieurs paires de bandes latérales espacées de la fréquence de la cage (figure II.26).

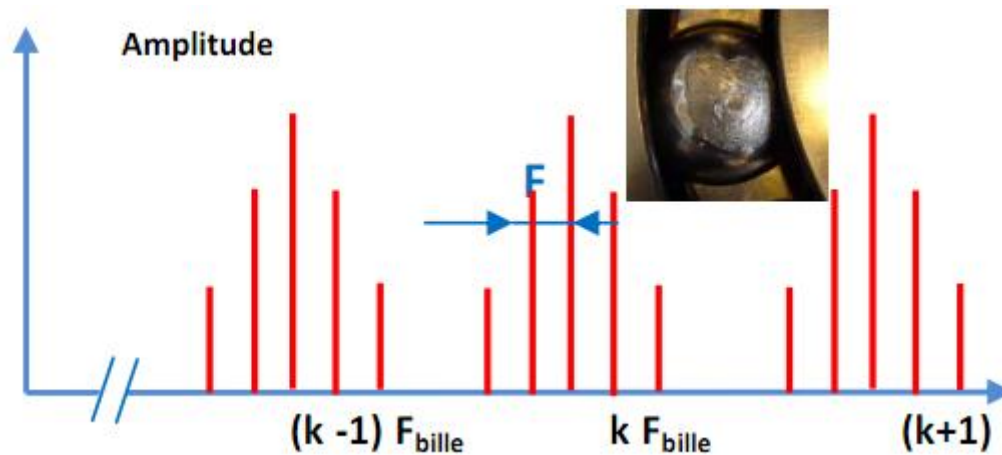


Figure II.26 : Image vibratoires théorique d'un défaut de type écaillage sur un élément roulant

### II.5.7.1.3 Défauts de type déversement de bague

Le défaut de type déversement de bague extérieure s'exprime par une composante fondamentale d'amplitude élevée dont la fréquence correspond à la fréquence du défaut de la bague déversée, et par des composantes d'ordre supérieur d'amplitude très faible (figure II.27)

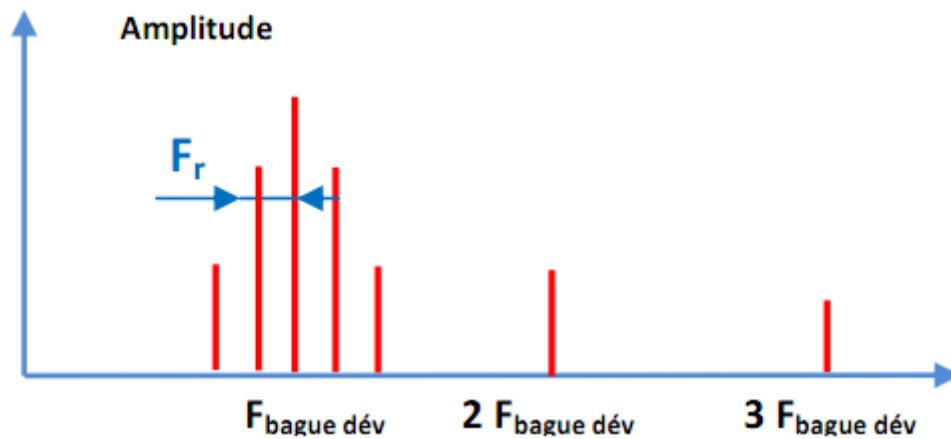


Figure II.27 : Image vibratoire théorique d'un défaut de type déversement de bague

### Remarque

Il ne faut pas confondre défaut de type écaillage et défaut de type déversement de bague. Le défaut de type écaillage est un défaut de type choc dont le spectre présente:

- ❖ De nombreuses composantes harmoniques jusqu'en hautes fréquences ;
- ❖ Les harmoniques d'ordre  $n$  généralement d'amplitude plus grande que la composante fondamentale.

Le défaut de type déversement de bague est un défaut de type vibration sinusoïdale dont le spectre présente peu de composantes harmoniques, la composante fondamentale de la fréquence du défaut, nettement prépondérante par rapport à ses quelques harmoniques.

## II.5.8 Passages de pales [4]

### ➤ Manifestation

Le passage des pales devant le bec de la volute d'un ventilateur provoque un pic à la fréquence  $F_{\text{pales}}$  :

$$F_{\text{pales}} = n \cdot f_r$$

$n$  : nombre de pales

$f_r$  : fréquence de rotation de la turbine

Ce défaut n'est pas directionnel, il se repère aussi bien en radial qu'en axial.

➤ **Origine**

Elle peut être

- ❖ Mécanique : mauvais calage axial de l'impulseur ou jeu de bec de volute insuffisant ;
- ❖ Hydraulique : débit trop bas ;
- ❖ Encrassement des pales qui peut aussi provoquer du balourd.

# Chapitre III : Méthodologie élaborée du travail expérimental

## III.1 Introduction

Le fonctionnement des machines tournantes engendre des efforts qui seront souvent la cause des défaillances ultérieures (efforts tournants, turbulence, chocs, instabilité). Les efforts sont à leur tour causes de vibrations qui vont endommager les structures et les composants des machines. L'analyse de ces vibrations va permettre d'identifier les efforts dès qu'ils apparaissent, avant qu'ils n'aient causé de dommage irréversible. Elle permettra aussi après analyse d'en déduire l'origine et d'estimer les risques de défaillance.

## III.2 La chaîne de mesure

La chaîne de mesure est représentée sur la figure ci-dessous :

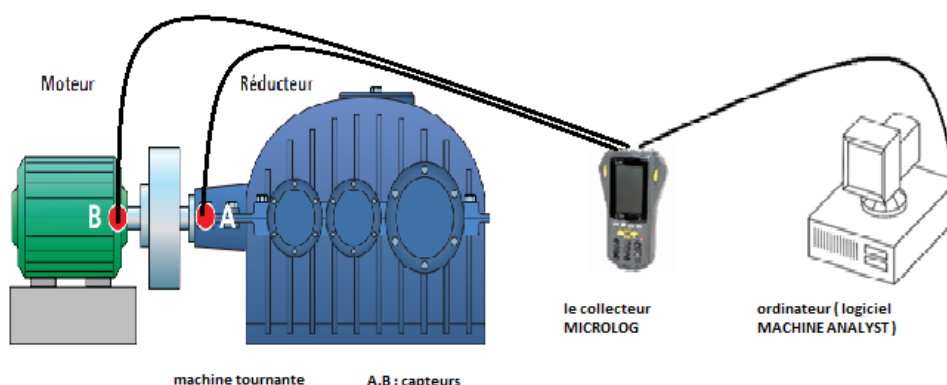


Figure III.1 : la chaîne de mesure

## III.3 Description des appareils de mesure

### III.3.1 Le capteur

Le comportement dynamique du système est étudié à l'aide de mesure d'accélération. Les accélérations qui ont constitué notre base de données sont mesurées à l'aide d'un accéléromètre piézo-électrique de type CA/CC.

Un accéléromètre est composé d'un disque en matériau piézoélectrique qui joue le rôle d'un ressort sur lequel repose une masse sismique précontrainte. Quand la masse se déplace sous

l'effet d'une accélération, elle exerce sur le disque piézoélectrique des contraintes, induisant à la surface de ce dernier une charge électrique proportionnelle à cette accélération.

### III.3.2 Système Microlog GX [5]

Le système Microlog GX permet au personnel chargé de la maintenance des machines de collecter et d'analyser les données de vibration émises par l'équipement rotatif et de réduire ainsi les frais de maintenance et de temps d'arrêt.

Le système Microlog GX comporte deux éléments :

- ✓ Collecteur de données Microlog GX ;
- ✓ Ordinateur sur lequel est installé le logiciel Machine Analyst.

#### III.3.2.1 Collecteur de données Microlog GX



Figure III.2 : le collecteur type Microlog GX

Le collecteur de données Microlog GX est un terminal portable léger à double canal pour l'acquisition et le stockage de données. Il collecte les mesures de vibration, de température et autres mesures d'état des machines.

Le Microlog, ainsi que ses kits de mise à niveau, exécute toutes les tâches requises pour la maintenance prédictive de machines. Il collecte automatiquement les mesures dynamiques (vibration) et statiques (traitement) depuis pratiquement n'importe quelle source. Outre sa fonction de collecteur de données, le Microlog comprend toutes les caractéristiques et fonctionnalités d'un analyseur puissant pour capturer et afficher des spectres haute résolution permettant une analyse approfondie. Un spectre de fréquence FFT (transformation de Fourier rapide) peut être affiché sur l'écran couleur LCD (à cristaux liquides).

#### III.3.2.2 Le logiciel Machine Analyst

Le logiciel auxiliaire Machine Analyst de SKF fonctionne avec le Microlog, c'est un programme conçu pour aider le personnel de maintenance à comprendre l'état véritable des machines rotatives et à décider des mesures de maintenance d'après l'état actuel des machines. Le logiciel Machine Analyst facilite le réglage des mesures et présente les données

machine collectées sous forme de statistiques, rapport et tracé graphique permettant d'obtenir des données d'analyse utiles.

Il permet de configurer facilement les POINTS de mesure (emplacement d'une machine sur lequel les données de mesures sont collectées), pour le déchargement de configurations de POINTS de mesure sur le collecteur, la manipulation de la hiérarchie des données collectées et pour l'affichage graphique et la génération de rapports sur les données de mesure collectées. Machine Analyst compare automatiquement les valeurs des mesures actuelles aux valeurs des mesures antérieures et aux valeurs d'alarme prédéfinies pour détecter les écarts par rapport à l'état normal des machines.

L'affichage des tracés de tendance, des spectres FFT (notamment les tracés en cascade), des ondes temporelles, des tracés de vecteurs polaires et autres types de tracés facilite la détection des modifications apportées à l'état de l'équipement et l'analyse de la cause de ces modifications.

### III.4 le paramétrage des points de mesures

Pour faciliter le paramétrage des points de mesure et améliorer sa présentation, la base de données du logiciel machine analyst contient des éléments hiérarchiques, Ces éléments sont :

- ❖ **Groupe** : Les groupes sont des JEUX, des machines ou des types de groupes définis, en fonction de nos besoins. Pour notre travail l'élément groupe se compose en deux machines le broyeur et le ventilateur.
- ❖ **Machine** : Du point de vue hiérarchique, les éléments hiérarchiques Machine constituent le niveau d'organisation final, duquel seuls les POINTS de mesure découlent. Pour notre cas cet élément comprend les organes principaux des deux équipements (le moteur, le réducteur, la turbine...ex.).
- ❖ **Point** : L'élément hiérarchique POINT permet de définir l'emplacement du capteur dans lequel les données de mesures sont collectées et le type de mesures (vibration vitesse, vibration-accélération enveloppée, température, etc.). Un nom de POINT descriptif est émis pour chaque POINT (par exemple : PALIER 1R peut spécifier une mesure d'accélération prise dans le sens radiale sur le palier N°1).

## III.5 Le banc d'essai du laboratoire

### III.5.1 Le travail sur le banc d'essai

Le premier travail réalisé est un apprentissage sur notre banc d'essai, afin de maîtriser la manipulation de l'équipement de mesure (collecteur et le logiciel machine analyst), et voir la manifestation des défauts sur le signal vibratoire obtenue. La vitesse de rotation est mesurée par l'intermédiaire d'un dispositif électronique 'stroboscope'.

Les défauts choisis pour être pris en charge par notre apprentissage sont :

- Le déséquilibre massique (défaut de balourd).
- Les conditions de montage (le desserrage...).

Le déséquilibre massique (défaut de balourd) est créé par ajout de masses d'essai ou de compensation sur la périphérie des disques, où se trouve 06 trous de  $D = 8$  mm. Et pour le desserrage, on desserre les boulons qui fixent l'accouplement coté moteur.

### III.5.2 Description du banc d'essai [6]

Le banc d'essai est réalisé au sein du laboratoire génie mécanique et développement de l'école nationale polytechnique (figure III.3), pour l'analyse des vibrations émanant du déséquilibre massique et des roulements.



**Figure III.3 :** Banc d'essai pour étudier le défaut de balourd, dégradations des roulements et le défaut de l'accouplement

Le banc d'essai en question est constitué d'un rotor avec deux disques et a été conçu avec les critères suivants :

- Conditions de fonctionnement représentatives d'une machine tournante simple.
- Facilité de montage et démontage,

Ce banc d'essai est constitué d'un châssis en acier. La ligne d'arbre ayant un diamètre de **20mm** et une longueur de **600** mm et fixée sur ce châssis par l'intermédiaire de deux paliers à roulements de rigidité moyenne. Les paliers situés à proximité des deux disques, comportent des roulements à billes de type **6204**, tandis que, les paliers du moteur sont munis de roulements à billes de type **6205**.

### III.5.3 Caractéristiques techniques du banc d'essais

#### ❖ Les disques

Les deux disques sont identiques :

- Diamètre extérieur :  $d_e = 88$  mm ;
- Epaisseur :  $E_p = 20$  mm ;
- Diamètre intérieur :  $d_i = 20$  mm ;
- Masse :  $m = 840$  g.

Sur la périphérie des disques, on a 06 trous de diamètre 08 mm sur lesquels on peut ajouter les masses de compensation.

❖ **L'arbre**

- Longueur :  $L = 600$  mm ;
- Diamètre variant entre 18 et 32 mm.

Le rotor (arbre + disques) est entraîné par un moteur électrique asynchrone à vitesse constante de **1494** tr/min et de puissance **0,75 Kw**

### **III.6 La surveillance du broyeur clinker et du ventilateur AAF**

L'objet de cette étude est le diagnostic du broyeur clinker et du ventilateur AAF.

L'investigation se résume aux tâches suivantes :

- Suivre l'évolution de l'état de l'équipement.
- Identifier les causes probables de détérioration de ses composants.
- Evaluer le degré de sévérité de ces détériorations probable.

Les deux machines étant composées principalement d'un moteur électrique, d'un réducteur de vitesse (pour le broyeur un engrenage et pour le ventilateur une transmission par courroie), et des paliers à roulements, qui constituent une chaîne rigide. Un défaut sur un de ces composants peut influencer négativement sur le comportement global de l'équipement

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. (Voir tableau III.1) [7]

<b>Localisation des défauts</b>	<b>%</b>
<b>Dentures</b>	60
<b>Paliers</b>	19
<b>Arbre</b>	10
<b>Carter</b>	7
<b>Autre</b>	4

**Tableau III.1** : Localisation des défauts dans les transmissions de puissance à engrenages



Le diagnostic portera donc sur toute la chaîne cinématique du broyeur et du ventilateur selon les étapes effectuées suivantes :

- ❖ Choix des paramètres;
- ❖ Configuration des points de mesure;
- ❖ Calcul de la cinématique ;
- ❖ Analyse et interprétation des données.

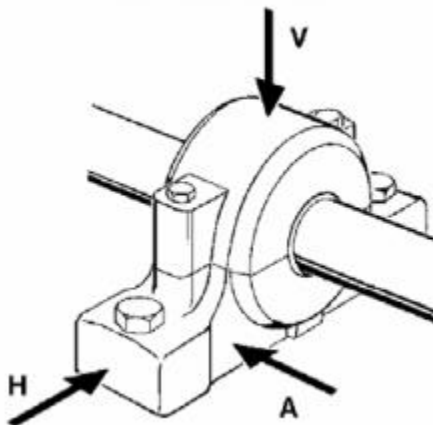
### III.6.1 La configuration des points de mesure

Les vibrations étant le résultat des efforts, qui peuvent être d'origine mécanique, électromagnétique hydraulique, ou autres. Elles sont transmises à la structure par l'intermédiaire des paliers et aux fondations par l'intermédiaire des fixations.

Pour détecter de façon précoce une défectuosité de la machine, on doit choisir les positions de mesure et le nombre de direction de la mesure à chaque position. Ce choix de la (ou des) directions de mesure sera guidé par le type de défaut qu'on prévoit de détecter à l'endroit considéré (lignage, balourd, serrage, ou autres.), par le coût impliqué par le nombre de mesures et par une estimation de la rigidité de la structure dans chaque direction.

La mesure principale devra se faire suivant la direction de l'effort. On conçoit ainsi que les meilleurs points de mesurage dans le cadre de la maintenance des machines sont les paliers.

Le mesurage peut être effectué dans les directions des trois axes orthogonaux de coordonnées (verticale, horizontale, axiale). Généralement c'est suffisant de prendre une mesure axiale et une mesure radiale (verticale ou horizontale).



**Figure III.4 :** représentation des points de mesure de vibration

Le broyeur est constitué de 9 paliers. Pour chaque palier, 2 points de mesure sont nécessaires radiale (verticale) et axiale, soit un total de 18 points de mesure pour toute la machine.

Le ventilateur admet 4 paliers, c'est-à-dire un total de 8 points de mesure pour toute la machine.

### III.6.2 Choix du mode d'investigation [8]

L'analyse des vibrations permet d'appréhender les différents efforts par tout défaut potentiel qui affecte la machine. Elle permet de rechercher toutes les informations utiles pour tirer un diagnostic correct sur son état mécanique et ainsi connaître la fonction usure de la machine.

Une onde vibratoire peut être étudiée par plusieurs méthodes qui correspondent à des niveaux différents de connaissance du phénomène et à l'utilisation de matériels d'analyse plus ou moins sophistiqués à savoir :

- Indicateurs simples : niveau global, facteur de crête, facteur de défaut, kurtosis,...etc. ;
- Méthodes d'analyse qualitative : analyse temporelle, analyse fréquentielle, analyse d'enveloppe et analyse cepstrale.

### III.6.3 La méthodologie de diagnostique

Un suivi périodique (ou continu) des machines, généralement inscrit dans le cadre de la mise en place d'une politique de maintenance conditionnelle, permettra de déclencher une alarme programmée, déterminée, en fonction du type de défaut(s) redouté(s) et en fonction de la complexité de sa (ou de leur) mise en évidence, par le choix d'un indicateur représentatif de la dégradation et par la détermination d'un seuil d'amplitude jugé critique, sur une plage de fréquences définie.

La surveillance des deux machines concernées commence par le suivi de l'accélération en mode global, ce type de suivi peu coûteux et rapide permet ainsi de connaître l'état vibratoire de la machine et d'en surveiller l'évolution, sans pouvoir toutefois déterminer la cause de la vibration cette stratégie de surveillance consiste à mesurer, à l'aide de capteurs, le niveau global d'un ou de plusieurs indicateurs (déplacement, vitesse ou accélération), à suivre son évolution dans le temps et à le comparer à des normes ou des mesures précédentes. Certes, toute évolution est due à une dégradation de la machine. Cela permet de mettre en évidence l'existence d'une anomalie à un stade précoce et de faire une première idée des types de défauts qui affectent la machine, mais ne permet pas d'établir un diagnostic précis.

Mais pour une meilleure compréhension de l'état vibratoire des deux machines, l'analyse spectrale est indispensable. Le suivi des deux machines est enrichi par analyse spectrale qui consiste à relever le signal vibratoire mesuré sur la machine et de procéder à une analyse systématique pour rechercher la présence d'images vibratoires de l'ensemble des défauts susceptibles d'affecter l'installation considérée. Cela permet d'accéder au diagnostic, c'est à dire, d'identifier avec précision la nature de l'anomalie et si possible en préciser la gravité.

Les outils utilisés dans l'analyse du comportement vibratoire des deux machines tournantes sont développés dans les sections suivantes (section III.6.3).

### III.6.3.1 Niveau global accélération [9]

Ce paramètre est mesuré sur une bande large, spectre pour capter principalement les défauts surgissant à haute fréquence, tels que les défauts d'engrènement et les résonances des roulements. C'est la première approche pour l'analyse. Le mouvement vibratoire global induit par le fonctionnement normal ou anormal de la machine est caractérisé ici par un indicateur dont l'évolution sera suivie de manière périodique ou continue. Le niveau global NG est donné par la relation suivante :

$$NG = \sqrt{A^2 + B^2 + C^2 + D^2 \dots}$$

Avec : A, B, C, D, ... les amplitudes respectives des composantes du spectre. L'avantage de ce type d'indicateur de défaut est sa simplicité et son petit investissement. Il suffit en effet de traiter les mesures d'accéléromètres et de ne saisir régulièrement qu'une seule valeur.

Ce type de suivi permet ainsi de connaître l'état vibratoire de la machine et d'en surveiller l'évolution, sans pouvoir toutefois déterminer la cause de la vibration (par exemple, un balourd ou un désalignement).

#### III.6.3.1.1 Danger de l'effet de masque

L'effet de masque est l'écueil le plus sérieux de ce type de suivi et limite considérablement le domaine d'utilisation et la fiabilité. Généralement, ce sont les amplitudes efficaces des indicateurs qui sont mesurées. Compte tenu de l'élévation au carré, il est certain que cette valeur du NG est essentiellement sensible à l'évolution de défauts induisant des vibrations d'amplitude élevée et qu'une évolution importante d'un défaut induisant des vibrations d'amplitude moindre (mais pas forcément de gravité moindre) risque d'être complètement masquée. Il est difficile avec ce type de suivi de déterminer les seuils d'intervention ; si l'on arrête la machine à une valeur fixe, elle pourrait être fréquemment stoppée pour des problèmes peu importants de balourd et, en revanche, ne pas l'être pour le problème du roulement, bien que celui-ci présente des signes proches au raine. Lorsque, dans le suivi en mode global 'large bande', les indicateurs sont mesurés en amplitude crête, le danger d'effet de masque est encore plus net. En effet, la valeur de la mesure est celle de l'amplitude de la composante maximale enregistrée pendant la durée de cette mesure, ce qui occulte ainsi tous les phénomènes se manifestant à un autre instant du cycle.

#### III.6.3.1.2 Limites du suivi en mode global [2]

Le suivi en mode global permet d'appréhender l'état de la machine par une évolution significative d'une dégradation ou par la comparaison à des seuils d'alarme et de danger, mais ne permet pas d'établir un diagnostic précis. C'est l'analyse spectrale qui le permettra.

### III.6.3.2 Analyse spectrale [7]

Il est préférable d'analyser et de surveiller séparément les différentes fréquences vibratoires. A cet effet, grâce à la transformée de Fourier, le signal temporel vibratoire est décomposé en composantes de fréquence et l'analyse spectrale est devenue la technique la plus importante et la plus utilisée dans l'industrie. Elle est plus riche et plus fine, voire donner de très bons résultats. Un spectre permet de déterminer non seulement l'importance de l'anomalie mais aussi sa nature (balourd, désalignement, défaut de roulement, etc.) et de suivre son évolution dans le temps. Donc, l'analyse spectrale permet de fournir, non seulement des informations sur le comportement vibratoire instantané, mais donner également des informations sur la tendance des phénomènes et de l'apparition du défaut, voire l'identification de la provenance du défaut, étant donné qu'elle donne la valeur de l'amplitude de chacune des composantes du signal. Cette identification est la clef de diagnostic de défauts. Le spectre est le concept fondamental de l'analyse en fréquence. C'est la représentation d'un signal dont l'amplitude ne serait plus donnée en fonction du temps mais en fonction de sa fréquence.

#### III.6.3.2.1 Les indicateurs spectraux [10]

Un indicateur spectral associe à un signal une représentation spectrale de ce dernier (spectre, zoom, cepstre, spectre de fonction de modulation, fonction de transfert...). Ces indicateurs présentent le grand intérêt d'être sensibles aussi bien aux évolutions de la forme d'un signal qu'à celles de son énergie et, de ce fait, sont insensibles aux effets de masque pour peu que les résolutions d'analyse choisies pour les élaborer soient en adéquation avec les fréquences de répétition des phénomènes recherchés. Ils offrent donc des perspectives extrêmement intéressantes dans le cadre de la surveillance des machines. Ils constituent par ailleurs un net progrès dans l'adéquation entre indicateur et force dynamiques ou défauts et la facilité de leur comparaison graphique par rapport à un état de référence favorise grandement l'interprétation de leurs évolutions.

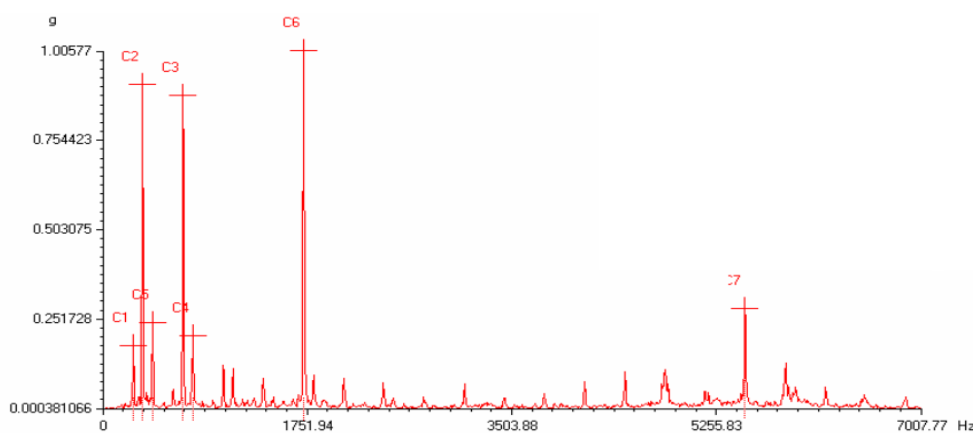


Figure III.5 : représentation spectrale d'un signal vibratoire

Les indicateurs utilisés pour notre suivi sont :

**+ Indicateur d'après la fréquence d'engrènement  $F_e$ , avec ses harmoniques :**

Pour les engrenages on va suivre la fréquence d'engrènement «  $F_e$  », et ces harmoniques (deuxième et troisième  $2F_e$  et  $3F_e$ ) dans le spectre. C'est un indicateur très fiable pour la détection précoce des défauts d'engrenages.

**+ Indicateur d'après la fréquence de rotation  $F_r$ , avec ses harmoniques :**

On va suivre aussi l'évolution de l'amplitude de la fréquence de rotation et ses harmoniques ( $2f_r$ ,  $3f_r$ ,  $4f_r$ , ou autres) sur les images spectrales recueillies, pour la détection des défauts basse fréquence tels que le balourd, désalignement, desserrage, le frottement.

**+ Indicateur d'après la fréquence de défaut de roulement :**

Cet indicateur est très fiable pour la détection précoce des défauts de roulement. Donc on va suivre les fréquences des défauts de roulement dans les spectres.

### III.6.3.2.2 l'intérêt pratique de l'analyse spectrale [6]

Toute anomalie affectant une machine tournante (balourd, déséquilibre, phénomène de tourbillons d'huile, déformation d'arbre, desserrage de palier, défaut de roulement, anomalie électromagnétique au niveau du stator ou du rotor d'un moteur, engrènement defectueux,...), se traduit par des vibrations dont les fréquences correspondent aux fréquences d'apparition des forces qui les induisent et à leurs harmoniques (multiples des fréquences d'apparition).

Toutes les machines vibrent, quel que soit le soin apporté à leur fabrication. La mesure globale permet, en se rapportant à des références connues (normes, spécifications du constructeur), de juger si le niveau de ces vibrations est acceptable. Dans le cas contraire, il est important d'en définir la raison, de trouver le phénomène excitateur. C'est le but de l'analyse en fréquence. La mesure globale permet de quantifier le défaut, l'analyse spectrale permet de le qualifier.

Un spectre est un graphe dans lequel sont représentées les amplitudes et les fréquences de toutes les composantes vibratoires élémentaires induites par le fonctionnement d'une machine. Chaque composante est représentée par un segment vertical appelé raie dont l'abscisse représente la fréquence et l'ordonnée, l'amplitude.

Notons que dans certains cas (raie confondues et dépassant largement du signal,..) nous parlerons plus de raie, mais de pic.

# Chapitre IV : Etude Expérimentale

## IV.1 Introduction

Le suivi que l'on propose est périodique de type off ligne. Par manque de la matière première dans l'usine durant la période du stage, on n'a pu prendre qu'une mesure avec broyeur en charge et ceci était pour notre deuxième campagne de mesures effectuée le 26.06.20011. Le restant des campagnes de mesures ont été effectuées avec broyeur à vide.

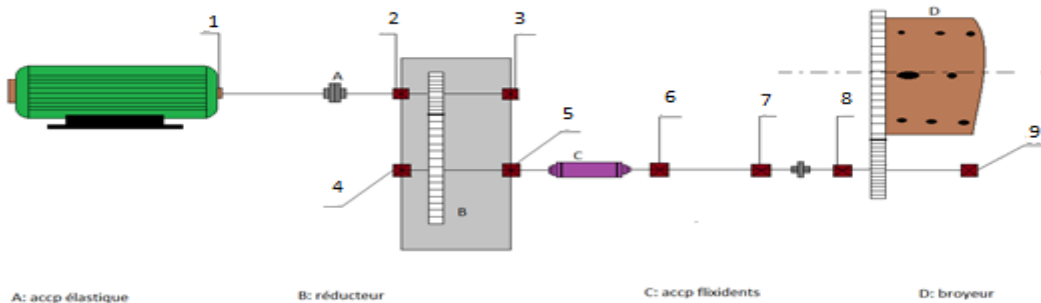
Pour le suivi du ventilateur les relevés ont été pris à partir de la deuxième campagne de mesures et en parallèle avec le broyeur.

On a pu prélever quatre relevés pour le broyeur, et trois pour le ventilateur. Les campagnes de mesures consécutives sont espacées d'une période définie selon notre jugement d'ingénieur.

On va présenter dans ce chapitre l'ensemble des mesures prises durant notre suivi. Le capteur est placé pour l'ensemble des paliers des deux équipements suivant les deux directions : radiale (R), et axiale (A).

## IV.1 Le broyeur

La chaîne cinématique du broyeur est décrite par la figure IV.1



**Figure IV.1** : Chaîne cinématique du broyeur ciment AC BK II

Sur le schéma synoptique (Fig.IV.1) sont représentés tous les éléments constituant le broyeur (le moteur, le réducteur, les accouplements, les paliers...), ainsi que les points de mesure sur lesquels est disposé l'accéléromètre pour la mesure des vibrations. Ces points correspondent aux paliers qui supportent les efforts auxquels est soumis le broyeur.

Les figures suivantes (de la Figure IV.2 à la Figure IV.19) représentent les mesures aux paliers du broyeur dans les positions : radiales (verticales) et axiales, sur une plage de fréquences de [0-10000Hz]

Les mesures sont représentées en cascade. C'est une représentation en trois dimensions (amplitude, fréquence, date de la prise de mesure).

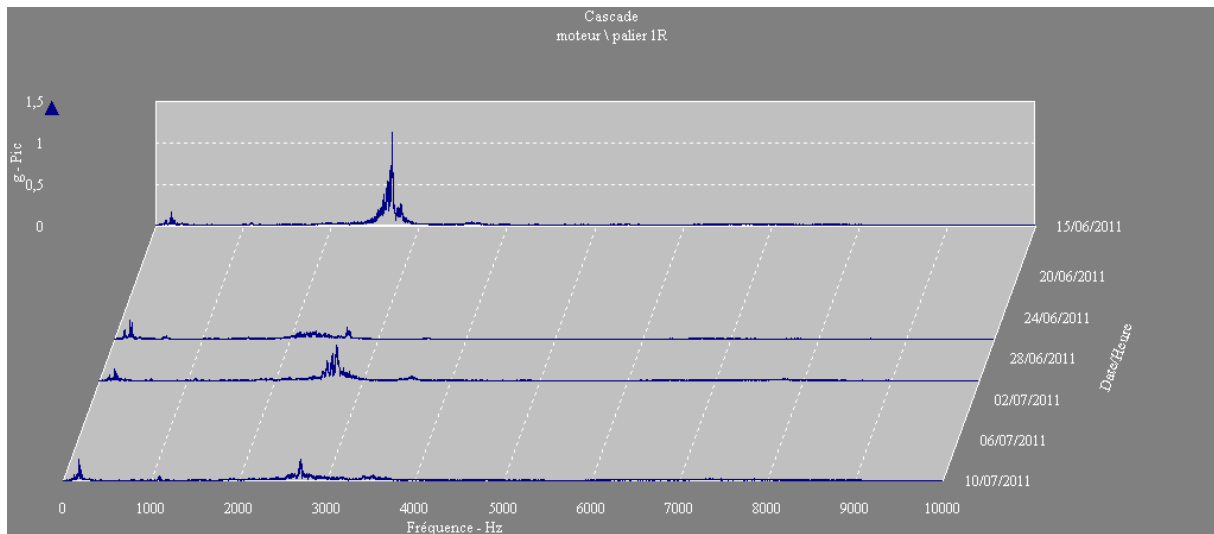


Figure IV.2 : les spectres du point 1R représentés en cascade [0-10000Hz]

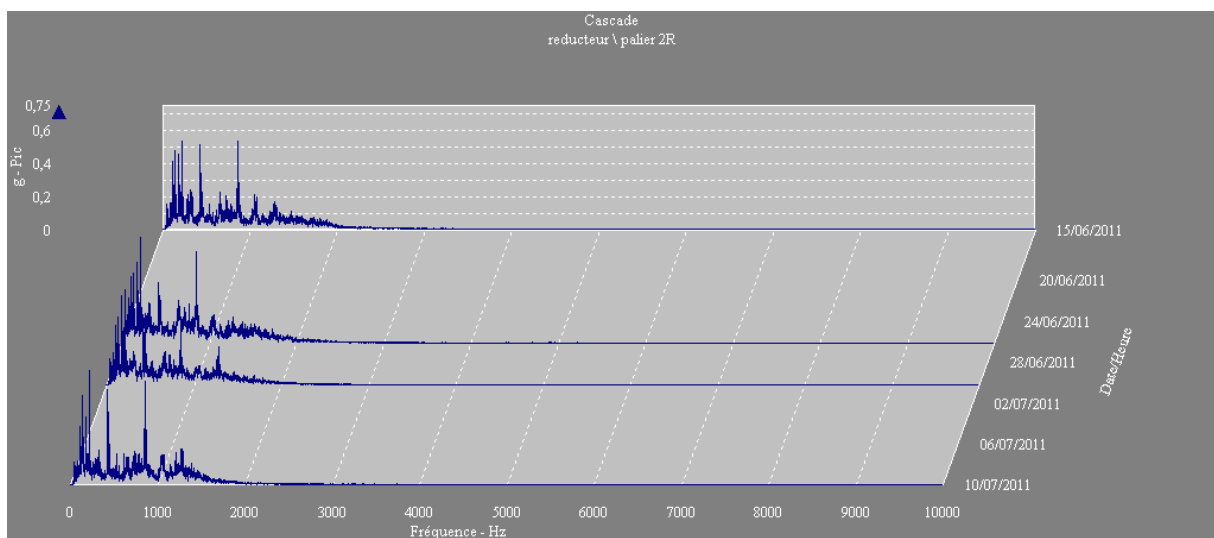


Figure IV.3 : les spectres du point 2R représentés en cascade [0-10000Hz]

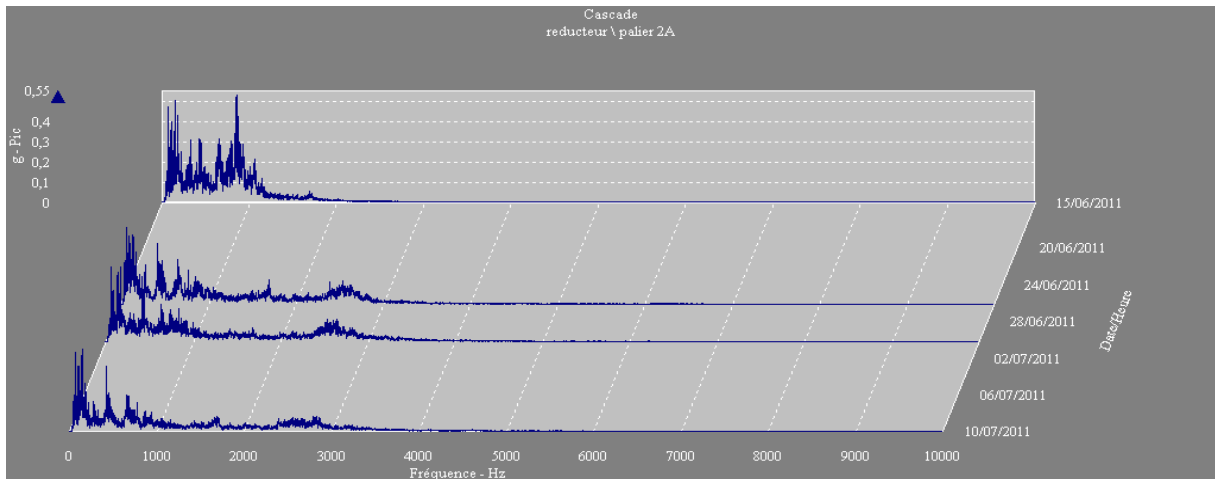


Figure IV.4 : les spectres du point 2A représentés en cascade [0-10000Hz]

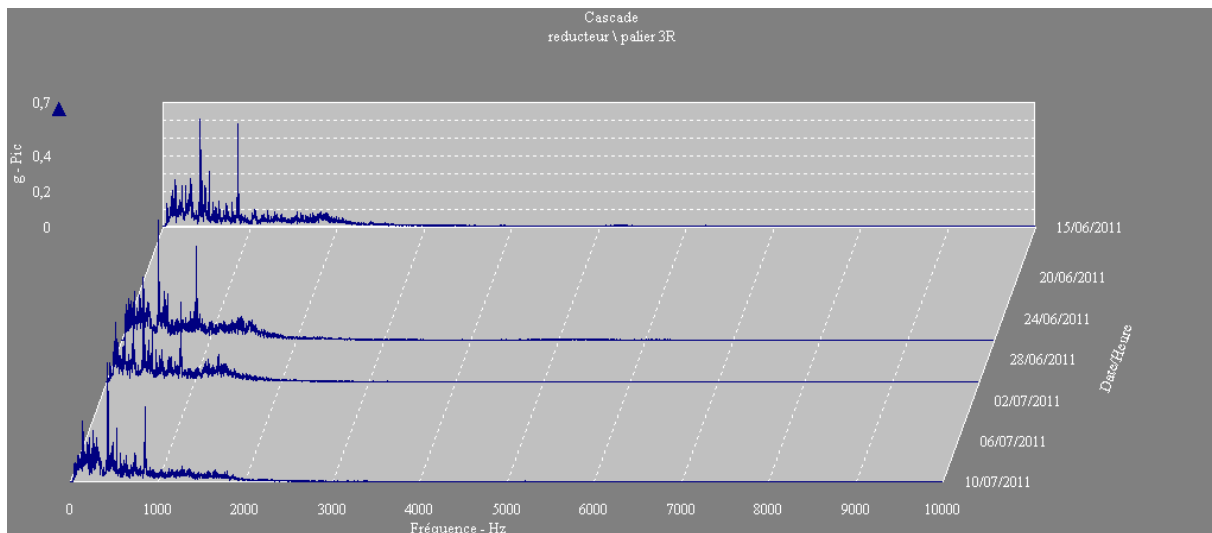


Figure IV.5 : les spectres du point 3R représentés en cascade [0-10000Hz]

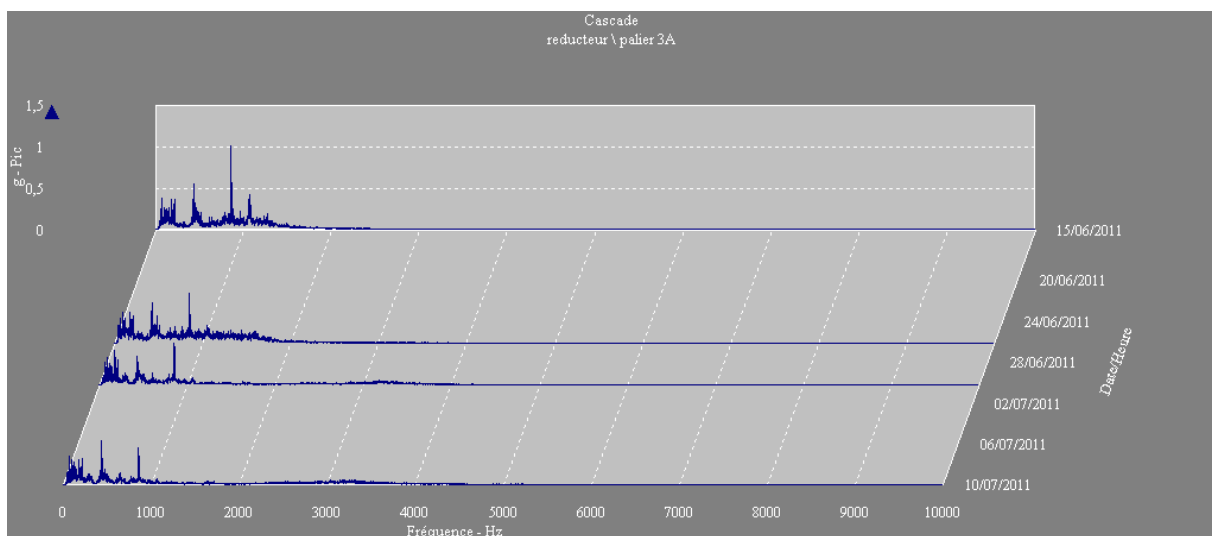


Figure IV.6 : les spectres du point 3A représentés en cascade [0-10000Hz]



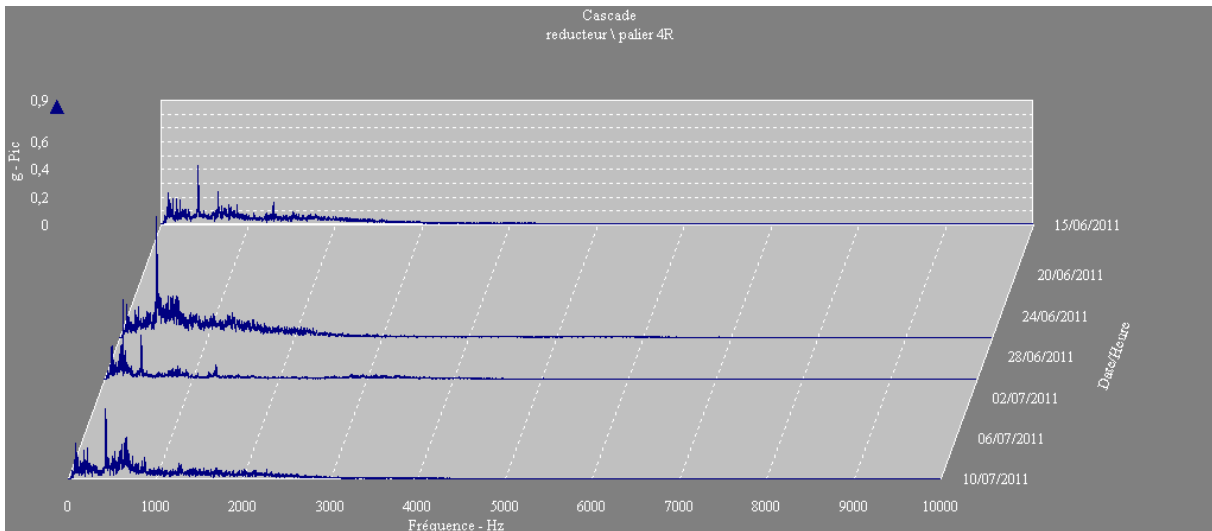


Figure IV.7 : les spectres du point 4R représentés en cascade [0-10000Hz]

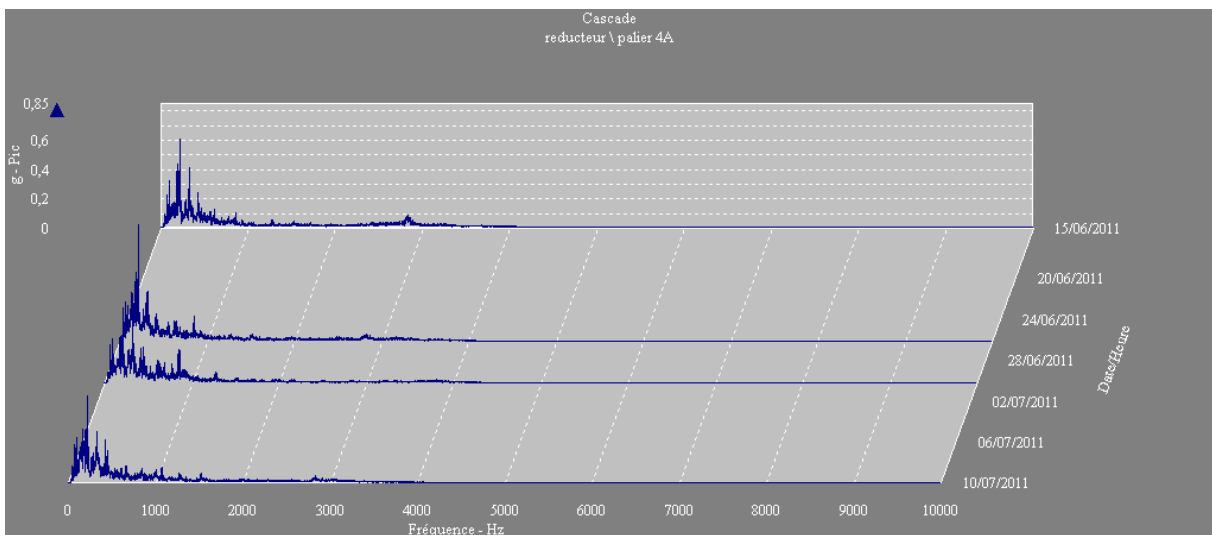


Figure IV.8 : les spectres du point 4A représentés en cascade [0-10000Hz]

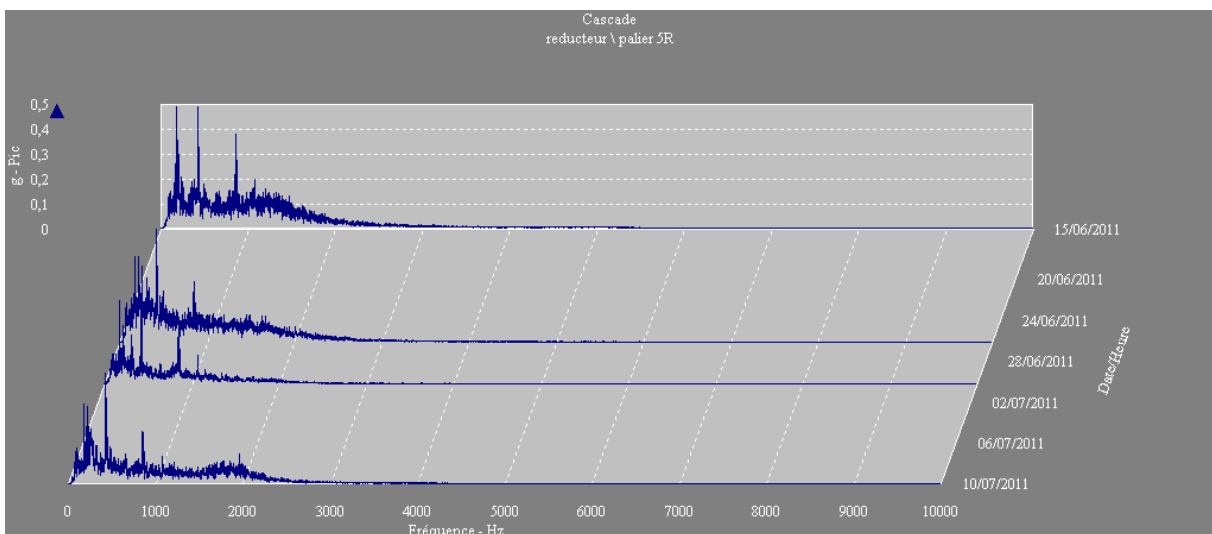
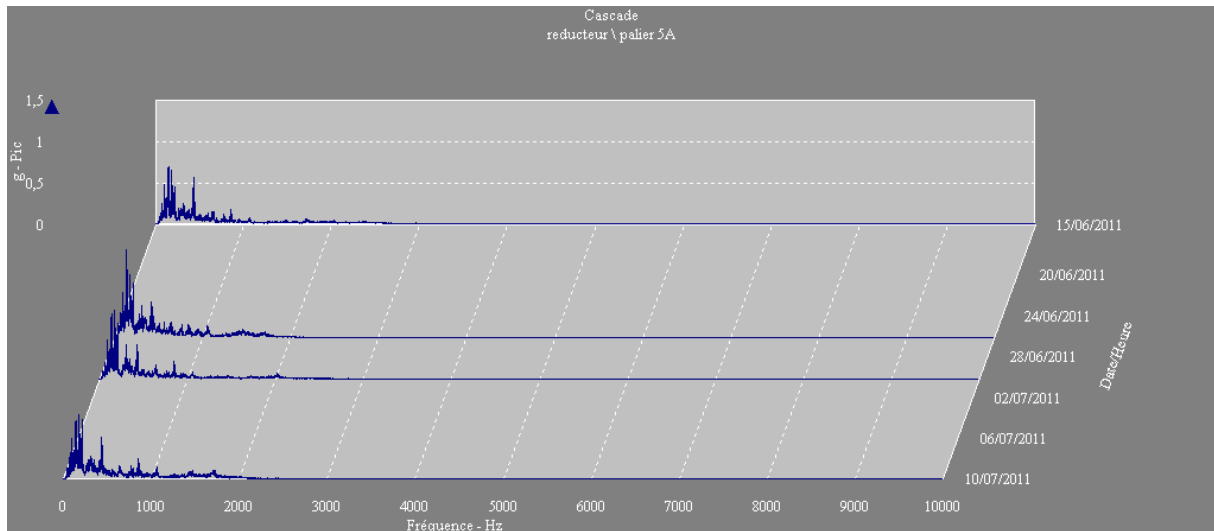
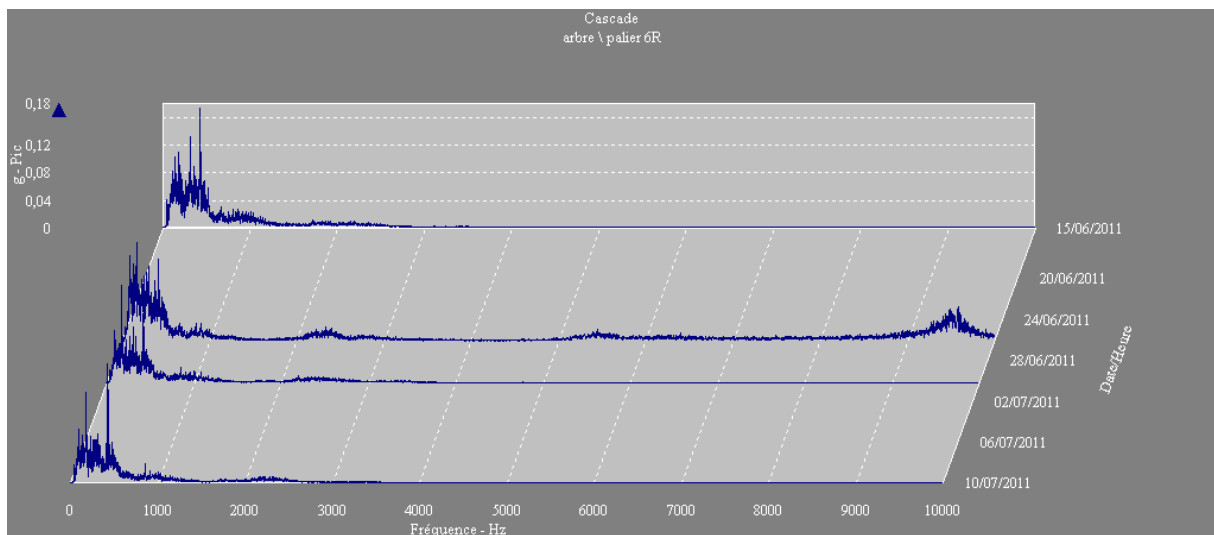


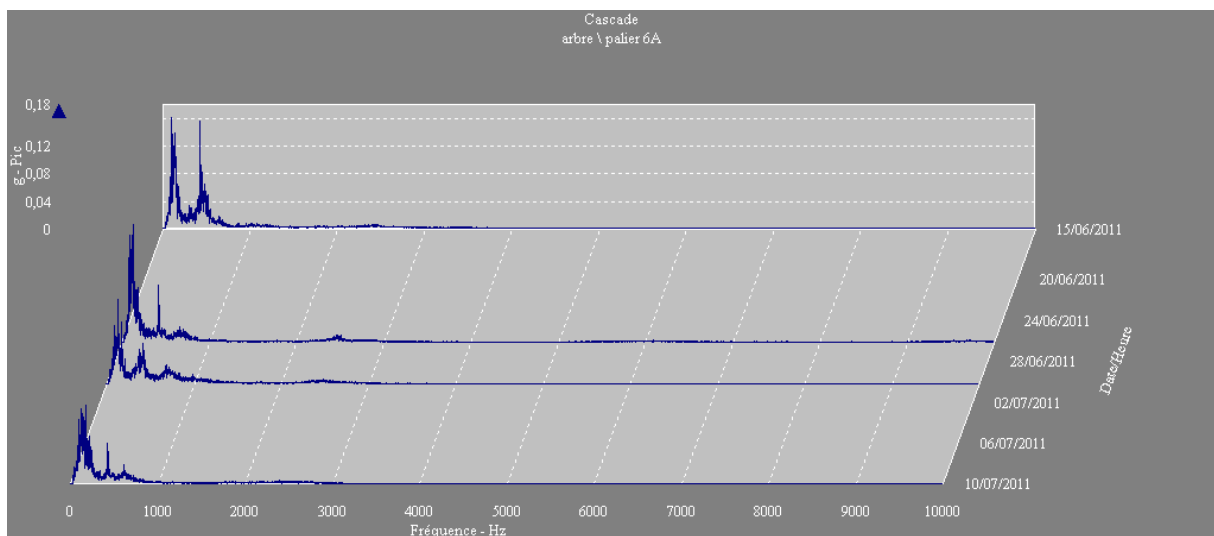
Figure IV.9 : les spectres du point 5R représentés en cascade [0-10000Hz]



**Figure IV.10 :** les spectres du point 5A en cascade [0-10000Hz]



**Figure IV.11 :** les spectres du point 6R représentés en cascade [0-10000Hz]



**Figure IV.12 :** les spectres du point 6A représentés en cascade [0-10000Hz]

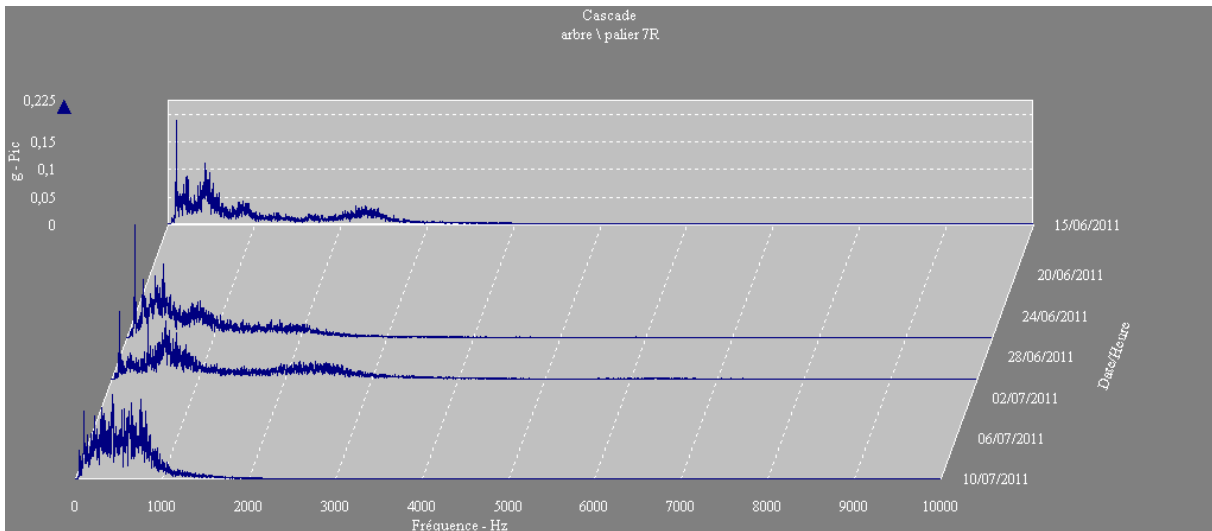


Figure IV.13 : les spectres du point 7R représentés en cascade [0-10000Hz]

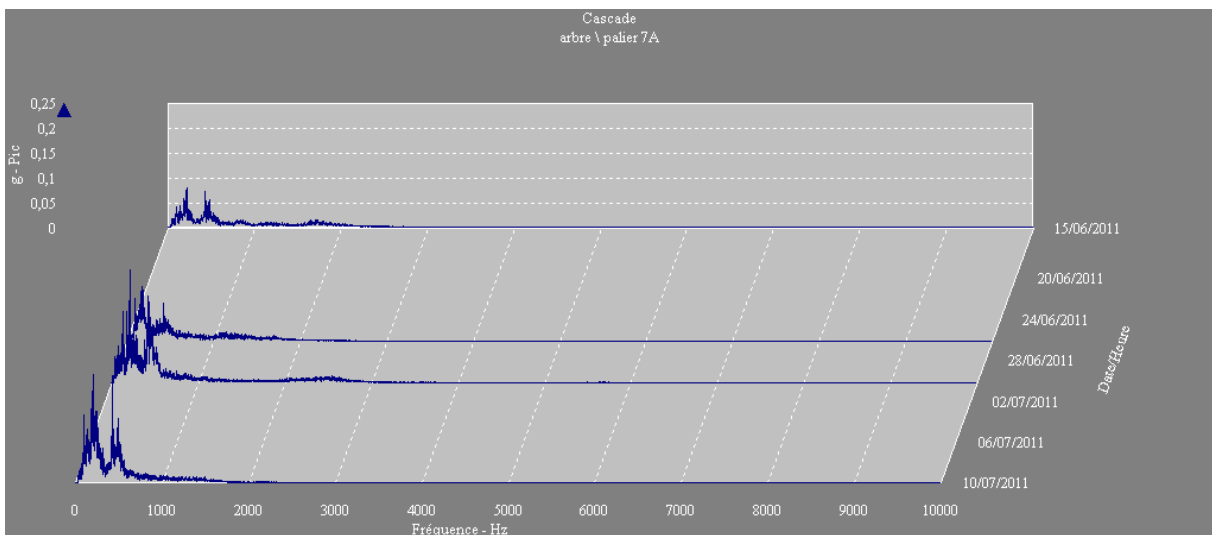


Figure IV.14 : les spectres du point 7A représentés en cascade [0-10000Hz]

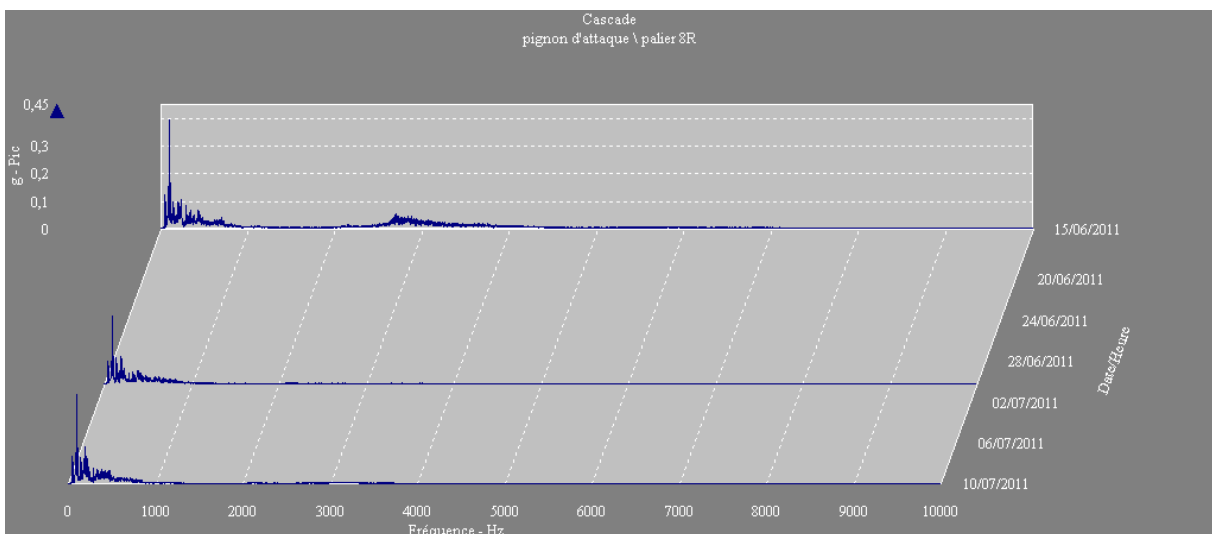
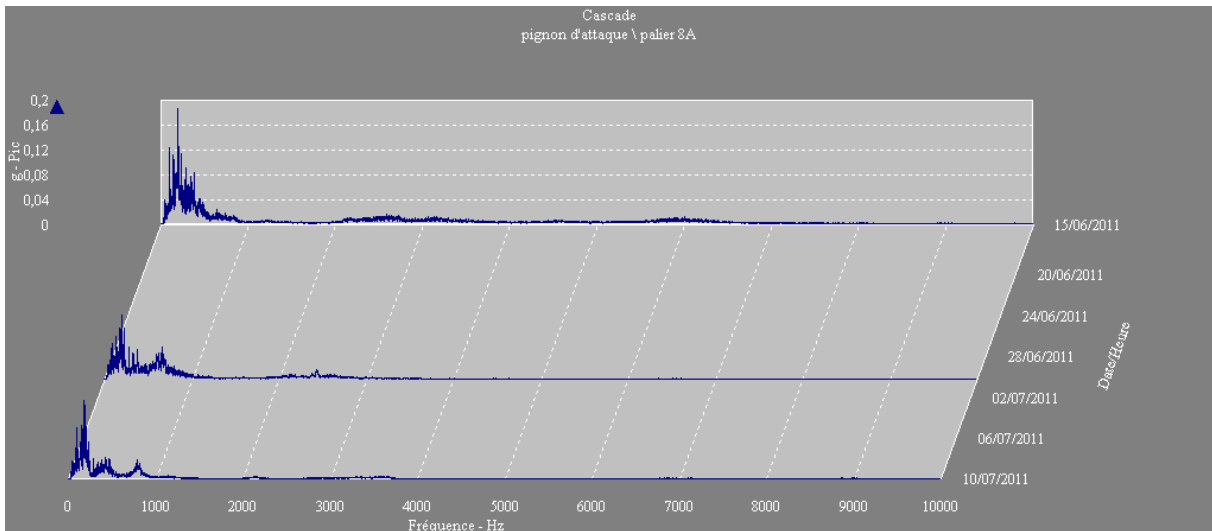
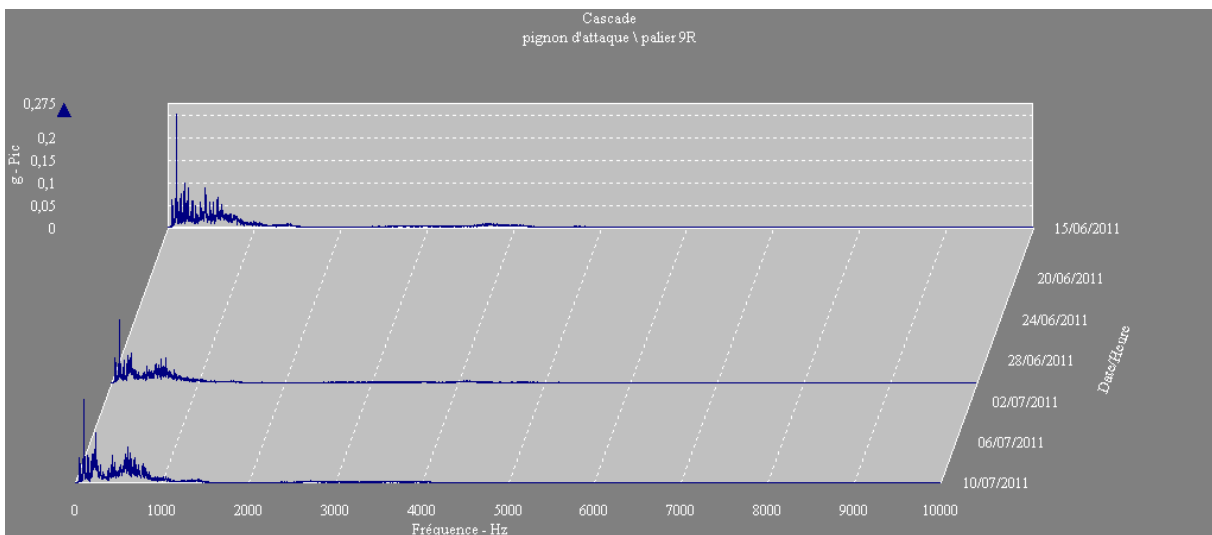


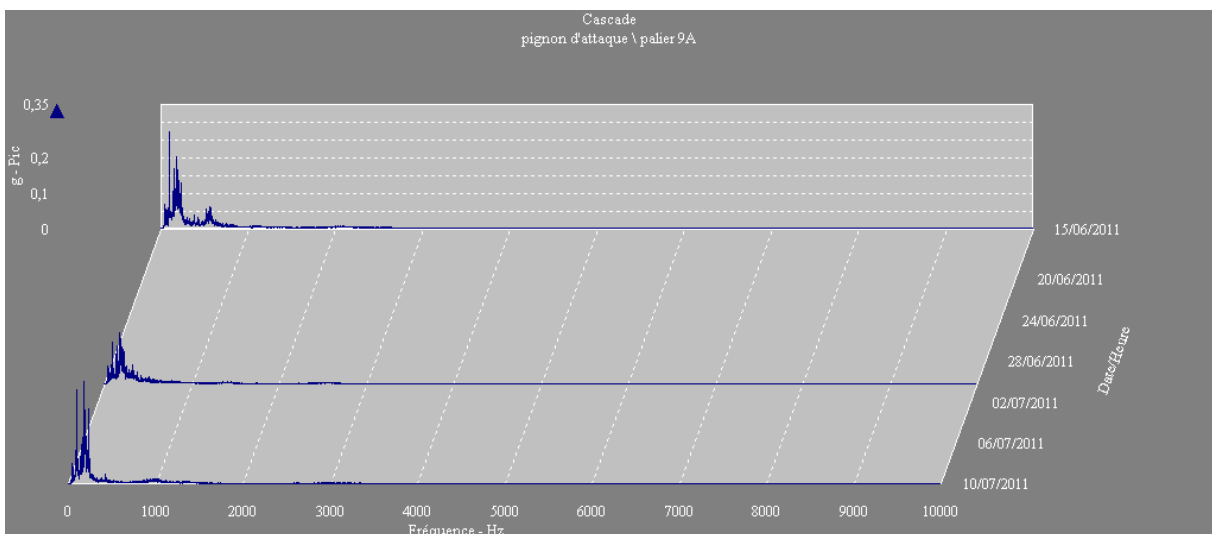
Figure IV.15 : les spectres du point 8R représentés en cascade [0-10000Hz]



**Figure IV.16** : les spectres du point 8A représentés en cascade [0-10000Hz]



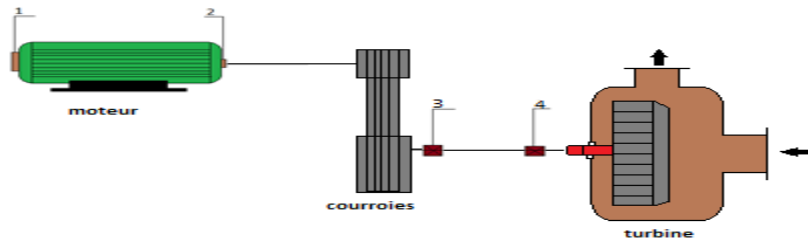
**Figure IV.17** : les spectres du point 9R représentés en cascade [0-10000Hz]



**Figure IV.19** : les spectres du point 9A représentés en cascade [0-10000Hz]

## IV.2 Le ventilateur

La chaîne cinématique du ventilateur est décrite par la figure IV.20

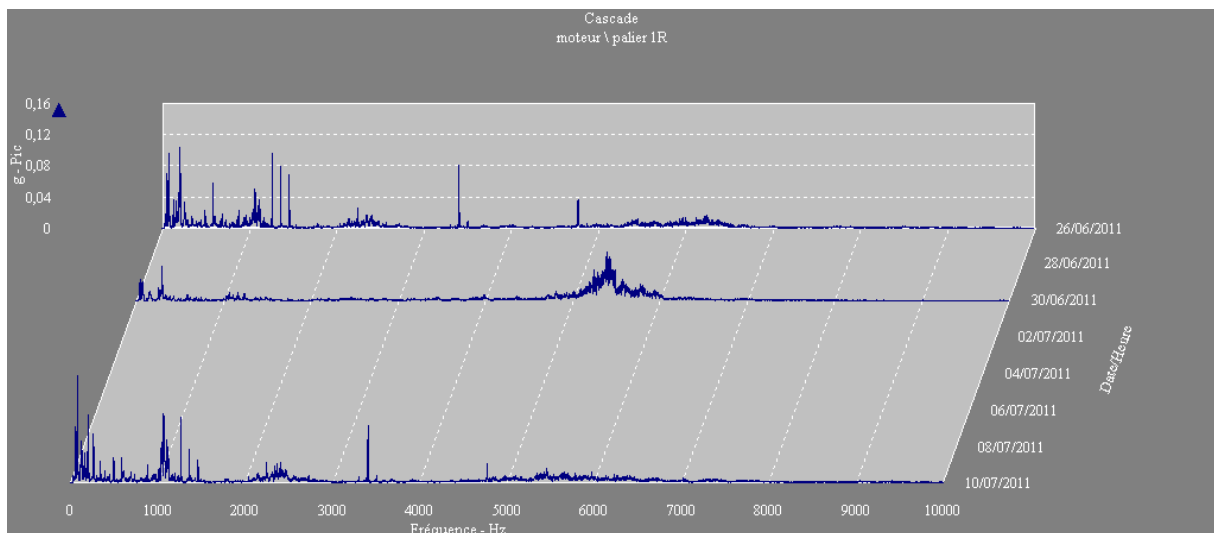


**Figure IV.20 :** Chaîne cinématique du ventilateur AAF1

Sur le schéma synoptique (Fig.IV.20) sont représentés tous les éléments constituant le ventilateur (le moteur, la turbine, les paliers...etc.), ainsi que les points de mesure sur lesquels est disposé l'accéléromètre pour la mesure des vibrations. Ces points correspondent aux paliers qui supportent les efforts auxquels est soumis le ventilateur.

Les mesures sont représentées en cascade qu'est une représentation en trois dimensions (amplitude, fréquence, date de la prise de mesure).

Les figures (de la Figure IV.21 à la Figure IV.27) représentent les spectres recueillis par l'accéléromètre placés aux paliers du ventilateur en des positions axiales et radiales (verticales) sur une plage de fréquences de [0-10000Hz]



**Figure IV.21 :** les spectres du point 1R représentés en cascade [0-10000Hz]

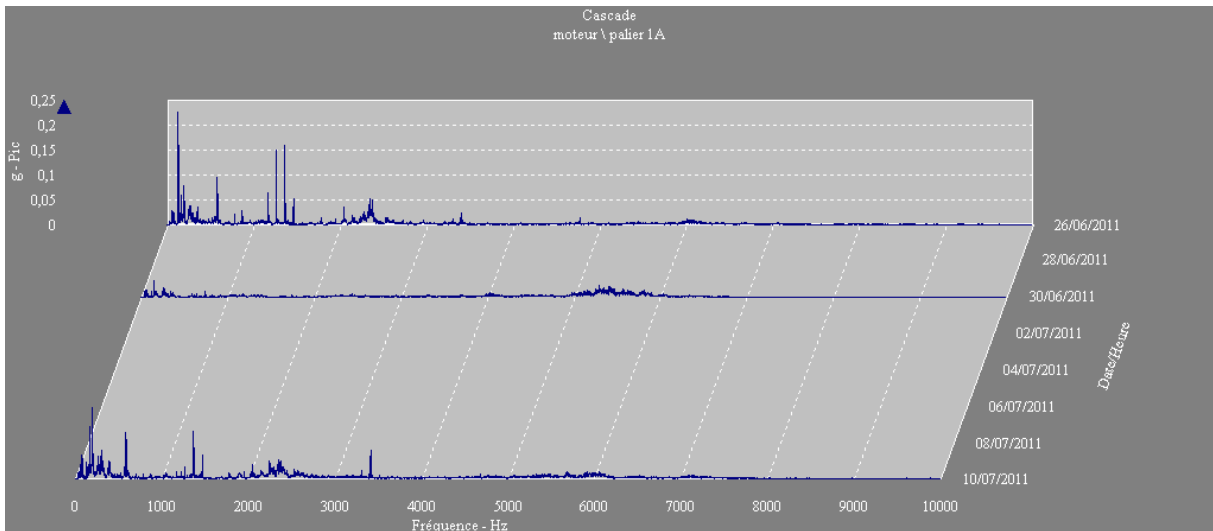


Figure IV.22 : les spectres du point 1A représentés en cascade [0-10000Hz]

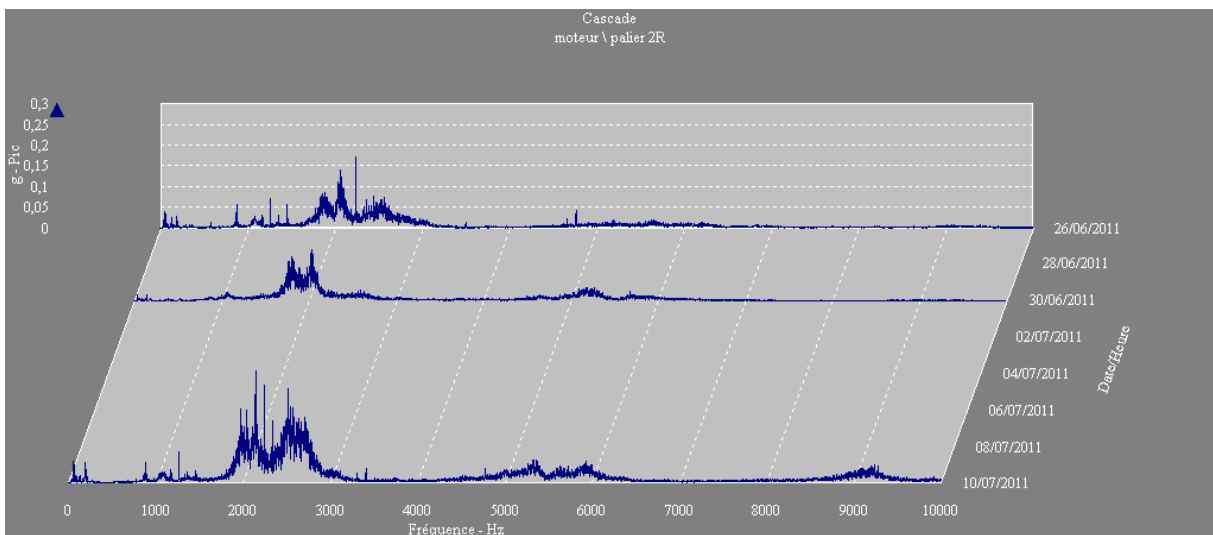


Figure IV.22 : les spectres du point 2R représentés en cascade [0-10000Hz]

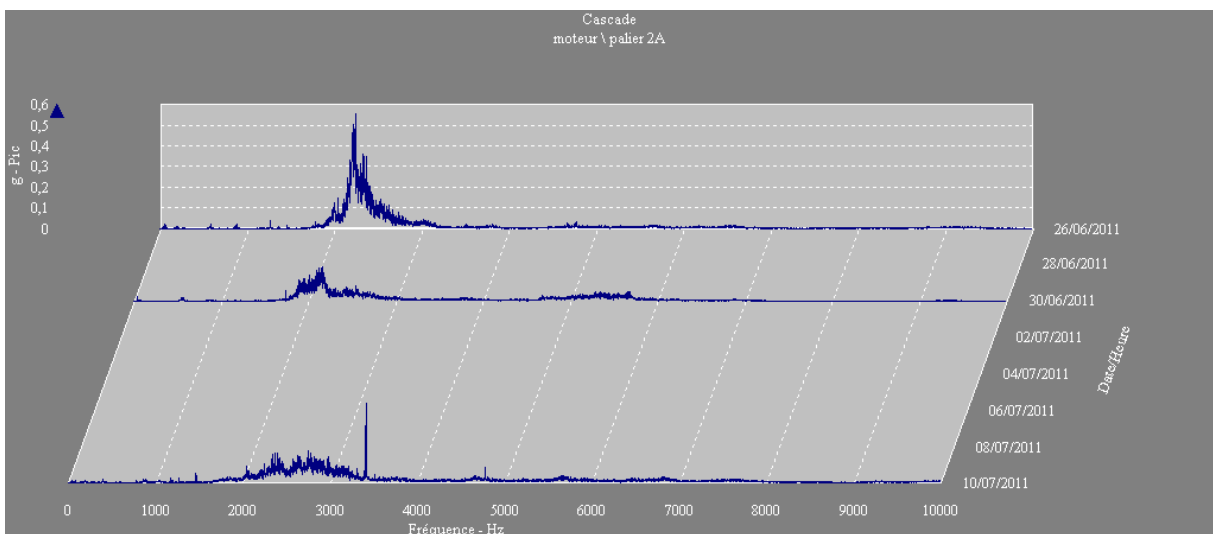
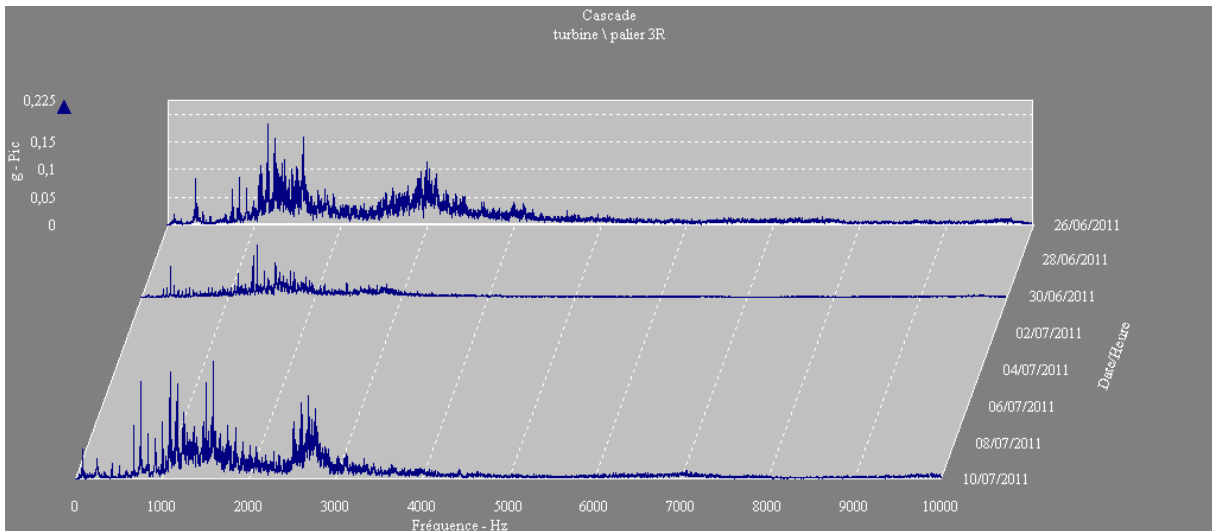
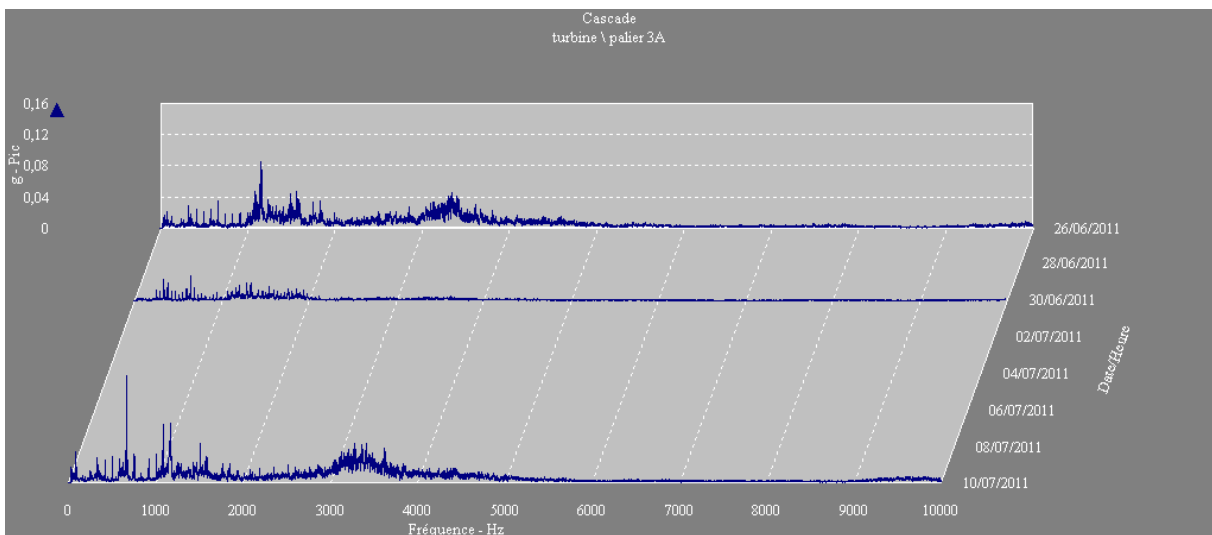


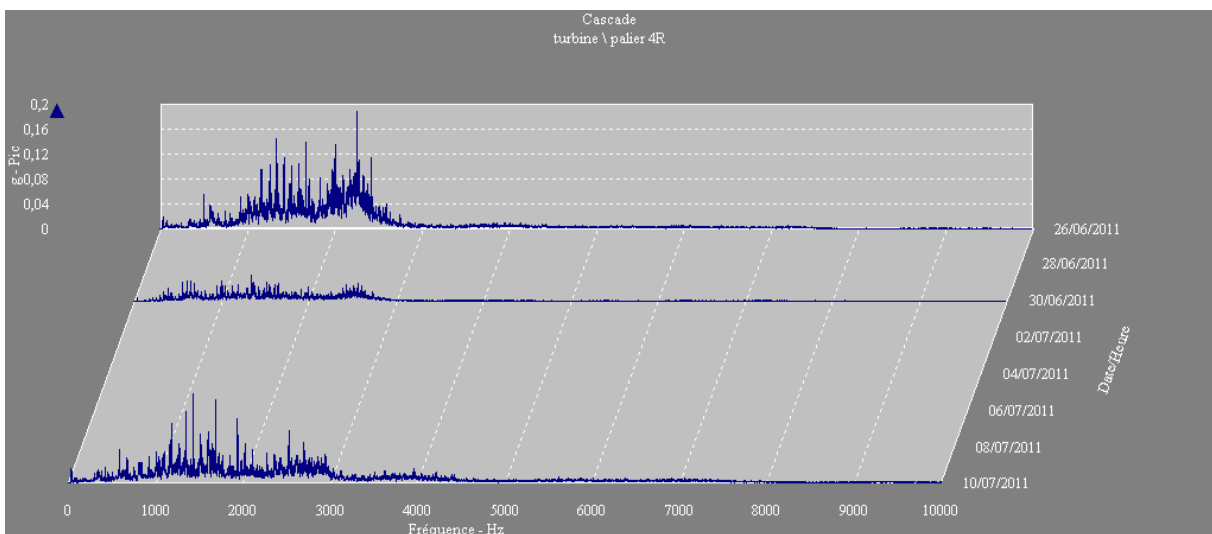
Figure IV.23 : les spectres du point 2A représentés en cascade [0-10000Hz]



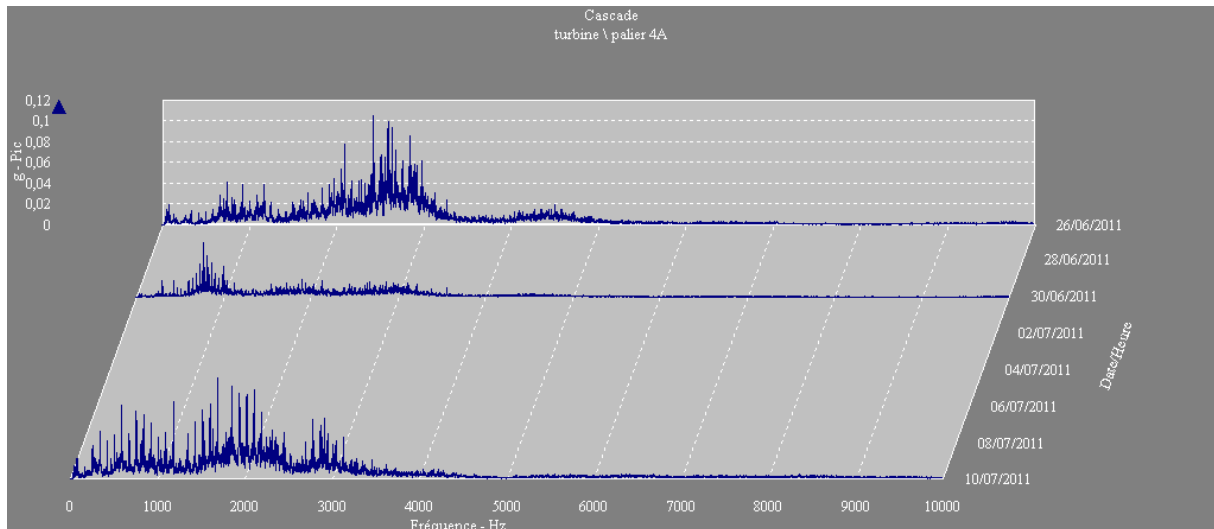
**Figure IV.24** : les spectres du point 3R représentés en cascade [0-10000Hz]



**Figure IV.25** : les spectres du point 3A représentés en cascade [0-10000Hz]



**Figure IV.26** : les spectres du point 4R représentés en cascade [0-10000Hz]



**Figure IV.27** : les spectres du point 4A représentés en cascade [0-10000Hz]

Les spectres ont été représentés sous échelle linéaire en unité physique. Cette représentation permet le suivi de la forme du signal et met en évidence les raies d'amplitude prépondérantes

Nous voyons clairement que pour les amplitudes dans la plage [3000Hz -10000Hz] des mesures du broyeur, tendent vers zéro ce qui néglige quelques défauts qui se manifestent aux hautes fréquences (défauts de roulements, défauts d'engrenages).

Pour le ventilateur les spectres avec cette représentation montrent beaucoup d'ambiguïté, donc il est observé que ces spectre manquent beaucoup de netteté, ainsi il est souhaitable d'agrandir ces derniers par un zoom. Les spectres zoomés sont représentés dans le cinquième chapitre.



# Chapitre V : Interprétation des résultats

## V.1 Introduction

Surveiller une machine nécessite de choisir un certain nombre d'indicateurs, de les mesurer soit de manière continue (**surveillance « on line »**) soit de manière périodique (**surveillance « off line »**) et d'en suivre les évolutions dans le temps. Toute évolution significative de la valeur d'un indicateur doit conduire immédiatement à l'application d'une procédure adaptée (validation de l'évolution, identification de l'anomalie et de sa gravité, programmation d'actions correctives, arrêt d'urgence, exploitation en mode dégradé...) [10].

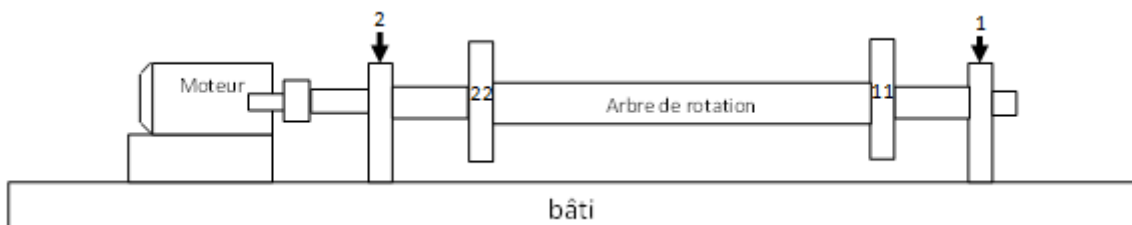
La surveillance peut être confiée à du personnel peu qualifié. Le diagnostic demande de solides connaissances mécaniques et une formation plus pointue en analyse du signal. Le diagnostic met en œuvre des outils mathématiquement plus élaborés. Il permet de désigner l'élément de la machine défectueux suite à une évolution anormale des vibrations constatée lors de la surveillance. Le diagnostic n'est réalisé que lorsque la surveillance a permis de détecter une anomalie ou une évolution dangereuse du signal vibratoire. [4]

Le diagnostic permet de statuer sur l'existence d'anomalies, d'en identifier la nature et d'en préciser la gravité. Le diagnostic par analyse de vibration est non seulement l'outil de base de la maintenance prévisionnelle, mais aussi du contrôle qualité dans le cas d'une recette vibratoire d'une installation neuve ou après remise en état. [10]

## V.2 Le travail sur banc d'essai

### V.2.1 La chaîne cinématique du banc d'essai

La chaîne cinématique du banc d'essai du laboratoire est représentée sur la figure V.1. Elle est essentiellement constituée de deux paliers et deux disques.



**Figure V.1** : la chaîne cinématique du banc d'essai

(1), (2) : Deux paliers à semelles supportant l'arbre

(11), (22) : deux disques percés à la périphérie de 6 trous régulièrement espacés de 60°

### V.2.2 Calcul cinématique

La vitesse de rotation est mesurée à l'aide d'un stroboscope.  $Fr = 24.9$  Hz ie 1494 tr/min.

La fréquence de rotation est  $Fr = 24.9$  Hz, et ces harmoniques sont représentées ci-dessus :

$Fr$ (Hz)	Les harmoniques (Hz)									
24,9	$2*Fr$	$3*Fr$	$4*Fr$	$5*Fr$	$6*Fr$	$7*Fr$	$8*Fr$	$9*Fr$	$10*Fr$	$11*Fr$
	49.8	74.7	99.6	124.5	149.4	174.3	199.2	224.1	249	273.9
	$12*Fr$	$13*Fr$	$14*Fr$	$15*Fr$	$16*Fr$	$17*Fr$	$18*Fr$	$19*Fr$	$20*Fr$	$21*Fr$
	298.8	323.7	348.6	373.5	398.4	423.3	448.2	473.1	498	522.9

Tableau V.1 : la fréquence de rotation et ces harmoniques

### V.2.3 Etude de cas (défaut de balourd)

Le déséquilibre massique est créé en ajoutant des masses de compensation sur les deux disques du banc d'essai pour voir comment va se manifester le défaut de balourd réellement dans un signal vibratoire.

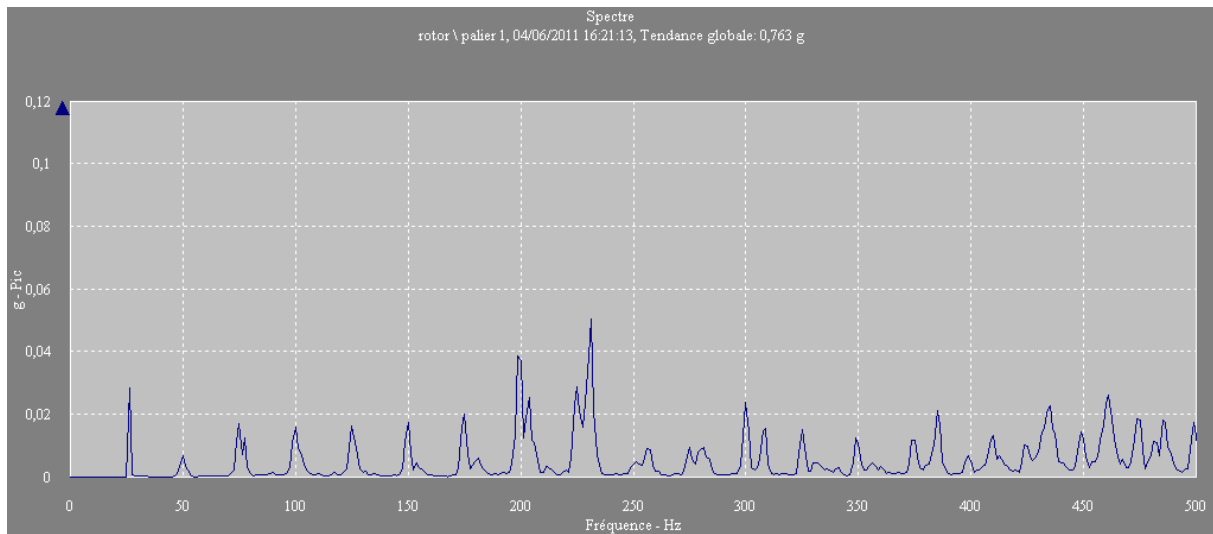
#### Résultats

Les signaux dont nous disposons sont issus des mesures de vibrations sur deux paliers du banc d'essai réalisés à cette fin dans notre laboratoire.

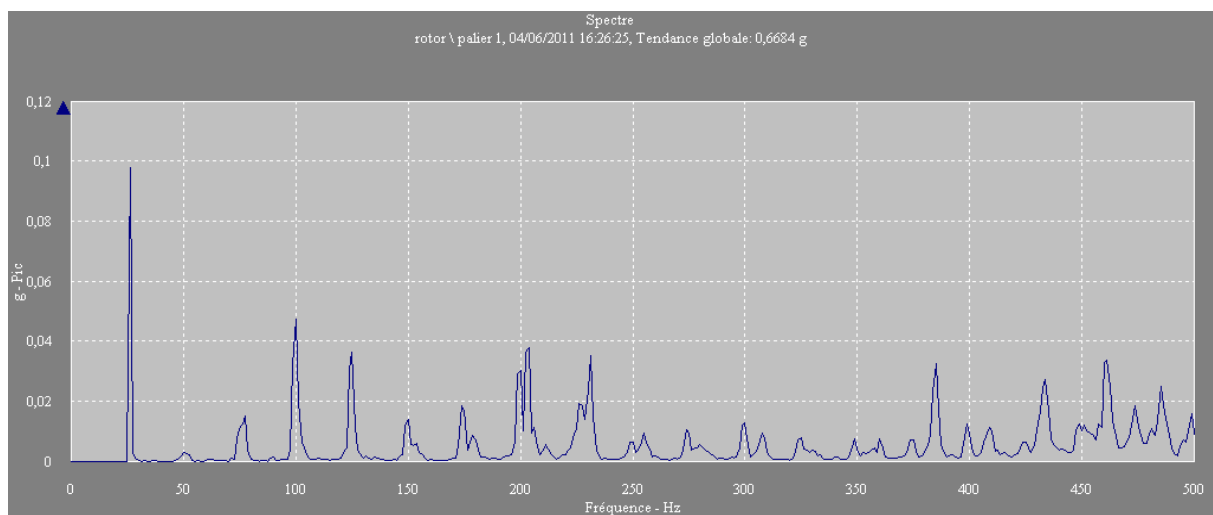
Le tableau ci-dessous résume la position de l'amplitude prépondérante suivant la direction radiale à la fréquence de rotation.

	Amplitude a la vitesse de rotation sans ajout de masse en mg	Amplitude a la vitesse de rotation avec ajout de masse en mg		
		Au niveau du disque11	Au niveau des deux disques déphasage 0°	Au niveau des deux disques déphasage 180°
Palier N°2	22,43	45,17	35,71	4,58
Palier N°1	28,53	97,81	128,00	14,04

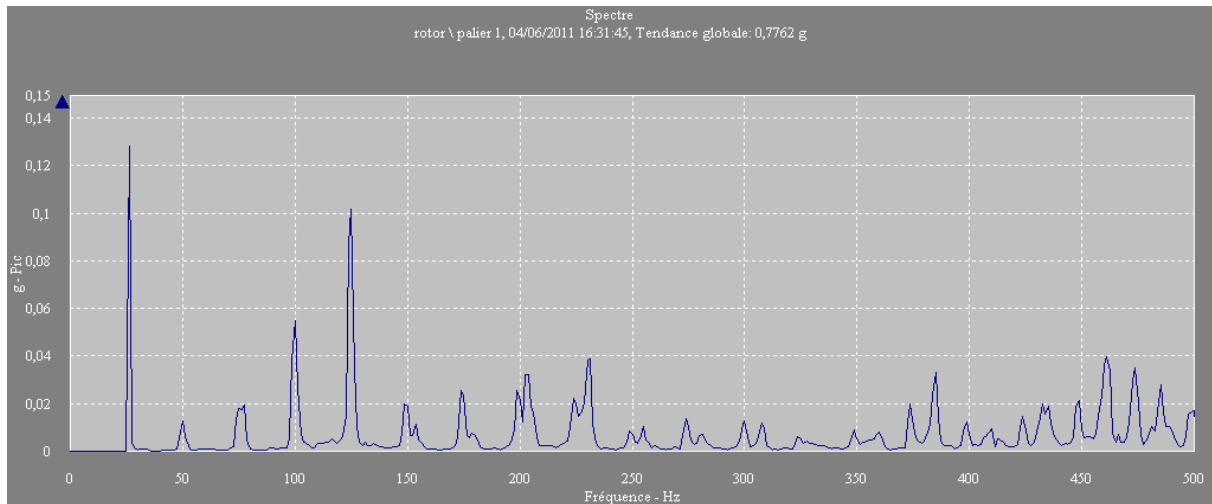
Les figures (de la figure V.2 à la figure V.9) représentent les signaux receillis par l'accéléromètre deux paliers du banc d'essai à des position radiales (verticales)



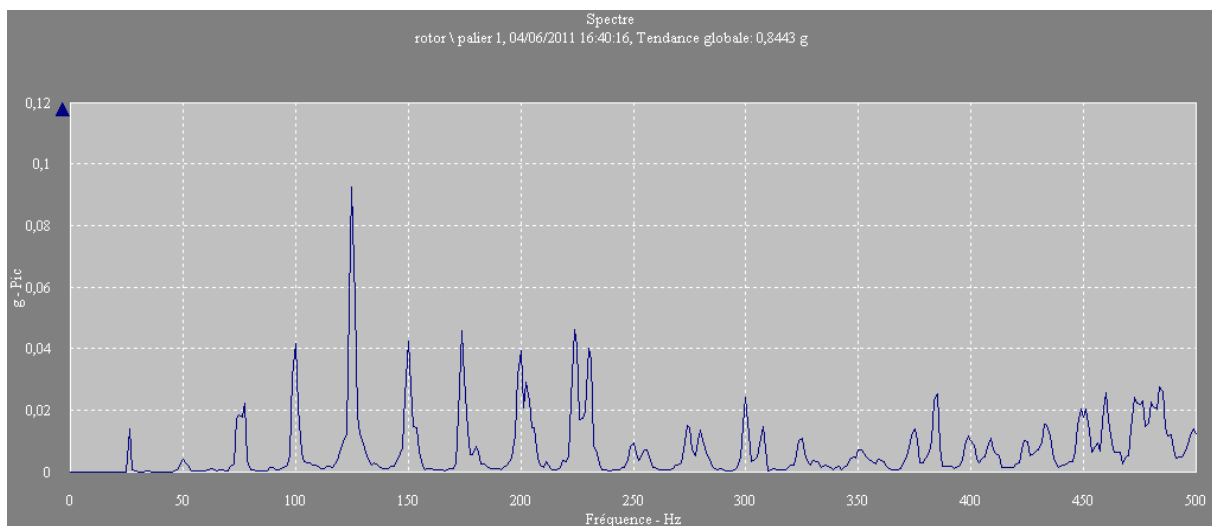
**Figure V.2 :** spectre du Palier N°1 sans ajout de masse



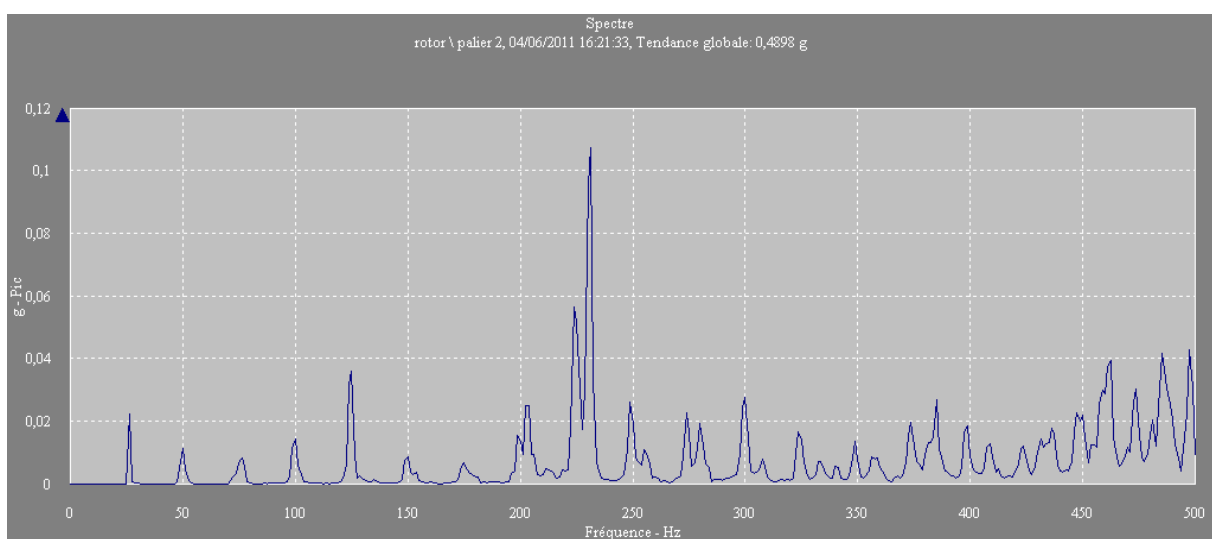
**Figure V.3 :** spectre du Palier N°1 avec ajout de masse au niveau du disque 11



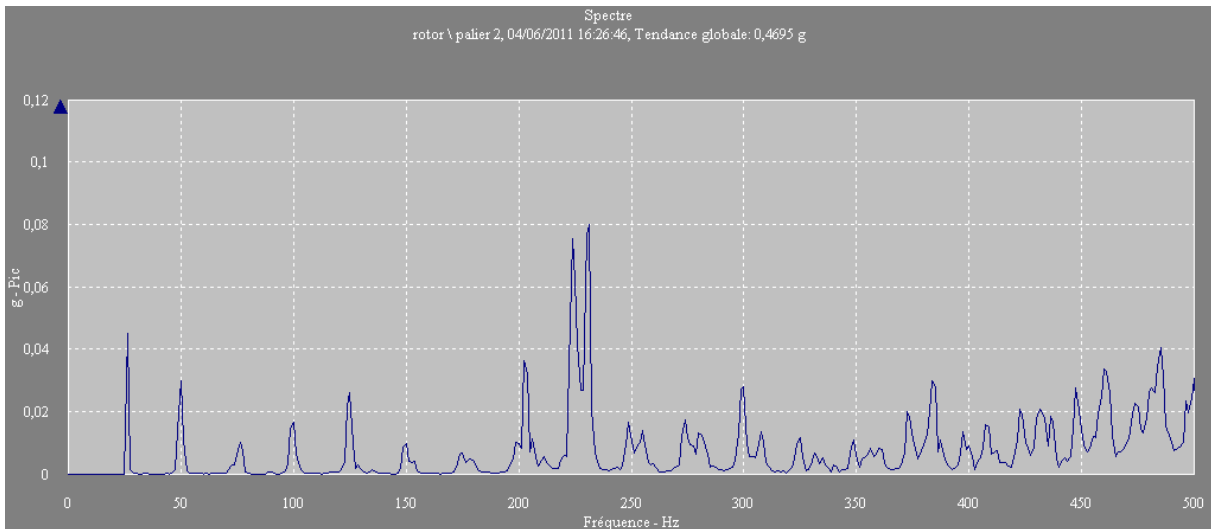
**Figure V.4 :** spectre du Palier N°1 avec ajout de 2 masses (déphasage 0)



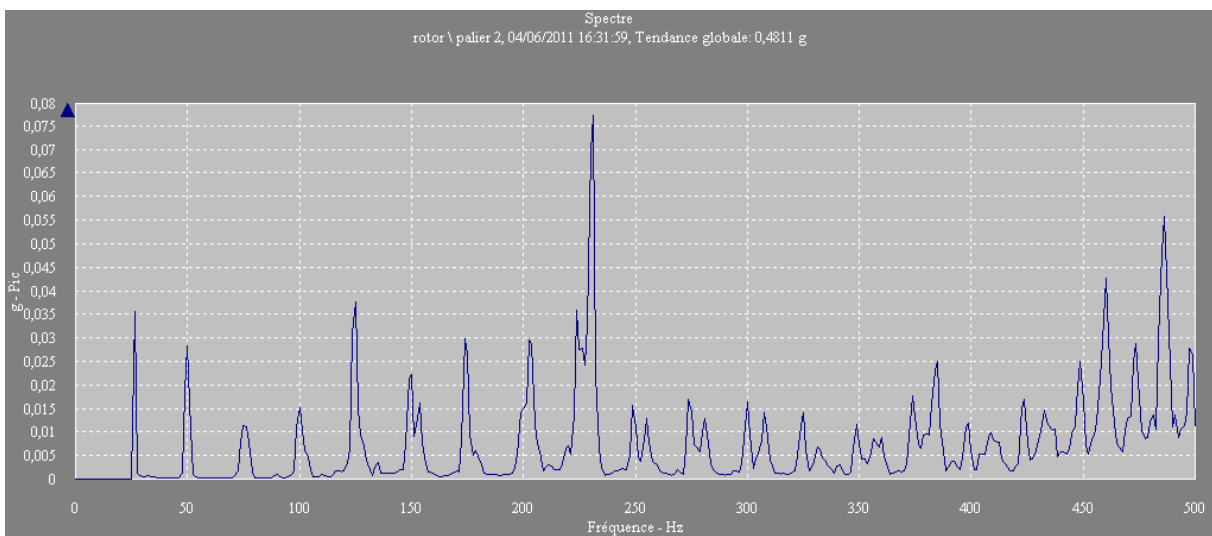
**Figure V.5 :** spectre du Palier N°1 ajout de 2 masses (déphasage 180°)



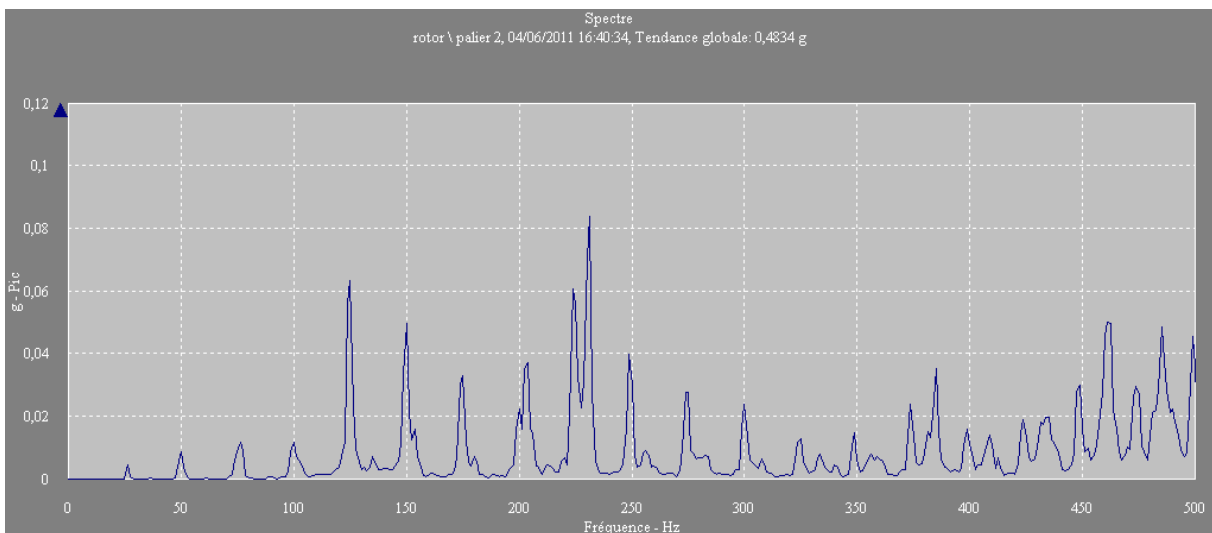
**Figure V.6 :** spectre du Palier N°2 sans ajout de masse



**Figure V.7 :** spectre du Palier N°2 avec ajout de masse au niveau du disque 11



**Figure V.8 :** spectre du Palier N°2 avec ajout de 2 masses (déphasage 0)



**Figure V.9 :** spectre du Palier N°2 avec ajout de 2 masses (déphasage 180°)

Nous remarquons la présence d'une amplitude prépondérante à la fréquence de rotation, ceci nous renseigne sur la présence d'un défaut de déséquilibre massique (Balourd) sur le rotor. Ce défaut a été amplifié avec ajout de masse dans le disque N°11. L'amplitude relevée sur le palier N°1 est augmentée de celle relevée sans ajout de masse (de 28, 53 mg à 97,81 mg).

Nous notons qu'après l'ajout d'une masse dans les deux disques N°11 et N°22 avec un déphasage de 180° entre les deux masses, une diminution de l'amplitude relevée sur les deux paliers. Ceci peut nous conduire à conclure qu'on a réalisé une sorte d'équilibrage dynamique sur les deux plans 1 et 2 à la vitesse de rotation.

## **V.2.4 Conclusion**

L'arbre possède un défaut de balourd (cas sans ajout de masse), ce défaut est due à une non concentricité des éléments consécutifs (arbre et les deux disques). Cette non-concentricité est due elle-même à un mauvais usinage.

Ce travail nous a permis de maîtriser la manipulation du collecteur et du logiciel. En plus on est arrivé à visualiser la manifestation du défaut dans le spectre.

## **V.3 La surveillance des deux machines de la cimenterie**

Le suivi que l'on propose est périodique de type off ligne. Par manque de la matière première dans l'usine durant la période de notre stage, on n'a pu prendre qu'une mesure avec broyeur en charge et ceci était durant la deuxième campagne de mesures effectuée le 26.06.20011. les autres mesures ont été prise avec broyeur à vide.

Pour le suivi du ventilateur les relevés ont été pris à partir de la deuxième campagne de mesures et en parallèle avec le broyeur.

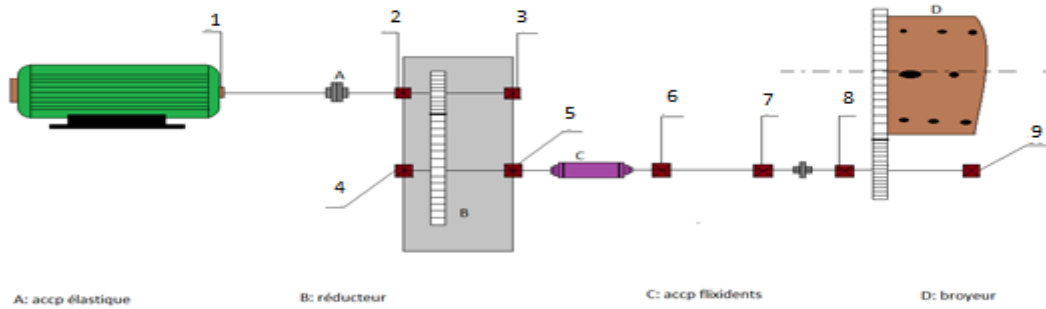
On a pu prélever quatre relevés pour le broyeur, et trois relevés pour le ventilateur. Les campagnes d'essais de mesures consécutives sont espacées d'une période jugée adéquate pour l'ingénieur.

### **V.3.1 Etude cinématique des deux machines**

Une machine ne peut être correctement surveillée sauf si sa chaîne cinématique est connue. Avant de recueillir quelque signal vibratoire que ce soit, il faut prendre connaissance de la cinématique de l'installation à surveiller.

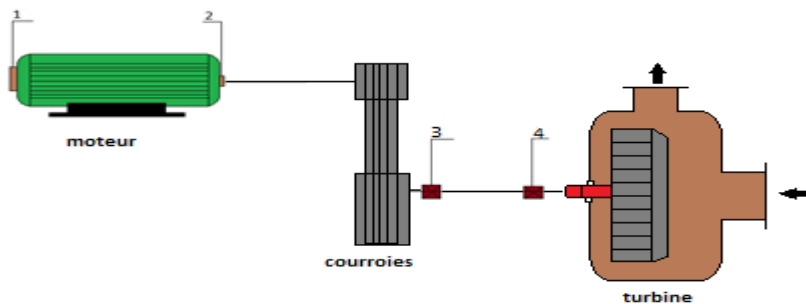
#### **V.3.1.1 Les chaînes cinématiques des deux équipements**

Nous avons effectué une analyse vibratoire sur un broyeur de la cimenterie dont la cinématique est représentée ci-dessous.



**Figure V.10 :** Chaîne cinématique du broyeur ciment AC BK II

La cinématique du ventilateur de la cimenterie est représentée ci-dessous.



**Figure V.11 :** Chaîne cinématique du ventilateur AAF1

### V.3.1.2 Calcul des données techniques principales

Le calcul de la cinématique de l'équipement, est nécessaire pour la définition de la signature vibratoire qui constitue en fait la référence (indicateur) de base pour le suivi vibratoire. Elle définit les fréquences d'apparition des anomalies, et délimite les seuils minimums et maximums des amplitudes vibratoires de chaque organe.

Les fréquences du broyeur et du ventilateur, sont obtenues après substitution des données technique des deux machines indiquées au **chapitre 2**.

❖ LE BROYEUR

Désignation	Fréquence (Hz)
La fréquence de rotation $Fr$	16,46
La fréquence d'engrènement (réducteur) $Fe$	428,13
La fréquence d'engrènement (pignon d'attaque, couronne) $Fe$	47,22

**Tableau V.2 :** les fréquences caractéristiques du broyeur

❖ LE VENTILATEUR

Désignation	Fréquences(Hz)
La fréquence de rotation (arbre moteur) $Fr_1$	16.5
La fréquence de rotation (arbre turbine) $Fr_2$	11.25
Fréquences caractéristiques d'un défaut de courroie ( $F_{c_1}=F_{c_2}$ )	1.683
Fréquences Passages des pales ( $F_{pales}$ )	135

**Tableau V.3 :** les fréquences caractéristiques du ventilateur

Le logiciel **ATLAS** fournis par le fournisseur **SKF** de ces roulements permet d'identifier pour chaque type de roulements et en fonction de la vitesse de rotation de l'arbre, toutes les fréquences des défauts possibles dans un roulement. Nous établirons ci-dessous les différents résultats du programme indiquant les différentes fréquences des défauts :



	<b>F<sub>er</sub> (Hz)</b>	<b>F<sub>dbe</sub> (Hz)</b>	<b>F<sub>dbi</sub> (Hz)</b>
<p><b><u>Moteur</u></b></p> <p>- Reference Roulement 01 : 6328 MC3</p>	72,49	51,61	80,13
<p><b><u>Réducteur</u></b></p> <p>- Reference Roulement 02 ,03 : 22230 C</p> <p>- Reference Roulement 04 ,05 : 23040 C</p>	114,05	134,61	178,26
<p><b><u>Contre arbre. Pignon d'attaque</u></b></p> <p>- Reference Roulement 06,07 ,08 ,09 : 22244 C</p>	21,94	25,76	34,05

**Tableau V.4** : les fréquences des défauts des roulements du broyeur

	<b>F<sub>er</sub>(Hz)</b>	<b>F<sub>dbe</sub>(Hz)</b>	<b>F<sub>dbi</sub>(Hz)</b>
<p><b><u>Moteur</u></b></p> <p>- Reference Roulement 01 : 6319</p>	69.27	51.08	80.92
<p>- Reference Roulement 01 : 6316</p>	68.42	50.92	81.08
<p><b><u>Turbine</u></b></p> <p>- Reference Roulement 03 ,04 : 22222K</p>	68.68	85.25	117.25

**Tableau V.5** : les fréquences des défauts des roulements du ventilateur

### V.3.2 Analyse des Résultats expérimentaux (LE BROYEUR)

#### V.3.2.1 Analyse en niveau global accélération

Le tableau ci-dessous montre les niveaux globaux en accélération pour tous les paliers accessibles en direction radiale (horizontale) et axiale.

endroit de la mesure	Niveaux vibratoire en g 15.06.2011	Niveaux vibratoire en g 26.06.2011	Niveaux vibratoire en g 30.06.2011	Niveaux vibratoire en g 10.07.2011
Palier 1R	3,707	0,977	2,034	1,332
Palier 2R	<b>2,558</b>	<b>3,008</b>	<b>2,519</b>	<b>2,802</b>
Palier 2A	<b>3,292</b>	<b>2,321</b>	<b>2,265</b>	<b>2,075</b>
Palier 3R	<b>2,140</b>	<b>2,680</b>	<b>2,360</b>	<b>2,244</b>
Palier 3A	<b>2,962</b>	<b>3,013</b>	<b>1,883</b>	<b>1,959</b>
Palier 4R	<b>1,787</b>	<b>3,584</b>	<b>1,449</b>	<b>2,193</b>
Palier 4A	<b>2,034</b>	<b>2,423</b>	<b>2,146</b>	<b>2,295</b>
Palier 5R	<b>2,816</b>	<b>2,273</b>	<b>1,496</b>	<b>2,142</b>
Palier 5A	<b>2,658</b>	<b>3,395</b>	<b>2,829</b>	<b>3,025</b>
Palier 6R	0,772	0,996	0,553	0,612
Palier 6A	0,682	0,637	0,508	0,528
Palier 7R	0,822	1,086	0,923	1,363
Palier 7A	0,394	0,582	0,962	1,055
Palier 8R	0,866	-----	0,532	0,886
Palier 8A	0,708	-----	0,479	0,708
Palier 9R	0,583	-----	0,418	0,583
Palier 9A	0,738	-----	0,513	0,738

**Tableau V.6 :** les niveaux globaux en accélération pour tous les points de mesure

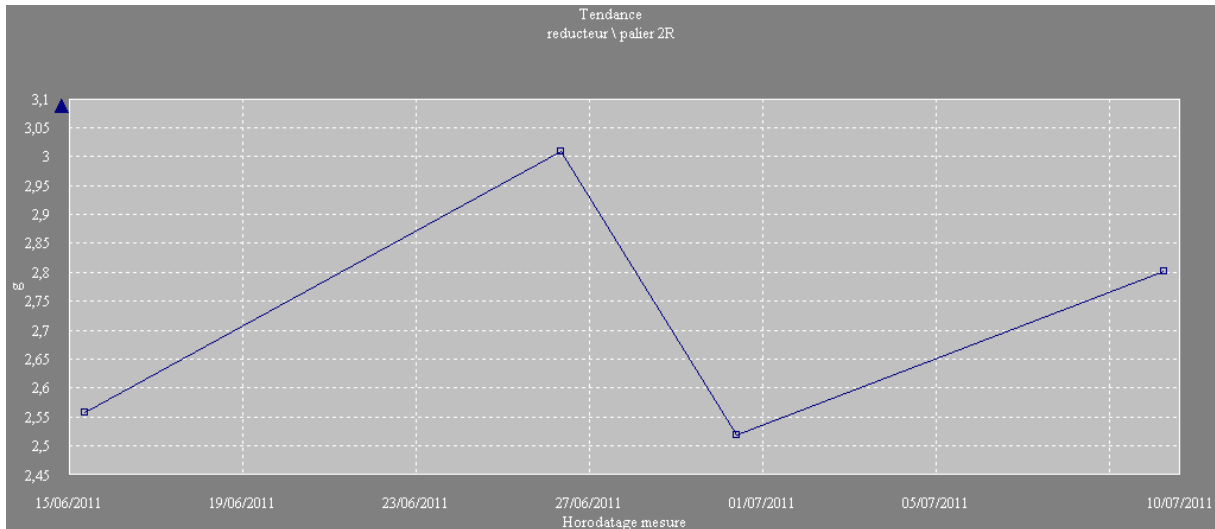
Avec :  $1g=9.81 \text{ m/s}^2$

Le tableau ci-dessus montre les niveaux globaux en accélération (0-10000Hz) qui sont en évolution non-significatives c'est-à-dire qu'on ne remarque pas une augmentation nette du niveau vibratoire. Les mesures du 26.06.2011 (le jour où le broyeur était en charge) ont des niveaux vibratoires importants que les autres mesures dues aux vibrations transmises aux paliers. Grâce à la charge qui se déplace en rotation (radialement) qui engendre des forces radiale, on remarque que le niveau vibratoire radiale est plus important que les axiales pour cette campagne de mesure.

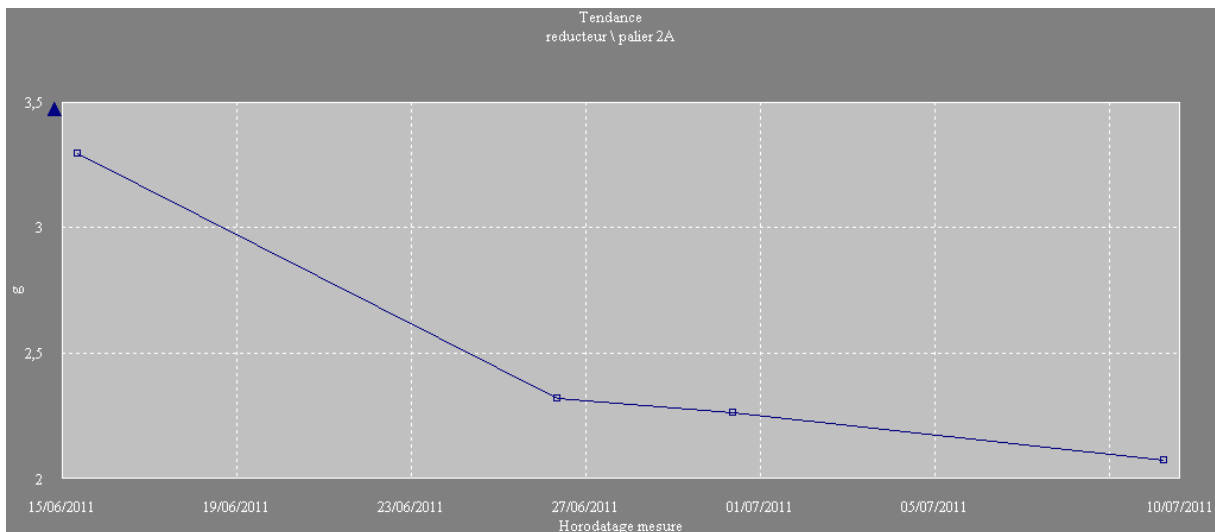
Les grandes vibrations du réducteur ont attiré l'attention même lorsque le broyeur n'était pas en charge .Ceci nous amène à concentrer notre travail sur les paliers du réducteur (palier : 2, 3,4 et 5).

### V.3.2.1.1 Les courbes de tendance des paliers 2, 3, 4 et 5

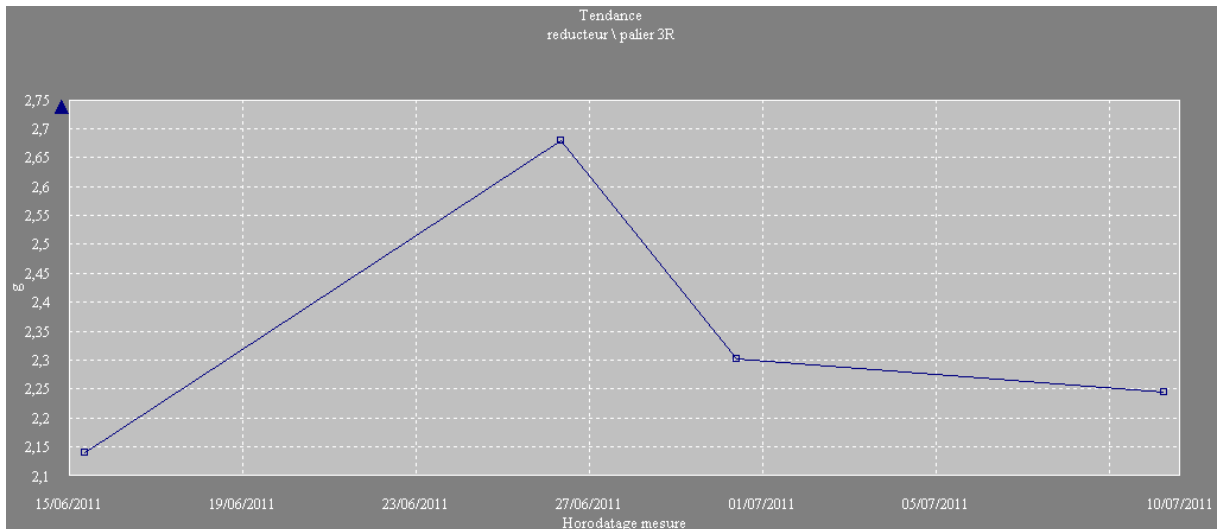
Les figure suivantes (de la figure V.12 à la figure V.19) présentent l'évolution des niveaux vibratoire, des mesure prise sur les paliers 2, 3, 4 et 5 pour les deux directions : radiale (R), axiale (A).



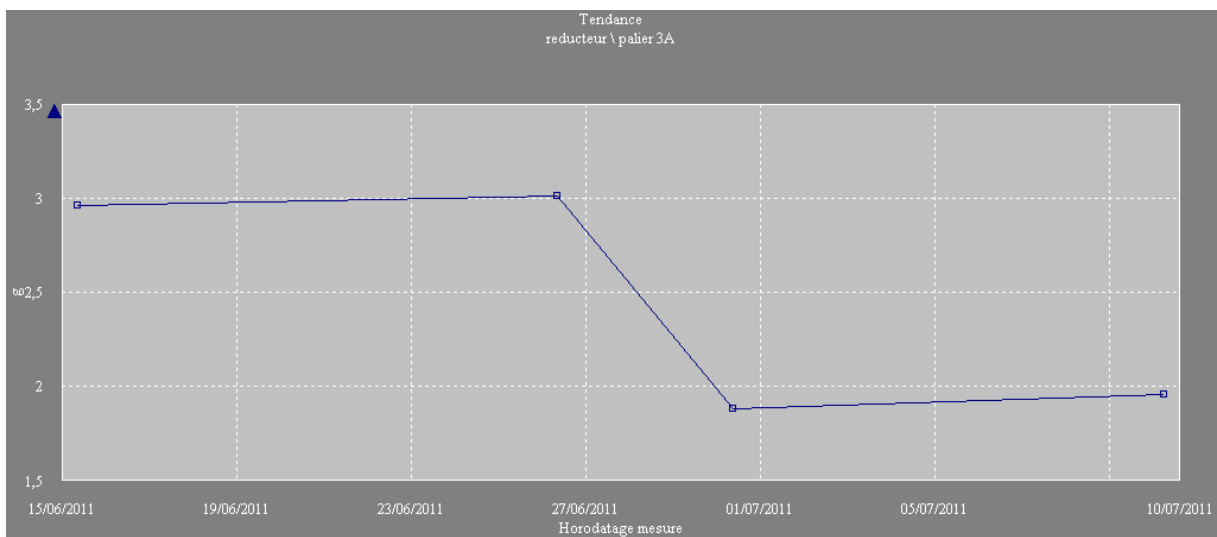
**Figure V.12 :** la courbe de tendance du point 2R en NG Accélération



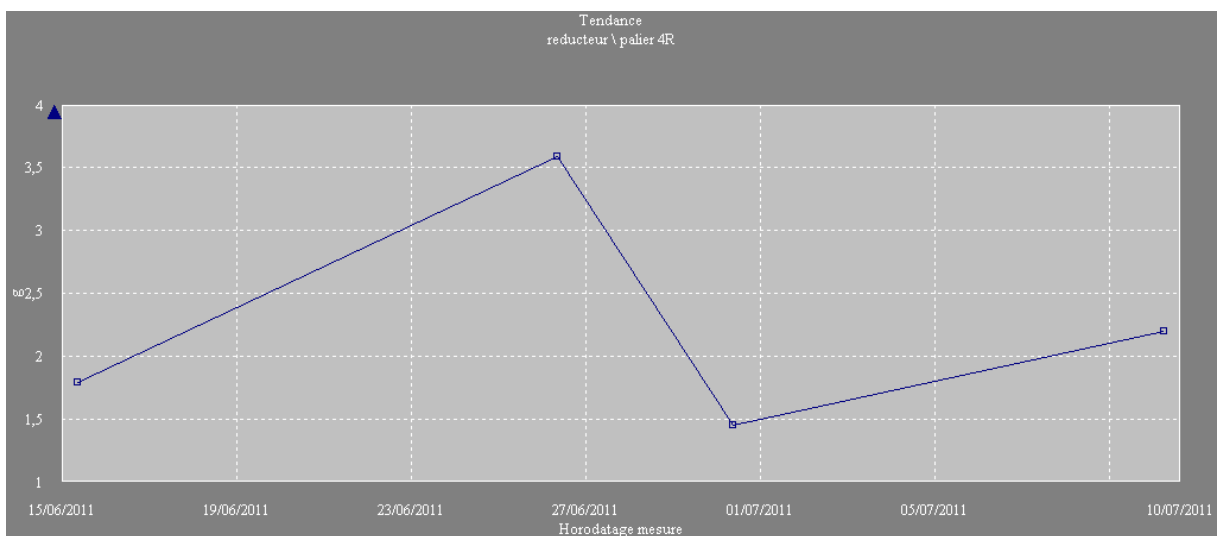
**Figure V.13 :** la courbe de tendance du point 2A en NG Accélération



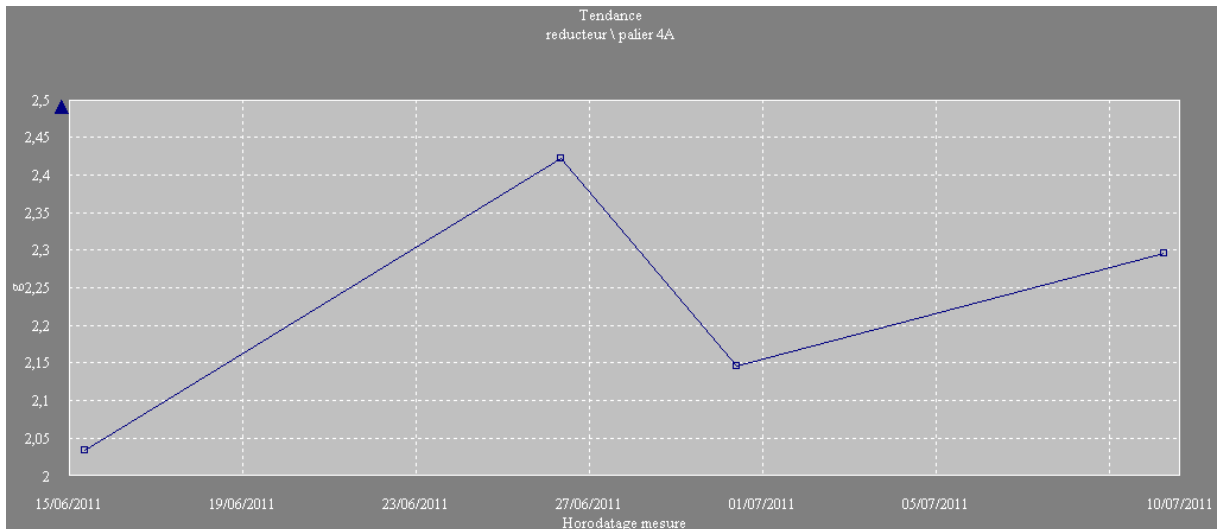
**Figure V.14 :** la courbe de tendance du point 3R en NG Accélération



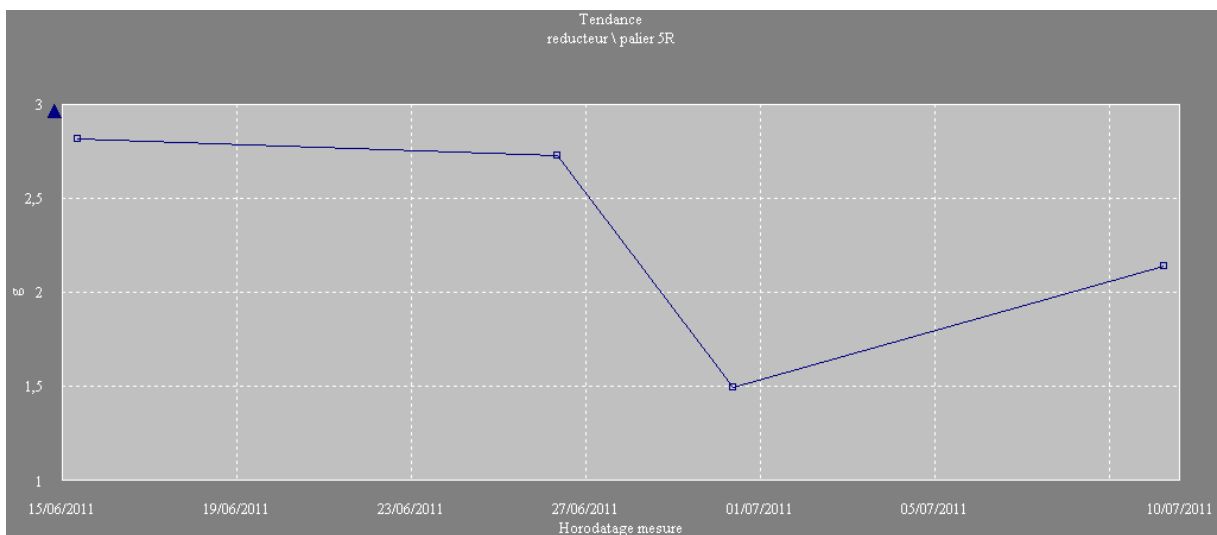
**Figure V.15 :** la courbe de tendance du point 3A en NG Accélération



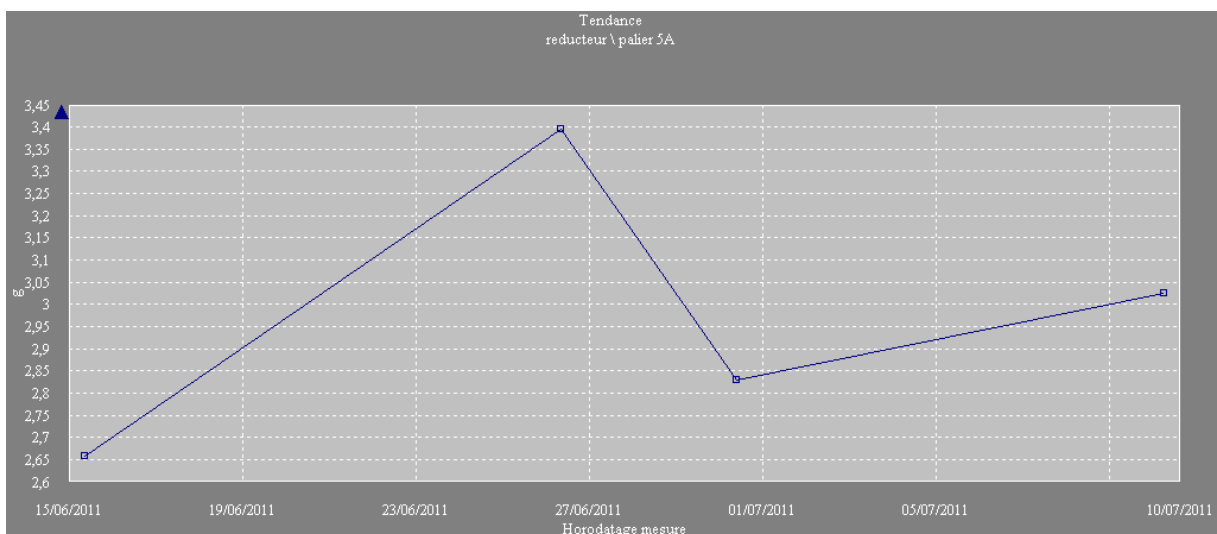
**Figure V.16 :** la courbe de tendance du point 4R en NG Accélération



**Figure V.17** : la courbe de tendance du point 4A en NG Accélération



**Figure V.18** : la courbe de tendance du point 5R en NG Accélération



**Figure V.19** : la courbe de tendance du point 5A en NG Accélération

Les courbes de tendances montrent clairement l'évolution des niveaux vibratoires, qui est non-significative, et plus nettement la différence entre les vibrations radiales et axiales de la deuxième mesure.

La surveillance par niveau globale quantifie l'état général du réducteur. Les vibrations sont importantes, mais la raison est masquée, parce que ce suivi ne cherche pas le phénomène excitateur c'est-à-dire la source de ces vibrations. Par contre on peut la mettre en évidence par l'analyse spectrale.

### V.3.2.2 L'analyse spectrale des mesures effectuées aux points 2, 3,4 et 5

Les figures suivantes (de la Figure V.20 à la Figure V.27) représentent les mesures aux paliers qui portent le redacteur dans les position radiales(verticales) et axiales, sur une plage de fréquences de [0-10000Hz].Les spectres sont représentés en cascade qui est une présentation en trois dimension (temps, fréquences, amplitudes).

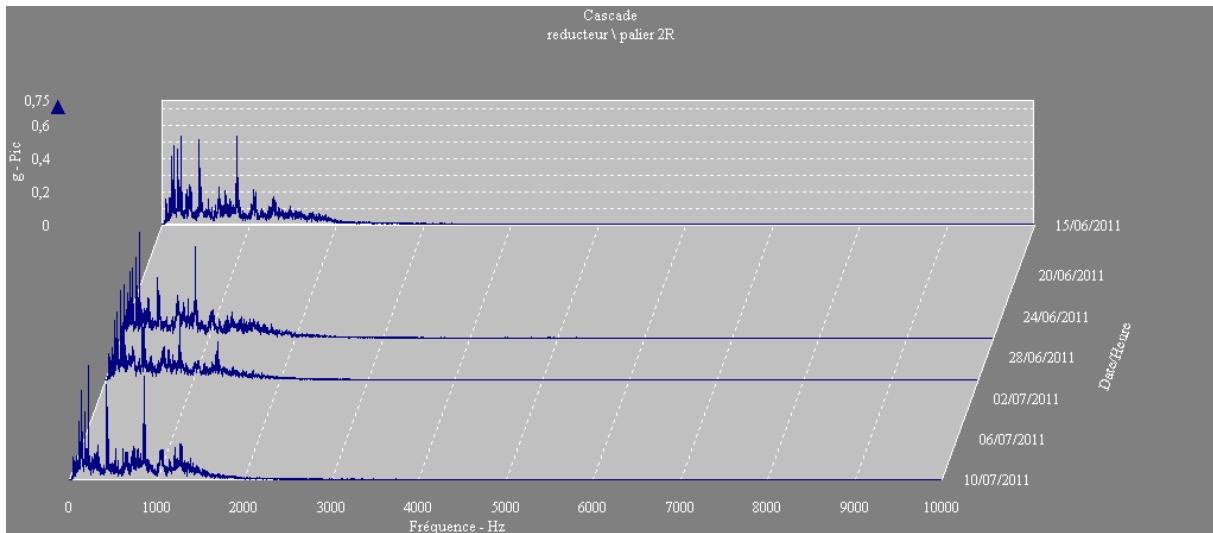


Figure V.20 : les spectres du point 2R en cascade

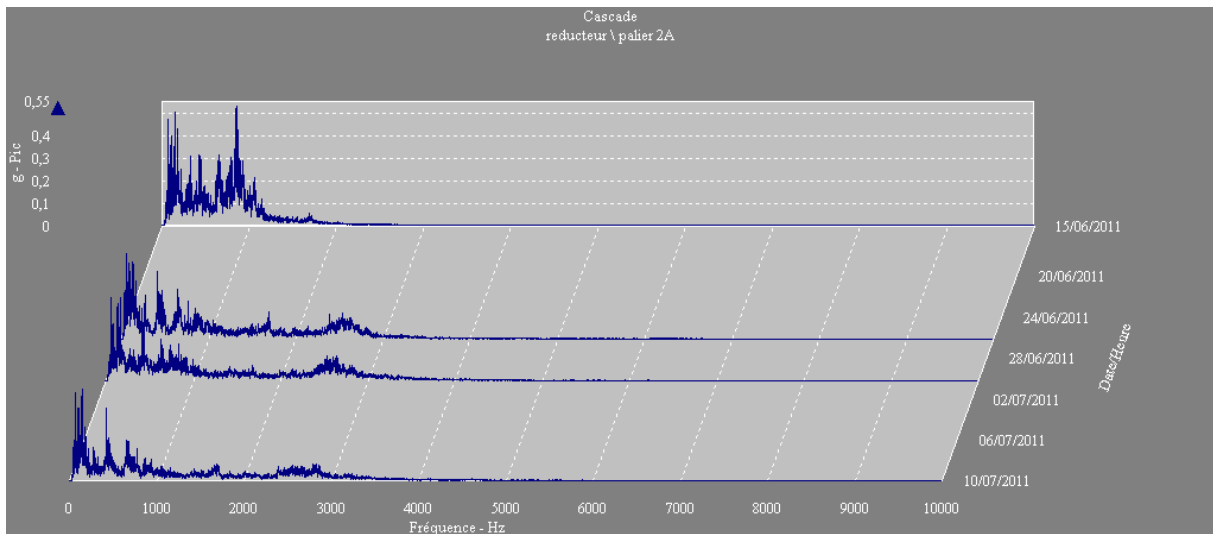


Figure V.21 : les spectres du point 2A en cascade

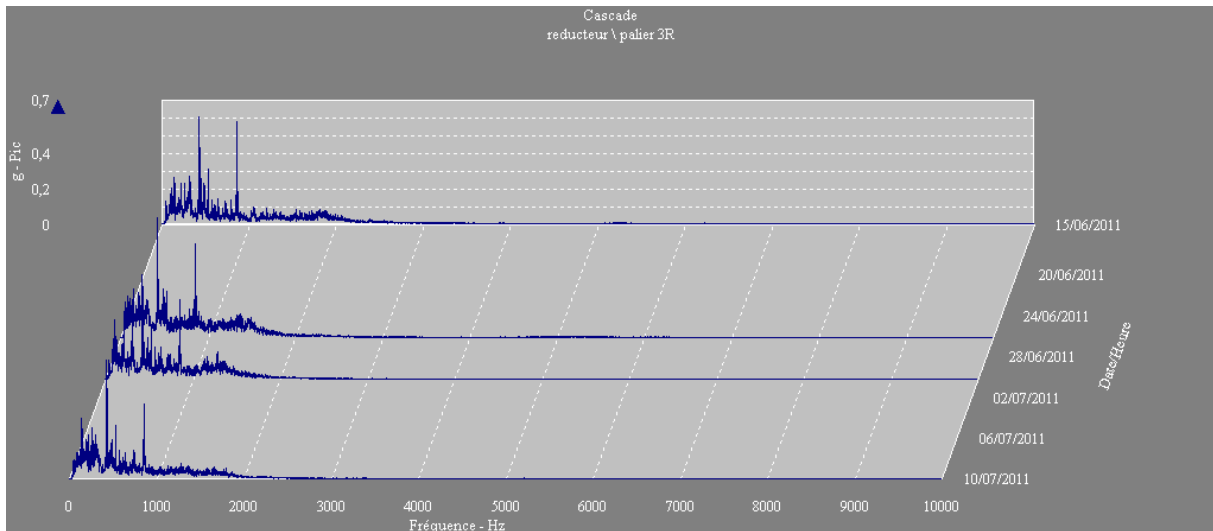


Figure V.22 : les spectres du point 3R en cascade

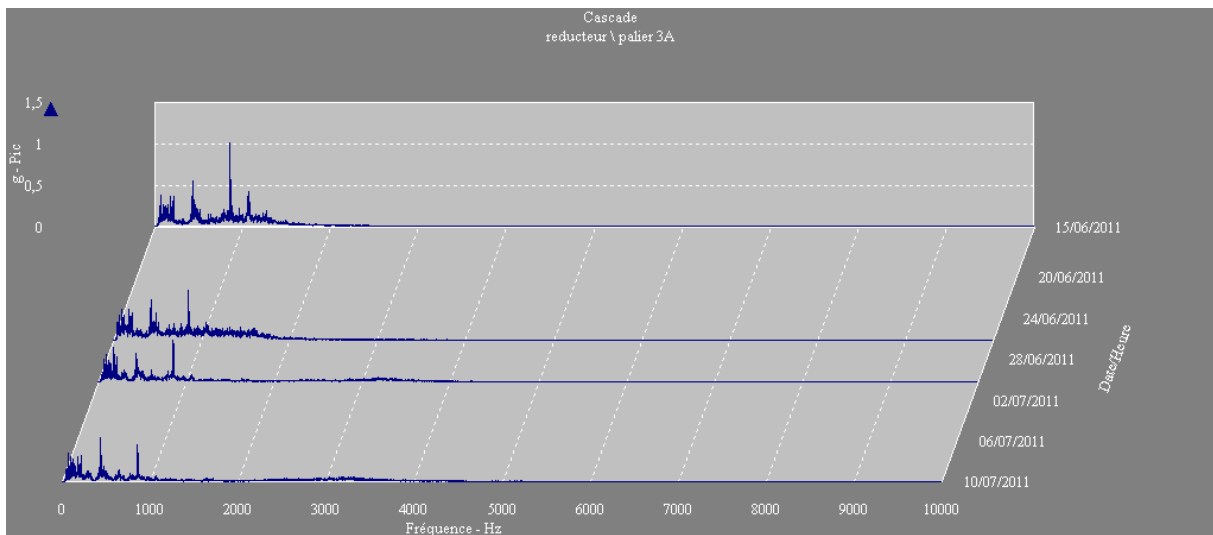


Figure V.23 : les spectres du point 3A en cascade

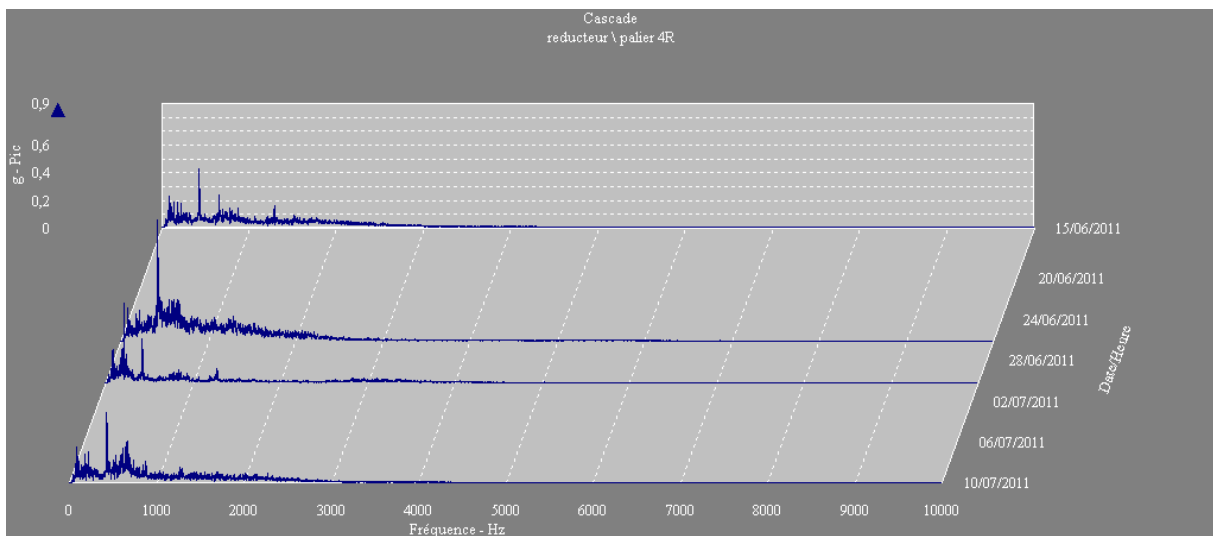


Figure V.24 : les spectres du point 4R en cascade

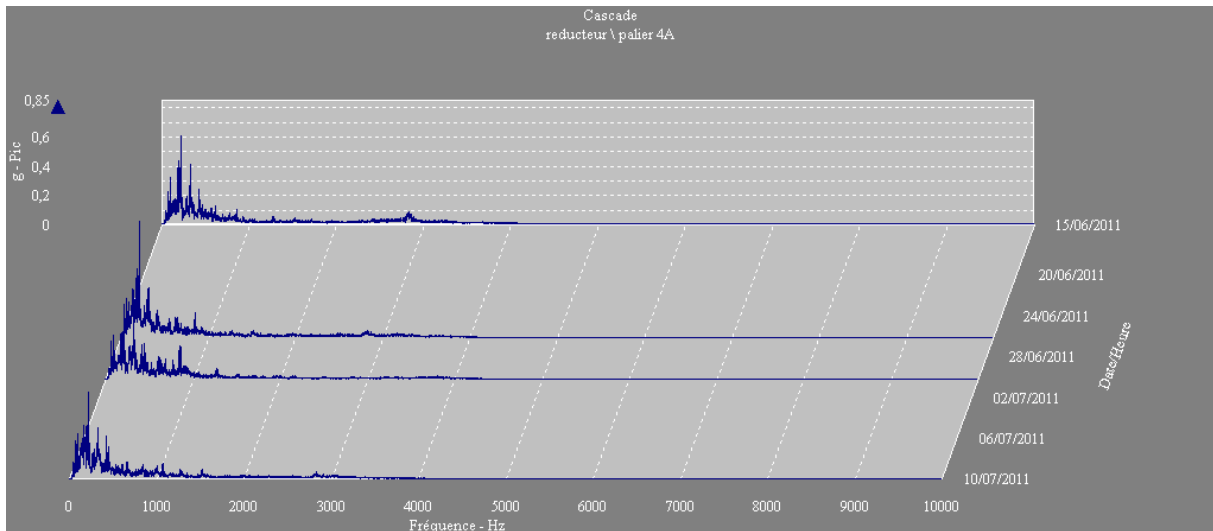


Figure V.25 : les spectres du point 4A en cascade

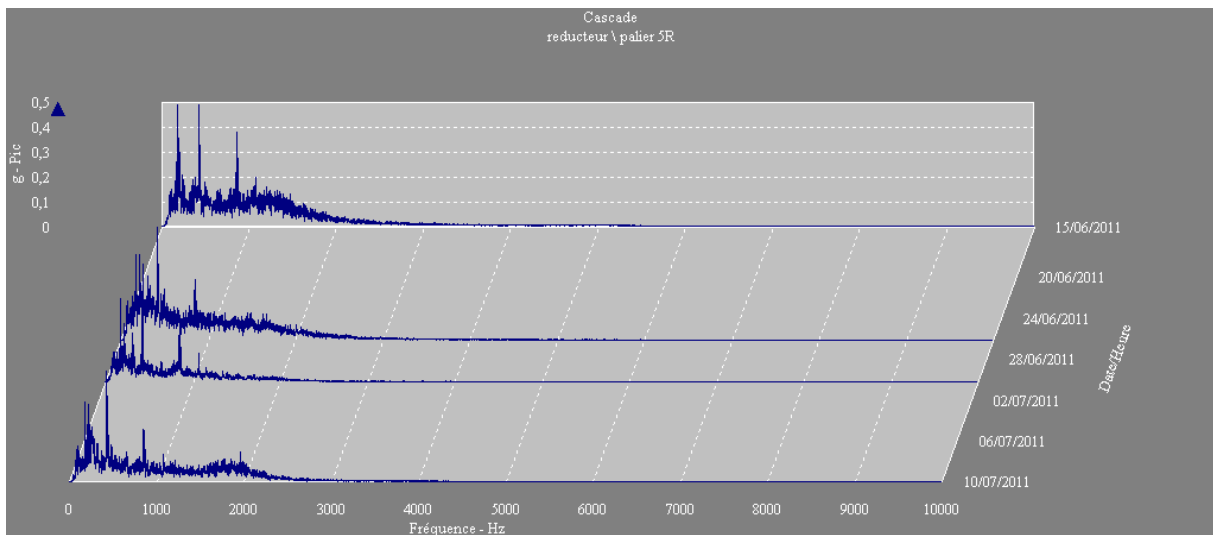


Figure V.26 : les spectres du point 5R en cascade

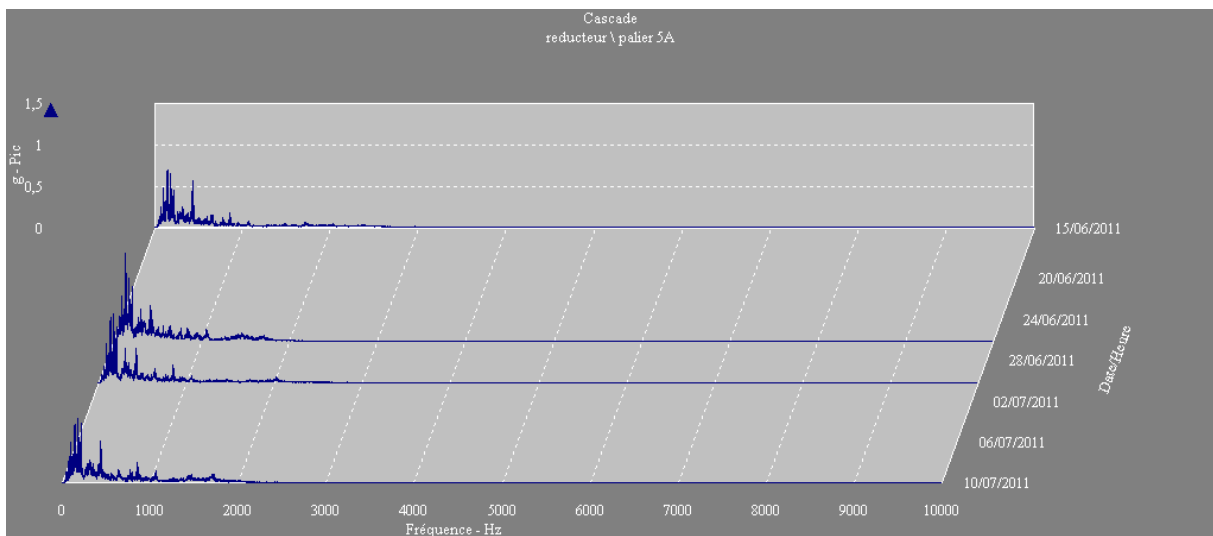


Figure V.27 : les spectres du point 5A en cascade



Les spectres ont été représentés sous échelle linéaire en unité physique, cette représentation met en évidence les raies d'amplitude prépondérantes

Nous voyons clairement que pour les amplitudes dans la plage [3000Hz -10000Hz] des mesures tendent vers zéro, ce qui néglige quelques défauts qui se manifestent aux hautes fréquences (défauts de roulements, défauts d'engrenages).

### V.3.2.2.1 Indicateur d'après la fréquence d'engrènement Fe, avec ses harmoniques

Pour détecter les défauts d'engrenages on va suivre la fréquence d'engrènement « Fe », et ces harmoniques, les spectres zoomés autour la fréquence d'engrènement sont représentés dans les figures qui suivent :

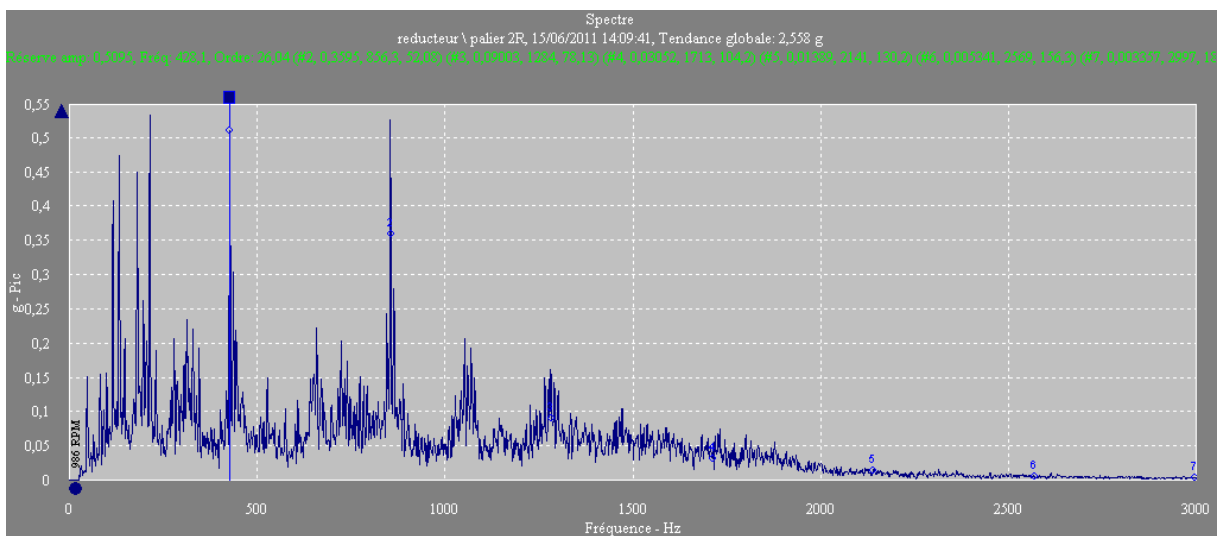


Figure V.28 : spectre du point 2R après un zoom (le 15/06/2011)

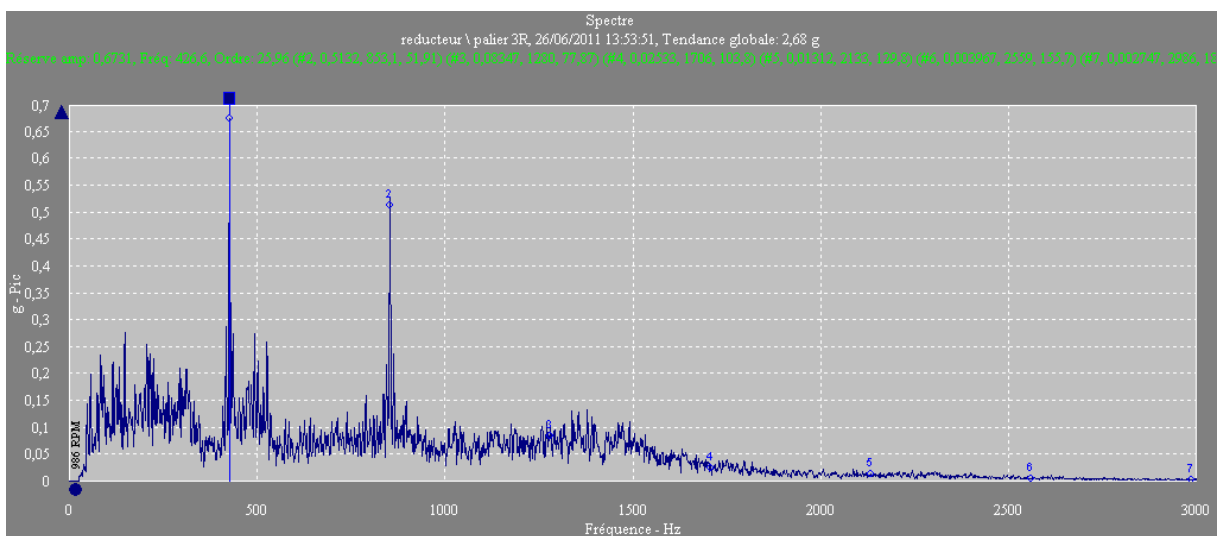


Figure V.29 : spectre du point 3R après un zoom (le 26/06/2011)

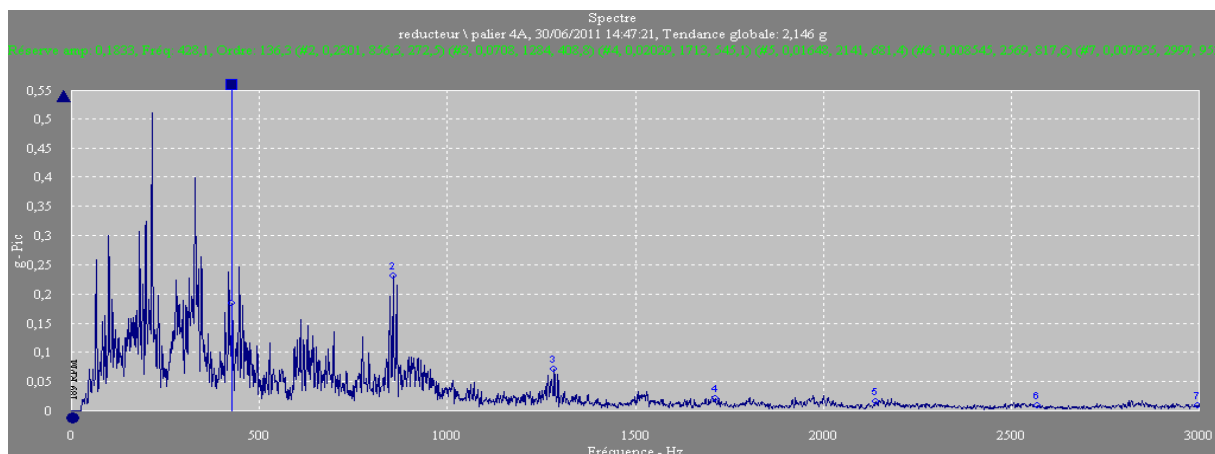


Figure V.30 : spectre du point 4A après un zoom (le 30/06/2011)

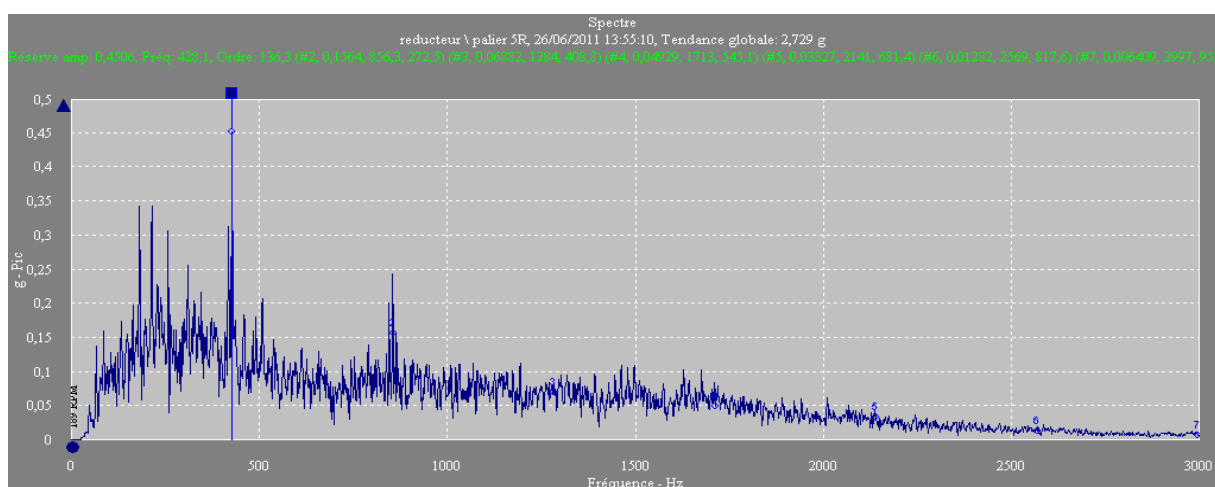


Figure V.31 : spectre du point 5R après un zoom (le 26/06/2011)

Les spectres ci-dessus sont des exemples qui montrent l’image vibratoire d’un engrenage sain l’amplitude à la fréquence d’engrènement est toujours supérieure à ses harmoniques. Les tableaux ci-dessous confirment cette observation en donnant toutes les amplitudes des fréquences d’engrènement et ses harmoniques durant notre suivi.

Fréquences	Amplitudes (mg) Palier 02							
	Radiale				Axiale			
	La date de la mesure							
	15/06	26/06	30/06	10/07	15/06	26/06.	30/06	10/07
Fe	509.50	461.80	374.60	671.90	309.20	300.90	319.70	321.80
2xFe	359.50	432.10	289.00	620.30	171.80	151.40	63.48	27.70
3xFe	90.03	104.70	116.60	199.30	90.10	110.10	42.57	18.31

Tableau V.7 : les amplitudes prépondérantes à la fréquence d’engrènements et ces harmoniques pour le palier 02

		Amplitudes (mg) Palier 03							
		Radiale				Axiale			
Fréquences	La date de la mesure								
	15/06	26/06	30/06	10/07	15/06	26/06	30/06	10/07	
Fe	600.10	673.10	588.10	666.50	539.10	484.30	490.10	531.60	
2xFe	372.70	513.20	445.10	420.50	439.30	413.50	402.70	437.90	
3xFe	54.48	83.47	129.60	85.30	72.30	77.67	37.54	20.29	

**Tableau V.8** : les amplitudes prépondérantes à la fréquence d'engrètements et ces harmoniques pour le palier 03

		Amplitudes (mg) Palier 04							
		Radiale				Axiale			
Fréquences	La date de la mesure								
	15/06	26/06	30/06	10/07	15/06	26/06.	30/06	10/07	
Fe	416.60	862.10	315.40	507.50	237.60	281.30	381.30	295.40	
2xFe	68.06	109.70	164.55	101.58	72.94	137.20	130.10	93.08	
3xFe	44.40	65.92	100.40	98.42	28.23	70.80	70.80	22.13	

**Tableau V.9** : les amplitudes prépondérantes à la fréquence d'engrètements et ces harmoniques pour le palier 04

		Amplitudes (mg) Palier 05							
		Radiale				Axiale			
Fréquences	La date de la mesure								
	15/06	26/06	30/06	10/07	15/06	26/06.	30/06	10/07	
Fe	486.00	450.60	353.10	442.50	479.00	268.30	407.10	461.40	
2xFe	232.10	156.40	262.90	205.70	99.10	93.84	215.50	243.40	
3xFe	79.04	68.82	21.36	43.95	11.60	32.20	25.03	42.73	

**Tableau V.10** : les amplitudes prépondérantes à la fréquence d'engrètements et ces harmoniques pour le palier 05

Avec :  $1g=9.81 \text{ m/s}^2$

D'après ces tableaux, on remarque que les amplitudes sont plus ou moins stables durant tout le suivi. C'est-à-dire qu'on n'a pas une grande différence entre les amplitudes suivies.

Même sur une machine en bon état, on obtient ces images. Seule l'augmentation des amplitudes des raies décrites ci-dessus permet de diagnostiquer une dégradation de l'engrènement.

On peut néanmoins vérifier deux règles toujours :

- ✓ Si les amplitudes du peigne de raies ne dépassent pas celle de la fréquence centrale (Fe), l'engrènement peut être considéré comme en bon état ;
- ✓ un zoom présentant une image dissymétrique des modulations autour de la fréquence centrale est caractéristique d'un engrènement dégradé.

Ces deux hypothèses sont vérifiées sur notre engrènement, de ce fait on peut considérer que l'engrènement est sain.

### V.3.2.2.2 Indicateur d'après la fréquence de rotation $F_r$ , avec ses harmoniques

Aux paliers 2 et 3 on a remarqué un phénomène qui fait apparaître les harmoniques de la fréquence fondamentale ( $F_r=16,46\text{Hz}$ ) à une plage de fréquences très étendue. La représentation des spectres ci-dessous se fait suivant plusieurs échelles, dont le choix détermine la lisibilité de ce dernier.

Ces figures (de la figure V.23 à la figure V.35) représentent un zoom des spectres relevés sur les paliers 2 et 3 suivant les deux directions : radiale et axiale.

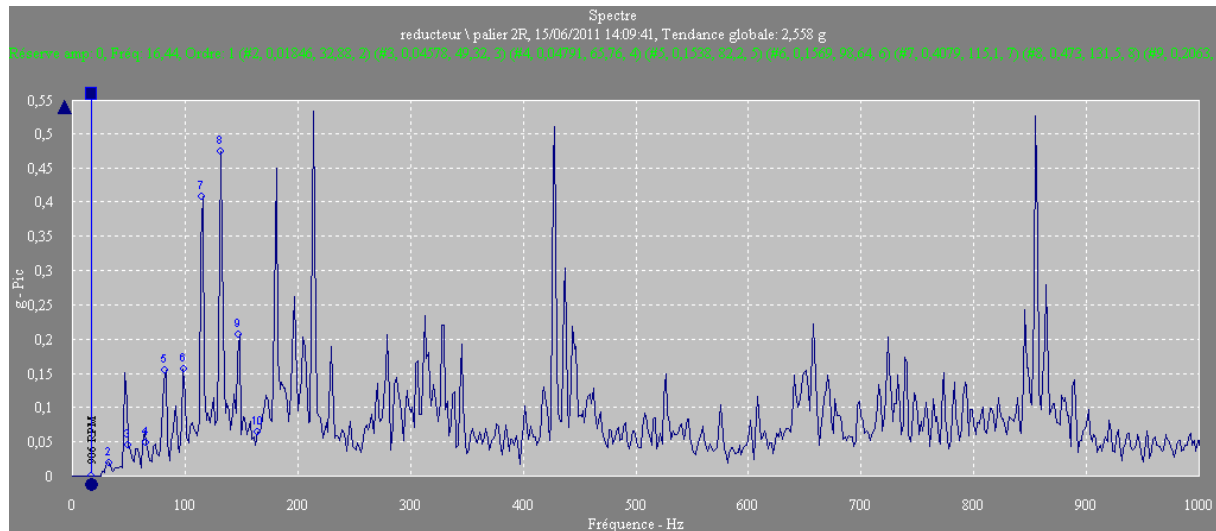


Figure V.32 : spectre du point 2R après un zoom (le 15/06/2011)

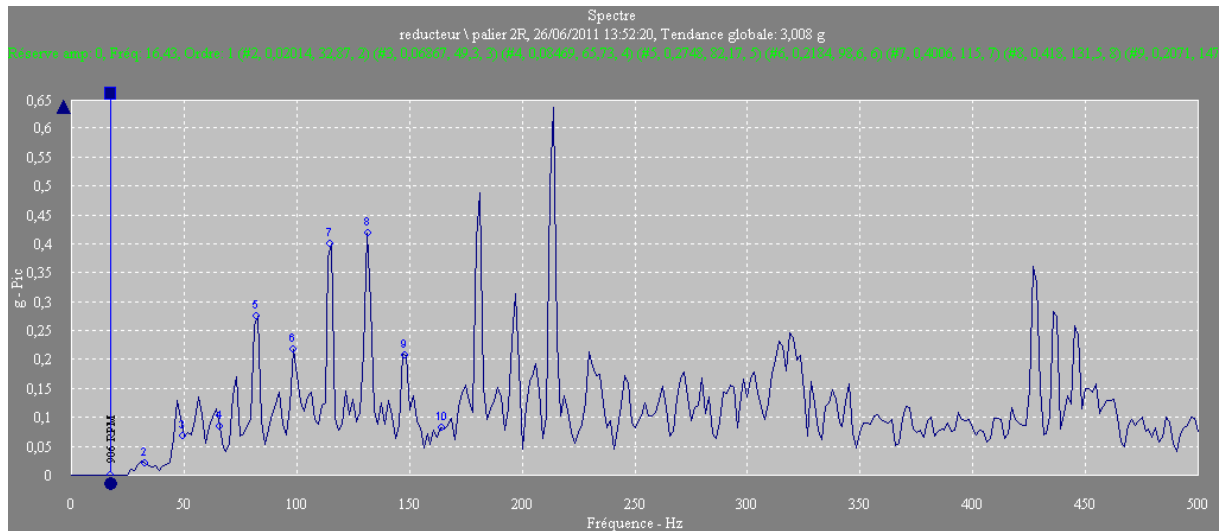


Figure V.32 : spectre du point 2R après un zoom (le 26/06/2011)

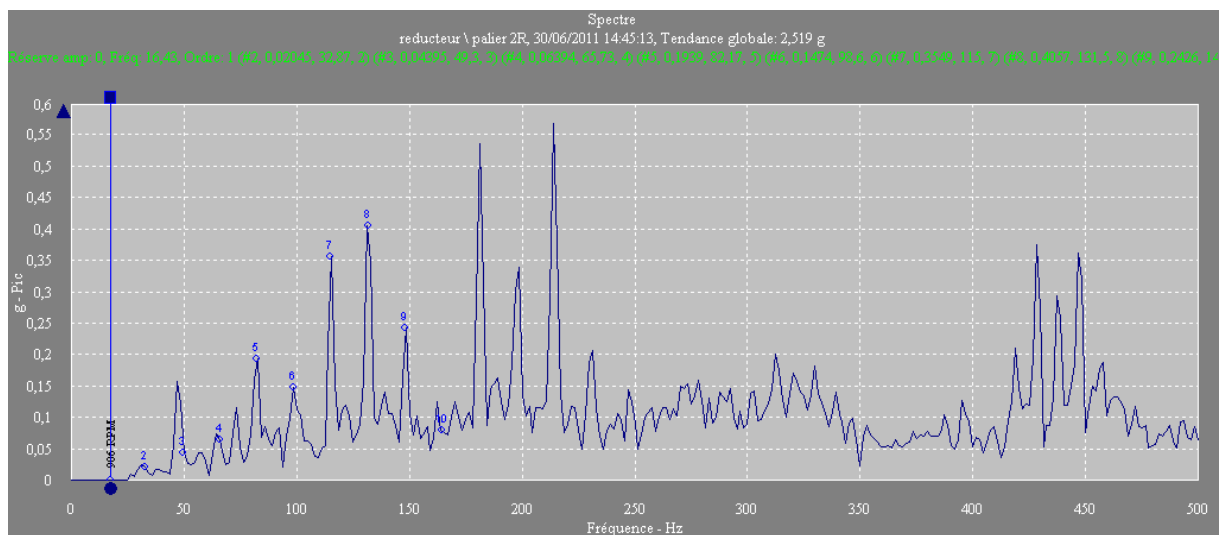


Figure V.33 : spectre du point 2R après un zoom (le 30/06/2011)

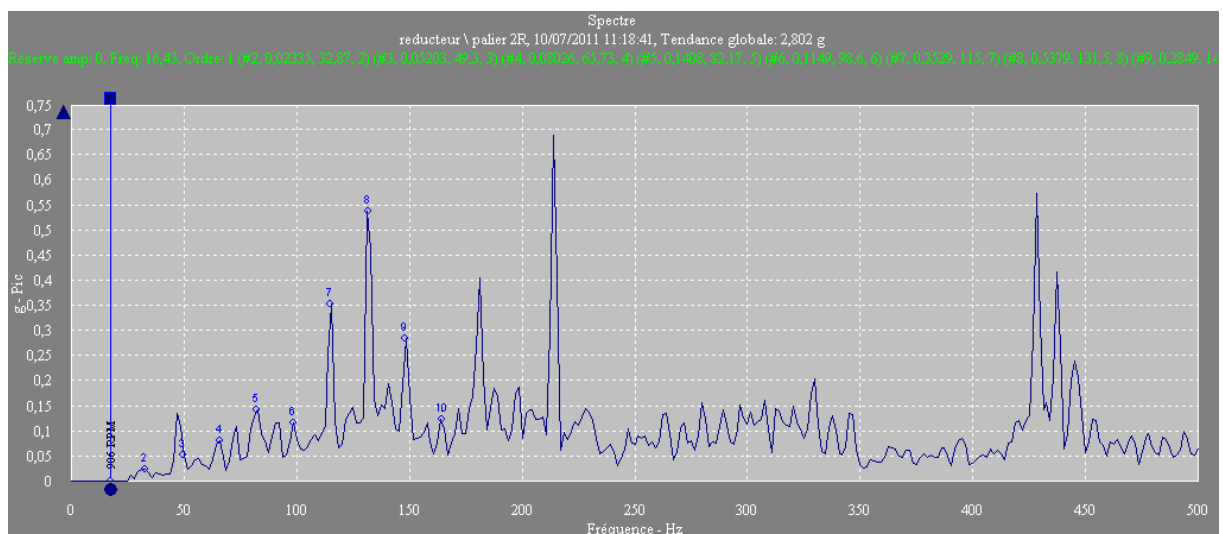


Figure V.34 : spectre du point 2R après un zoom (le 10/07/2011)

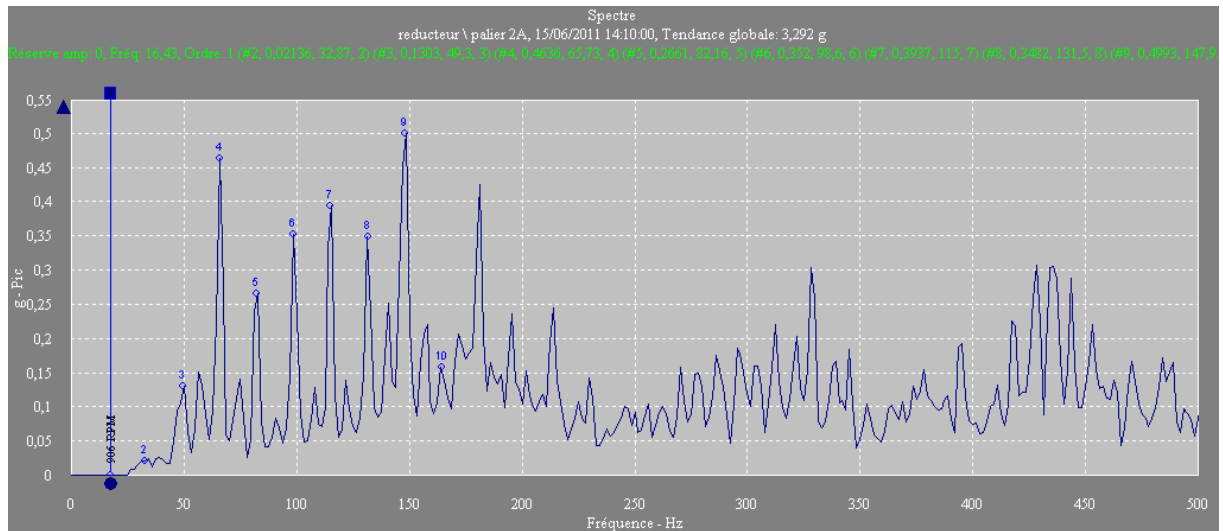


Figure V.35 : spectre du point 2A après un zoom (le 15/06/2011)

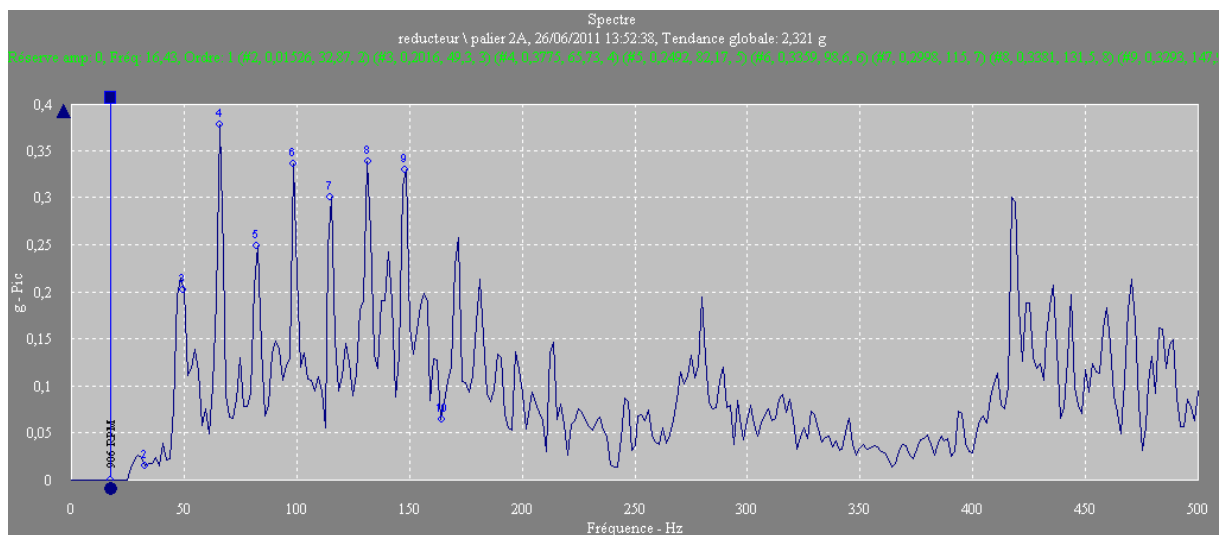


Figure V.36 : spectre du point 2A après un zoom (le 26/06/2011)

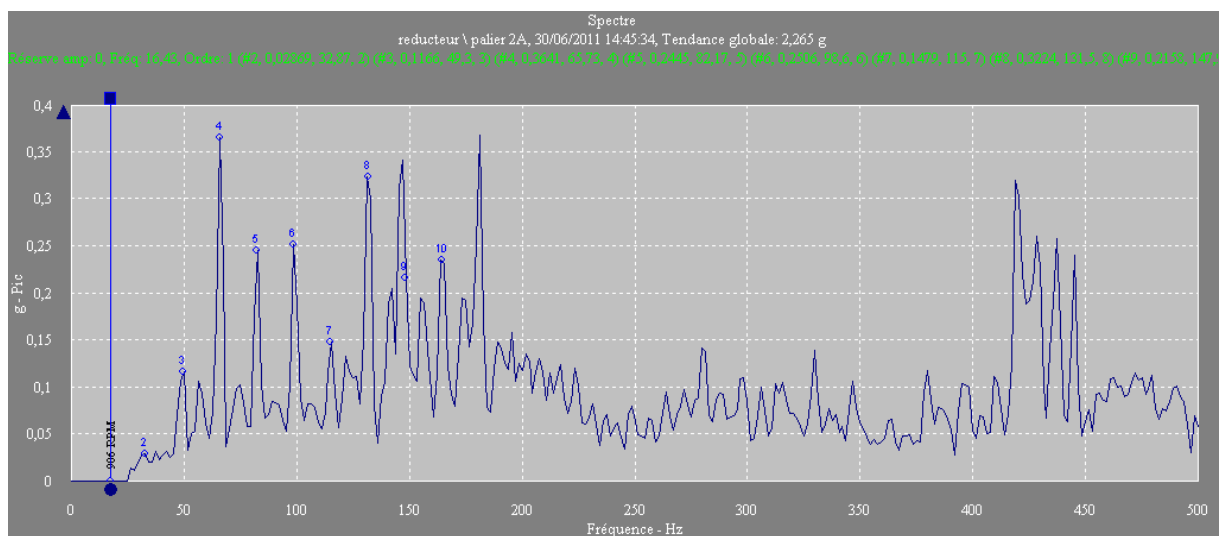


Figure V.37 : spectre du point 2A après un zoom (le 30/06/2011)

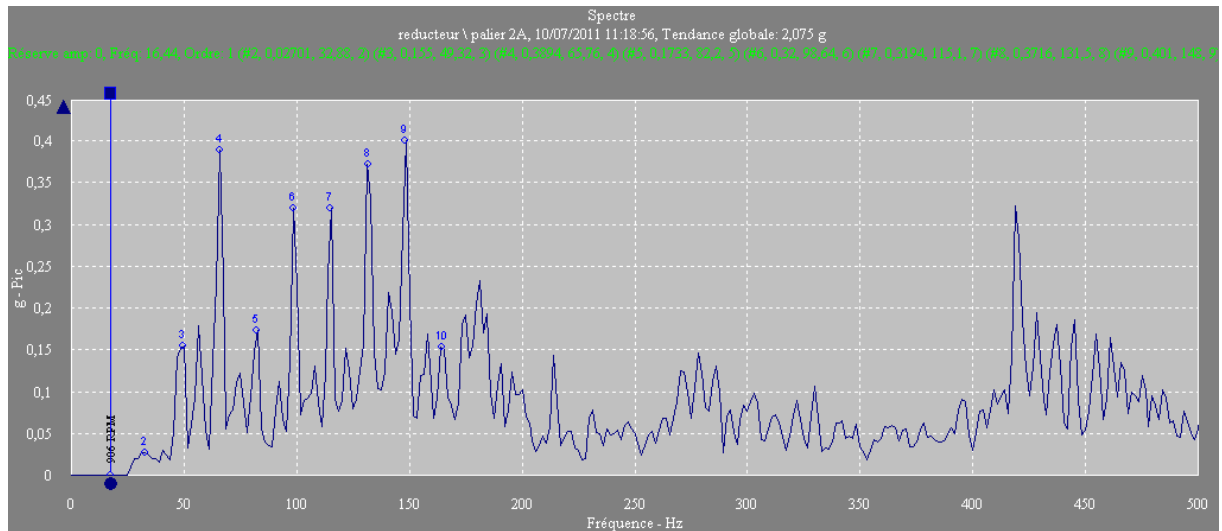


Figure V.38 : spectre du point 2A après un zoom (le 10/07/2011)

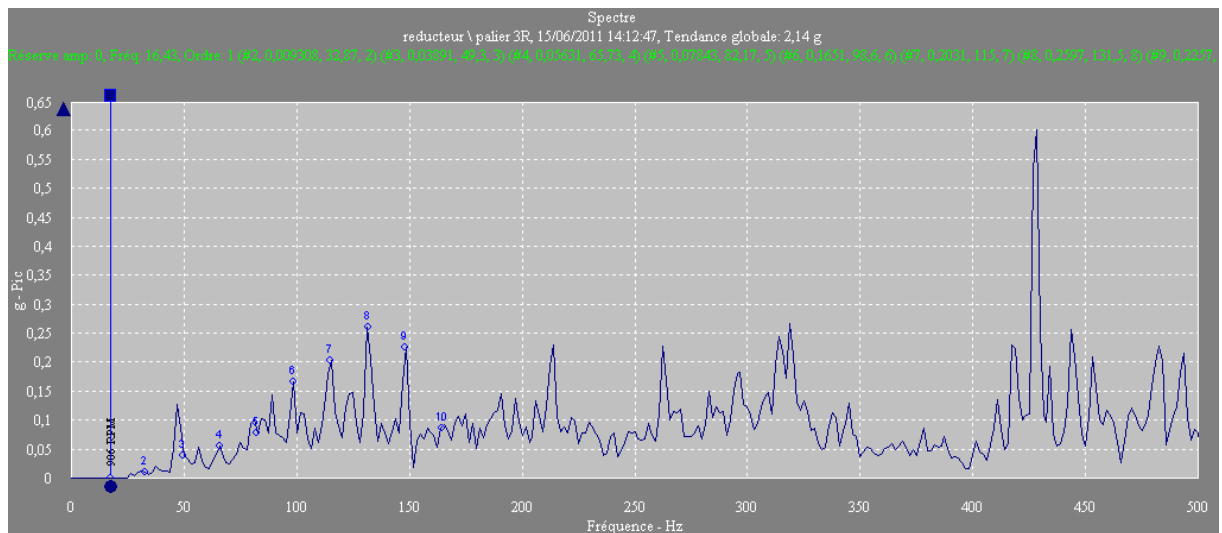


Figure V.39 : spectre du point 3R après un zoom (le 15/06/2011)

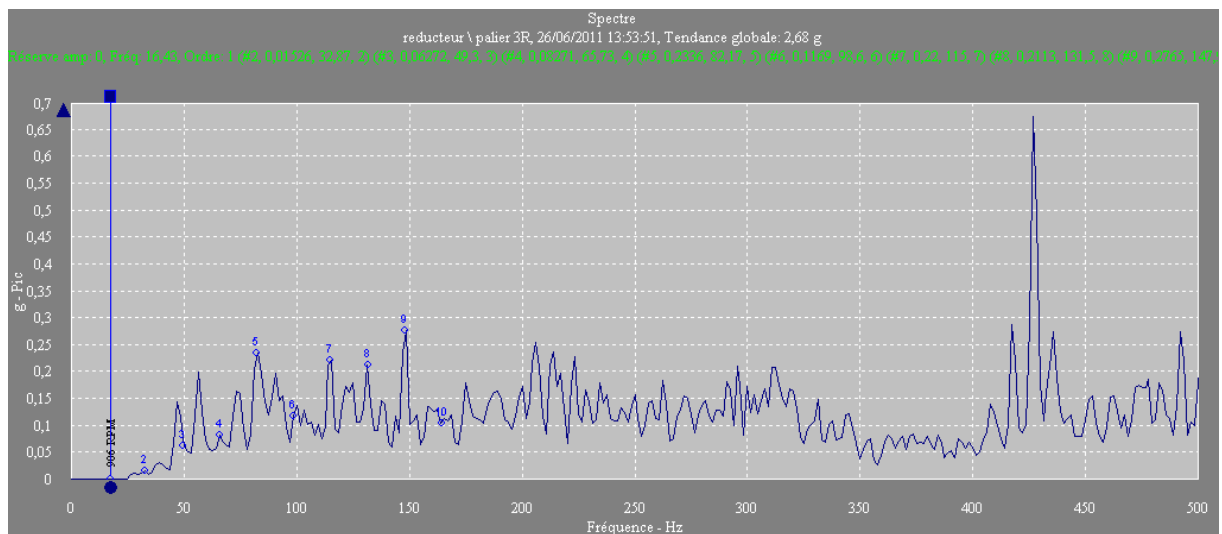


Figure V.40 : spectre du point 3R après un zoom (le 26/06/2011)

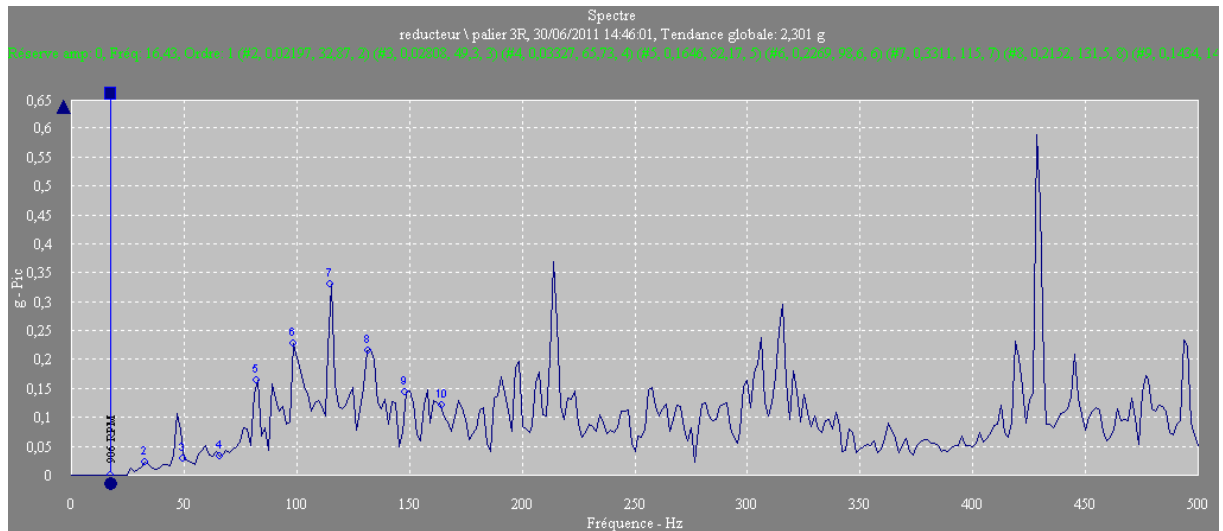


Figure V.41 : spectre du point 3R après un zoom (le 30/06/2011)

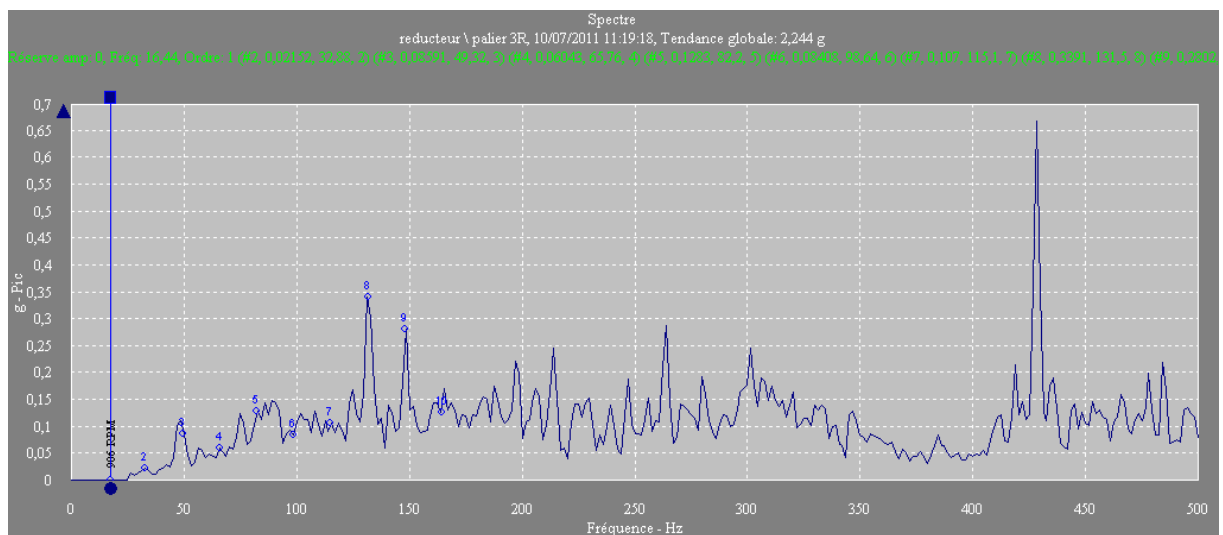


Figure V.42 : spectre du point 3R après un zoom (le 10/07/2011)

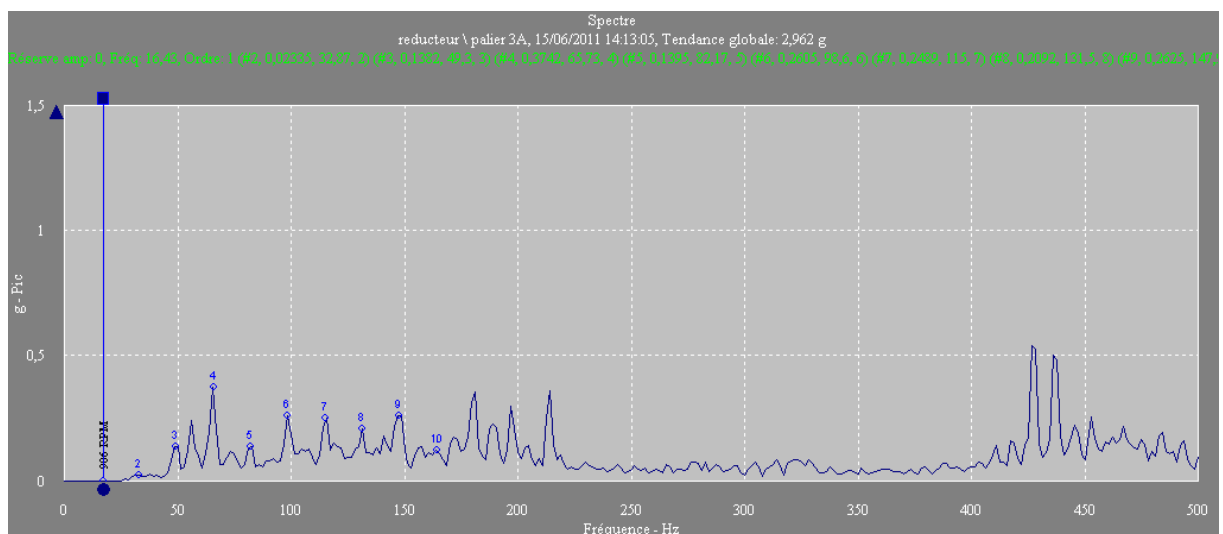


Figure V.43 : spectre du point 3A après un zoom (le 15/06/2011)



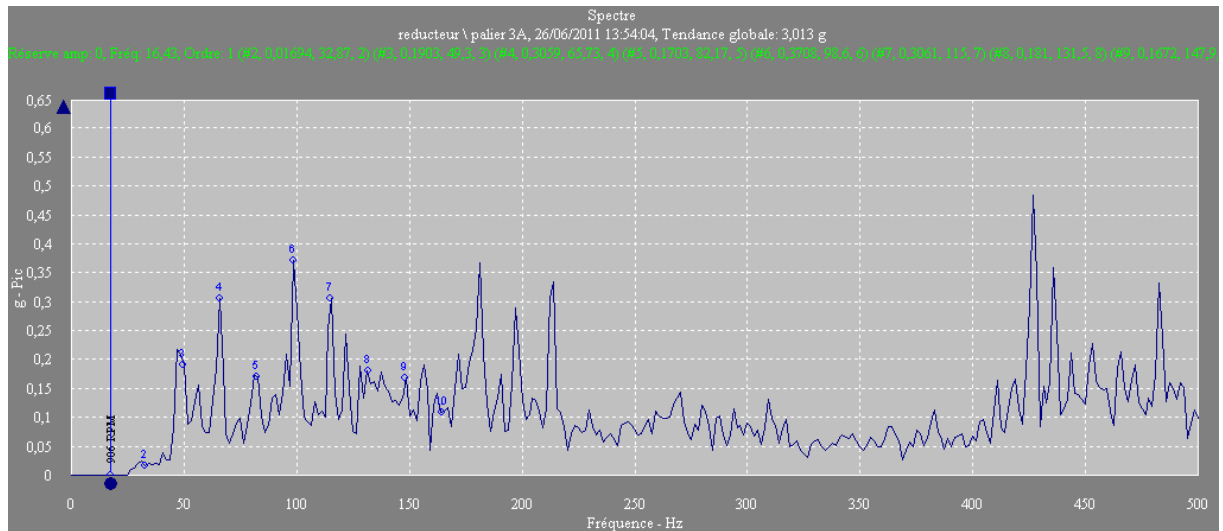


Figure V.44 : spectre du point 3A après un zoom (le 26/06/2011)

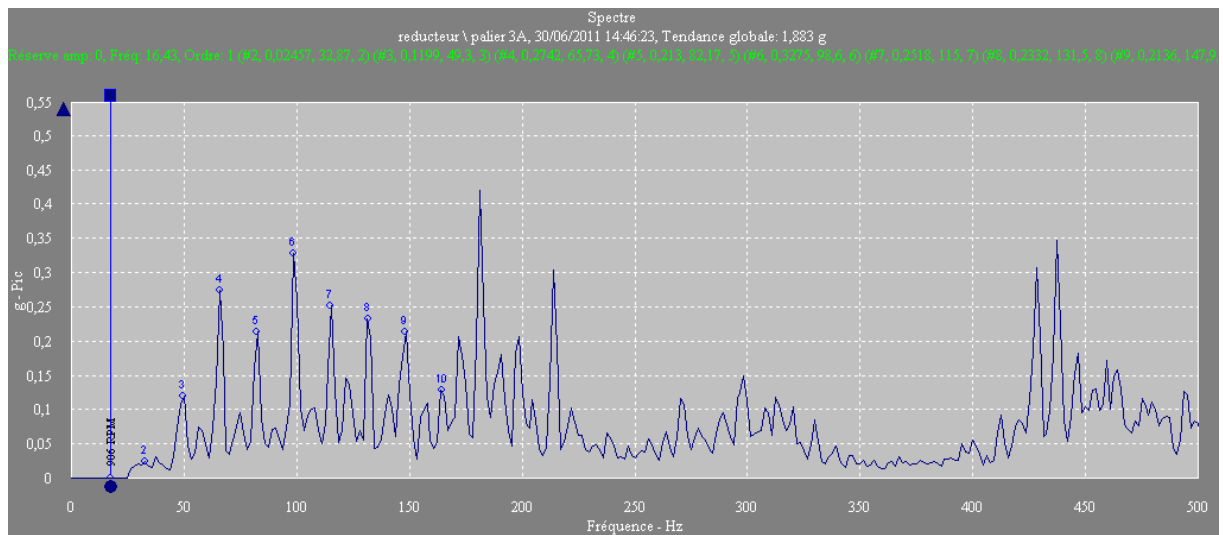


Figure V.45 : spectre du point 3A après un zoom (le 30/06/2011)

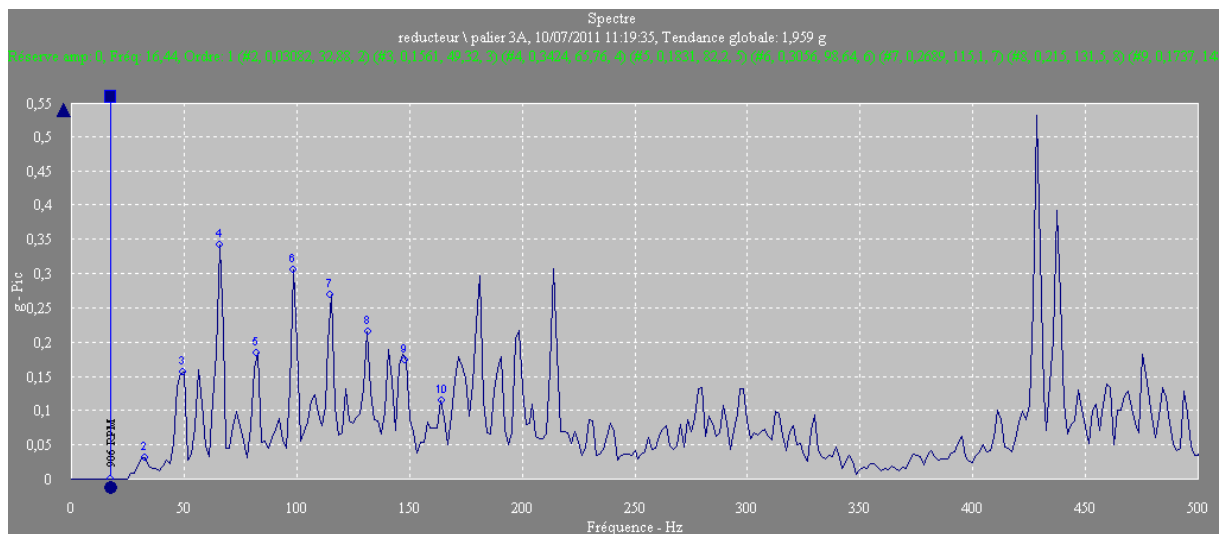


Figure V.46 : spectre du point 3A après un zoom (le 10/07/2011)

La fréquence de rotation est difficilement visible. Les harmoniques sont par contre très apparents. Ceux sont des peignes de raies d'un pas de  $(1/2) Fr$  et  $Fr$ , ces symptômes peuvent être la manifestation spectrale des phénomènes suivants : un frottement, un desserrage, une fissuration ou un jeu important, qu'ils font apparaître les harmoniques de la fréquence de rotation, sur une gamme très étendue de fréquences et pas seulement jusqu'au 4<sup>e</sup> ordre, contrairement au défaut d'alignement.

Le tableau ci-dessous résume la position de l'amplitude prépondérante suivant les deux directions (radiale et axiale) aux harmoniques de la fréquence de rotation (jusqu'à la neuvième harmoniques), des paliers 2 et 3 pendant le suivi.

Fréquences (Fr= 16,46Hz)	Amplitudes (mg)							
	Radiale				Axiale			
	La date de la mesure							
	15/06	26/06	30/06	10/07	15/06	26/06	30/06	10/07
2xFr	18.46	20.14	20.47	23.35	21.36	15.26	28.69	27.01
3xFr	45.78	68.67	43.95	52.03	130.30	201.60	116.60	155.10
4xFr	47.91	84.69	63.94	80.26	463.60	377.50	364.10	389.40
5xFr	153.80	274.80	193.90	140.80	266.10	249.20	244.50	173.30
6xFr	156.90	218.40	147.40	114.90	352.00	335.90	250.60	320.00
7xFr	407.90	400.60	354.90	352.90	393.70	299.80	147.60	319.40
8xFr	473.00	418.00	405.70	537.90	348.20	338.10	322.40	371.60
9xFr	206.30	207.10	242.26	284.90	499.30	329.30	215.80	401.00

**Tableau V.11** : les amplitudes prépondérantes aux harmoniques de la fréquence de rotation palier 02

Fréquences (Fr= 16,46Hz)	Amplitudes (mg)							
	Radiale				Axiale			
	La date de la mesure							
	15/06	26/06	30/06	10/07	15/06	26/06	30/06	10/07
2xFr	9.31	15.26	21.97	21.52	23.35	16.94	24.57	38.82
3xFr	38.91	62.72	28.08	85.91	138.20	190.30	119.90	156.10
4xFr	56.31	82.71	33.27	60.43	374.20	305.90	274.20	342.40
5xFr	78.43	233.60	164.60	128.30	139.50	170.30	213.00	183.10
6xFr	165.10	116.90	226.90	83.08	260.50	370.80	327.50	305.60
7xFr	203.10	220.00	331.10	107.00	248.90	306.10	251.80	268.90
8xFr	259.70	211.30	215.20	339.10	209.20	181.00	233.20	211.50
9xFr	225.70	276.50	143.40	280.20	262.50	167.20	213.60	173.70

**Tableau V.12** : les amplitudes prépondérantes aux harmoniques de la fréquence de rotation palier 03

Avec :  $1g=9.81 \text{ m/s}^2$

Les deux tableaux précédents montrent clairement que les amplitudes suivies au palier 3 sont plus importantes que les amplitudes du palier 2, ainsi que les amplitudes axiales sont plus élevées que les amplitudes radiales. Donc, on peut diagnostiquer que le défaut est probablement un frottement localisé sur le palier 3, et son image vibratoire est transmise au palier 2.

### V.3.3 Analyse des Résultats expérimentaux (LE VENTILATEUR)

#### V.3.3.1 Analyse en niveau global d'accélération

Le tableau ci-dessous montre les niveaux globaux en accélération pour tous les paliers en direction radiale (horizontale) et axiale.

endroit de la mesure	Niveaux vibratoire en g 26.06.2011	Niveaux vibratoire en g 30.06.2011	Niveaux vibratoire en g 10.07.2011
Palier 1R	0.415	0.433	0.454
Palier 1A	0.494	0.226	0.468
Palier 2R	<b>1.012</b>	<b>0.899</b>	<b>2.026</b>
Palier 2A	<b>3.132</b>	<b>1.362</b>	<b>1.749</b>
Palier 3R	<b>1.517</b>	<b>0.476</b>	<b>1.485</b>
Palier 3A	<b>0.609</b>	<b>0.179</b>	<b>0.678</b>
Palier 4R	1.169	0.316	0.861
Palier 4A	0.746	0.249	0.744

**Tableau V.13** : les niveaux globaux en accélération pour tous les points de mesure durant notre suivi

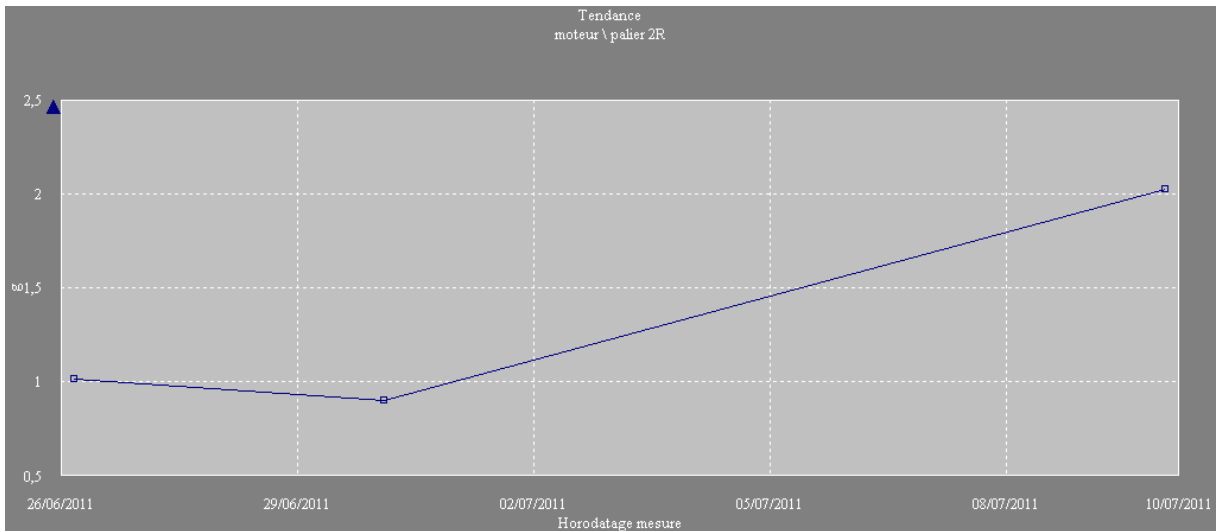
Avec :  $1g=9.81 \text{ m/s}^2$

Le tableau ci-dessus montre les niveaux globaux en accélération (0-10000Hz), qui sont en évolution non-significatives. Les mesures du 30.06.2011 (le jour où le ventilateur était en 20% de la vitesse du moteur qui alimente ce ventilateur) ont des niveaux vibratoires faibles par rapport aux autres mesures.

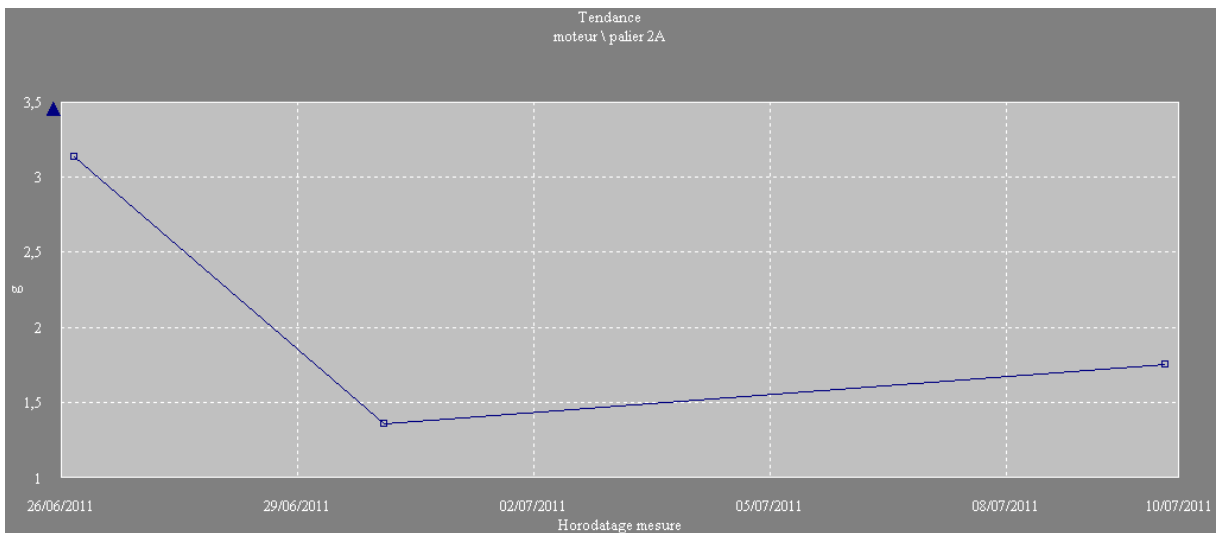
Le niveau vibratoire était important côté poulie moteur et côté poulie turbine. Ça nous amène à concentrer notre travail sur les paliers 2 et 3.

#### V.3.2.1.1 Les courbes de tendance des paliers 2 et 3

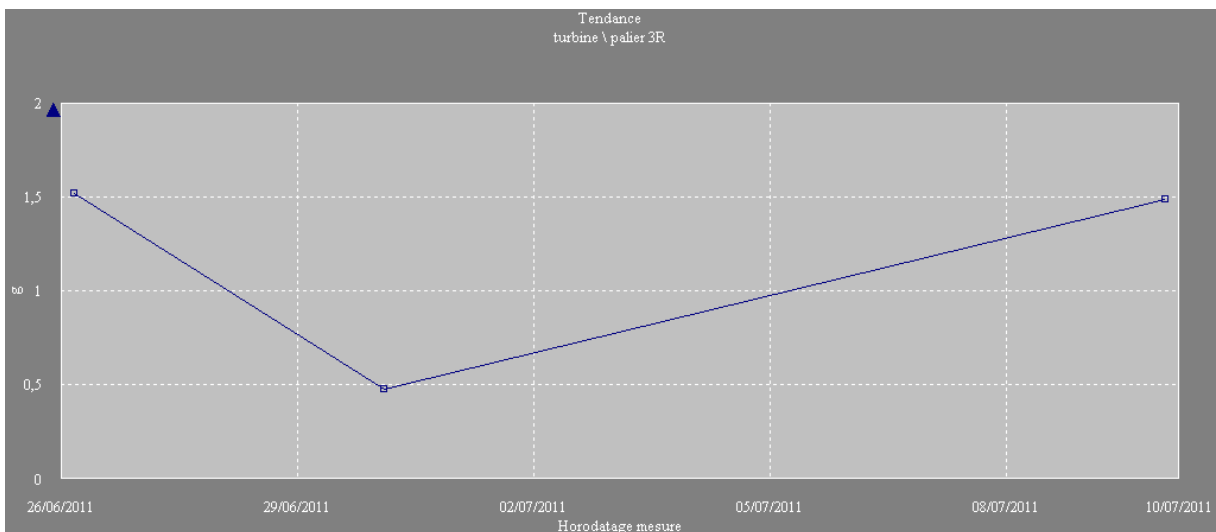
Les figures suivantes (de la figure V.47 à la figure V.50) présentent l'évolution des niveaux vibratoire, des mesure prise sur les paliers 2, 3 du ventilateur pour les deux directions : radiale (R), axiale (A).



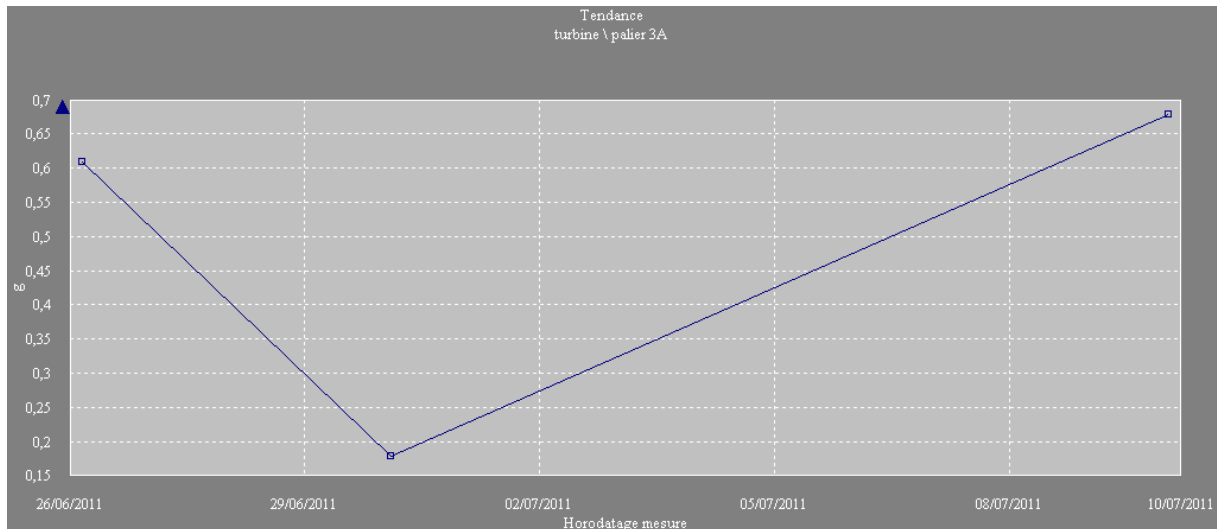
**Figure V.47 :** la courbe de tendance du point 2R en NG Accélération



**Figure V.48 :** la courbe de tendance du point 2A en NG Accélération



**Figure V.49 :** la courbe de tendance du point 3R en NG Accélération

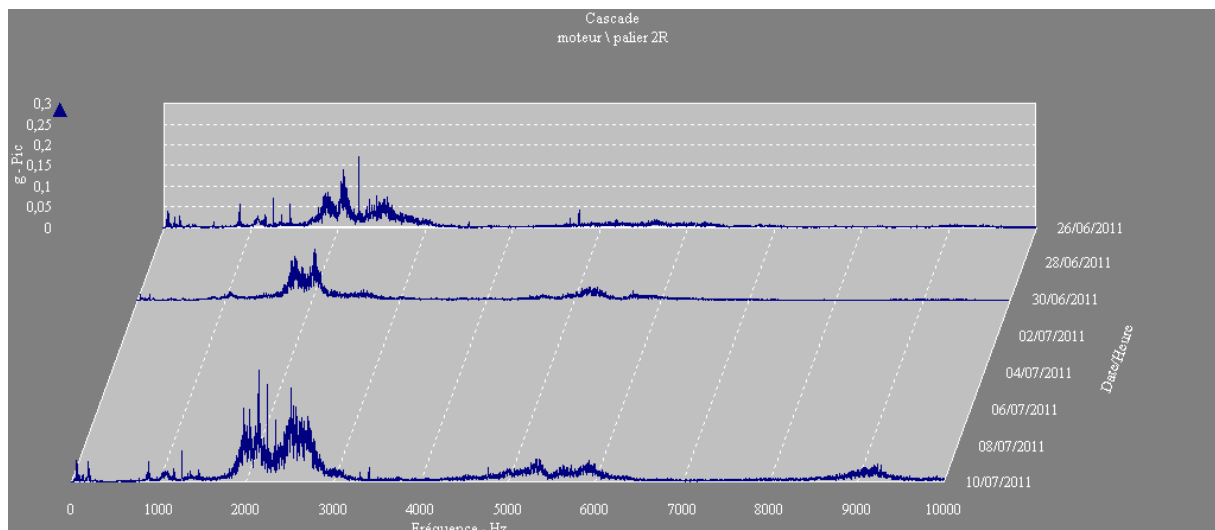


**Figure V.50 :** la courbe de tendance du point 3A en NG Accélération

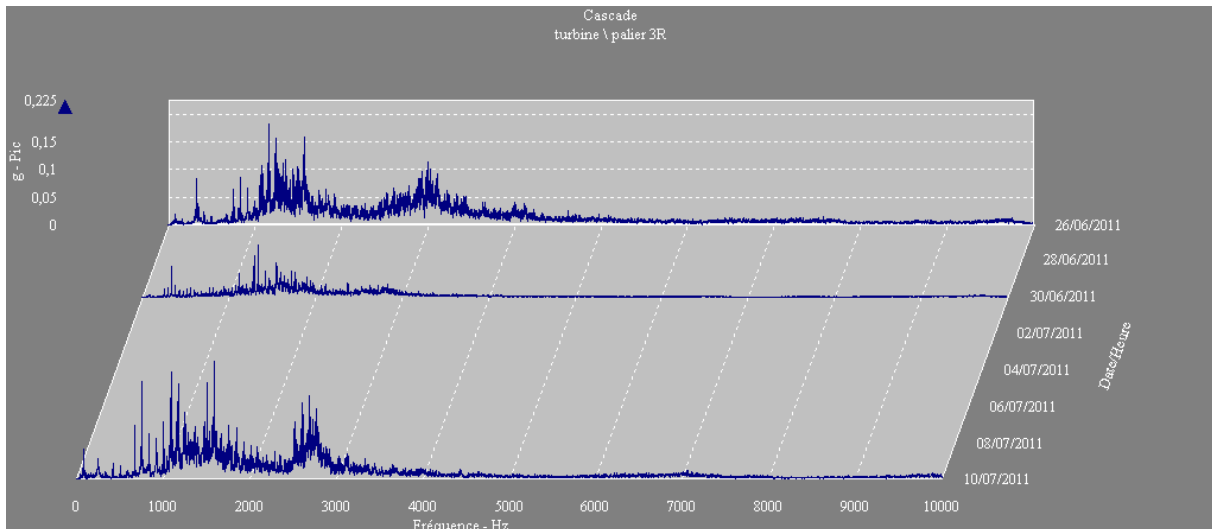
Les courbes de tendances présentent nettement la stabilité des niveaux vibratoires lorsque on ne prend pas en considération la deuxième mesure, les différences entre les niveaux vibratoires radiales et axiales sont très remarquable, ce qui signifie que le phénomène excitateur est engendré par une force radiale donc on va intéresser aux mesures radiales.

### V.3.3.2 L'analyse spectrale des mesures radiales

Les figures suivantes (de la Figure V.51 à la Figure V.52) représentent les mesures aux paliers 2 et 3 dans les positions radiales (verticales), sur une plage de fréquences de [0-10000Hz]. Les spectres sont représentés en cascade qui est une présentation en trois dimension (temps, fréquences, amplitudes)



**Figure V.51 :** les spectres du point 2R en cascade

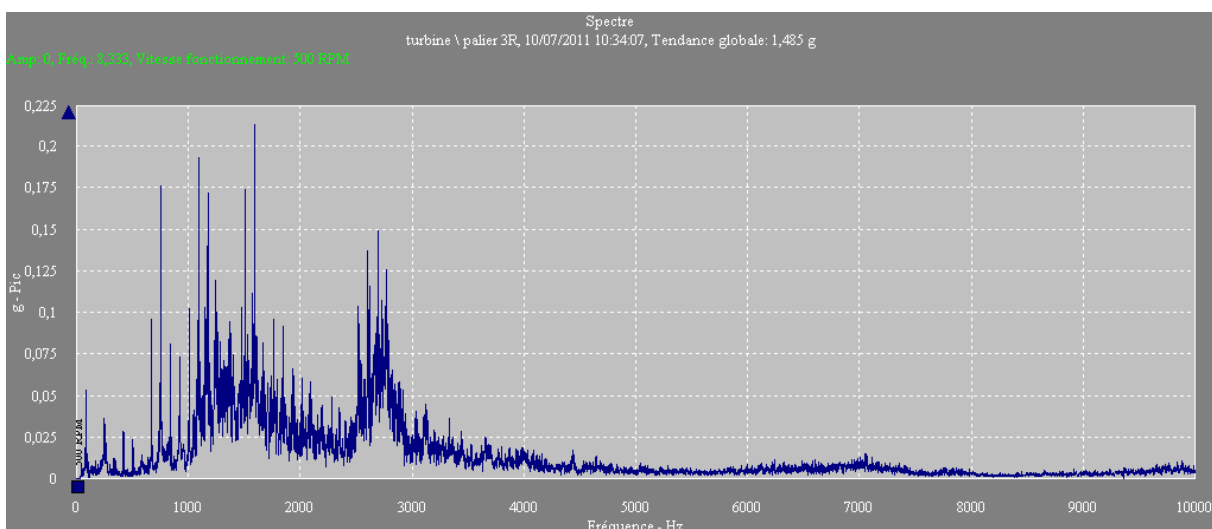


**Figure V.52** : les spectres du point 3R en cascade

On observe que les phénomènes vibratoires sont marqués aux hautes fréquences particulièrement au palier 3 et pendant la dernière mesure, cela signifie que il peut être un défaut de roulement, pour confirmer cette remarque il est souhaitables d'agrandir les spectres par un zoom.

### V.3.3.2.1 Indicateur d'après la fréquence de défaut de roulement

Les figures (de la figure V.53 à la figure V.59) suivantes présentent la mesure radiale du palier 3 durant la dernière mesure. Après plusieurs zooms sur la fréquence de défaut de roulement



**Figure V.53** : spectre du point 3R (le 10/07/2011)

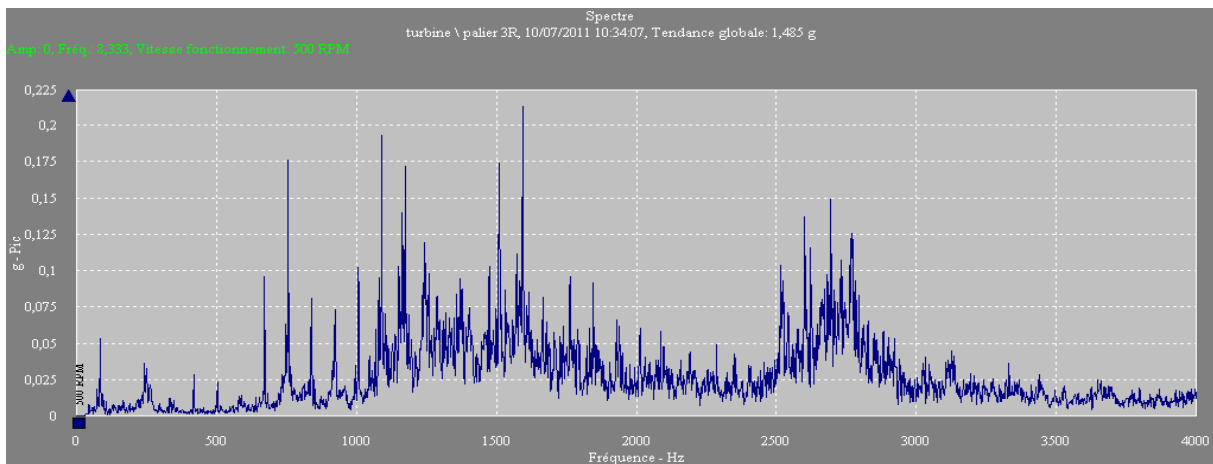


Figure V.54 : spectre du point 3R après un zoom (le 10/07/2011)

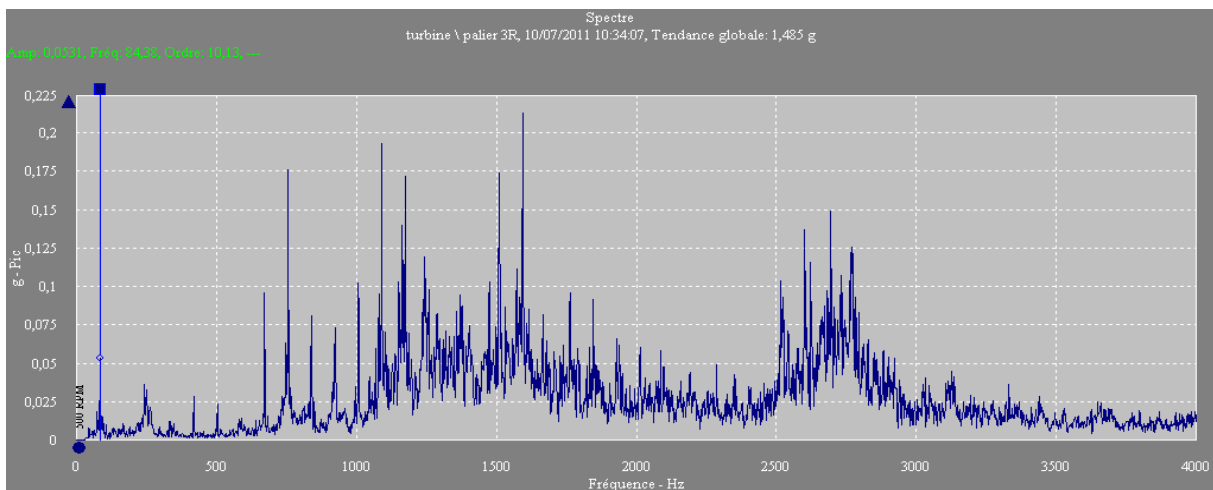


Figure V.55 : spectre du point 3R après un zoom en indiquant la fréquence étudié (le 10/07/2011)

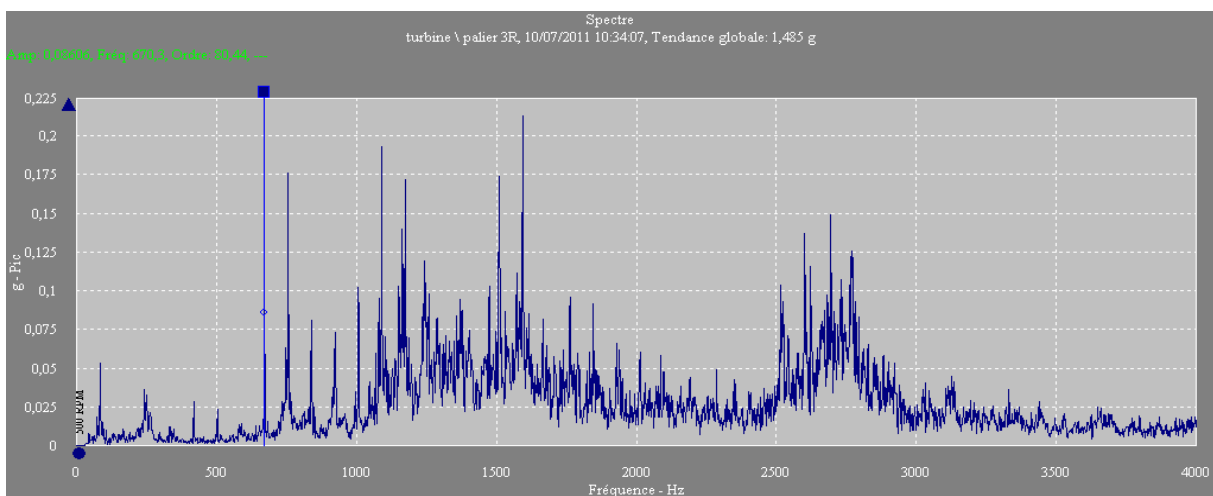
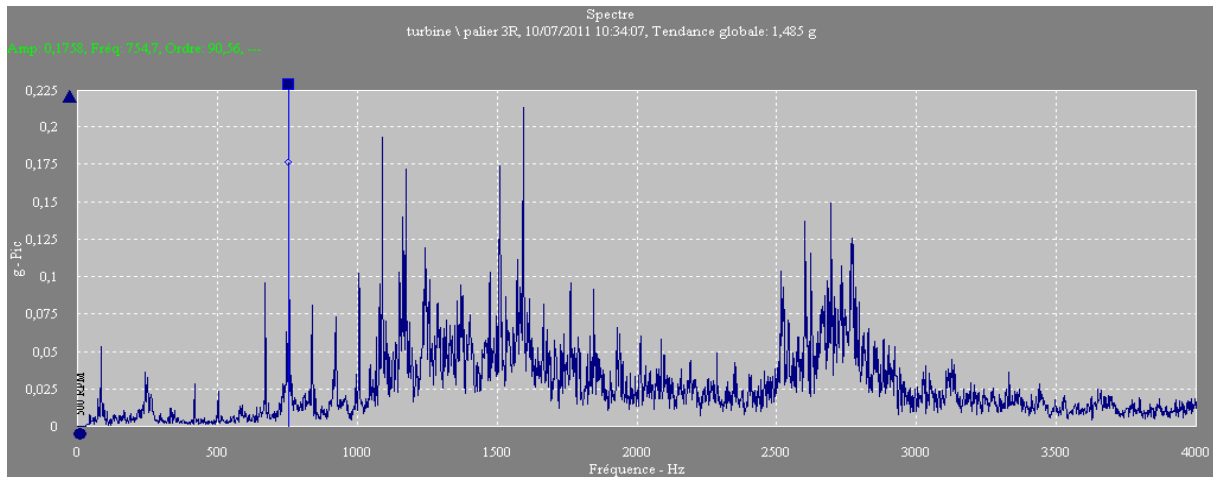
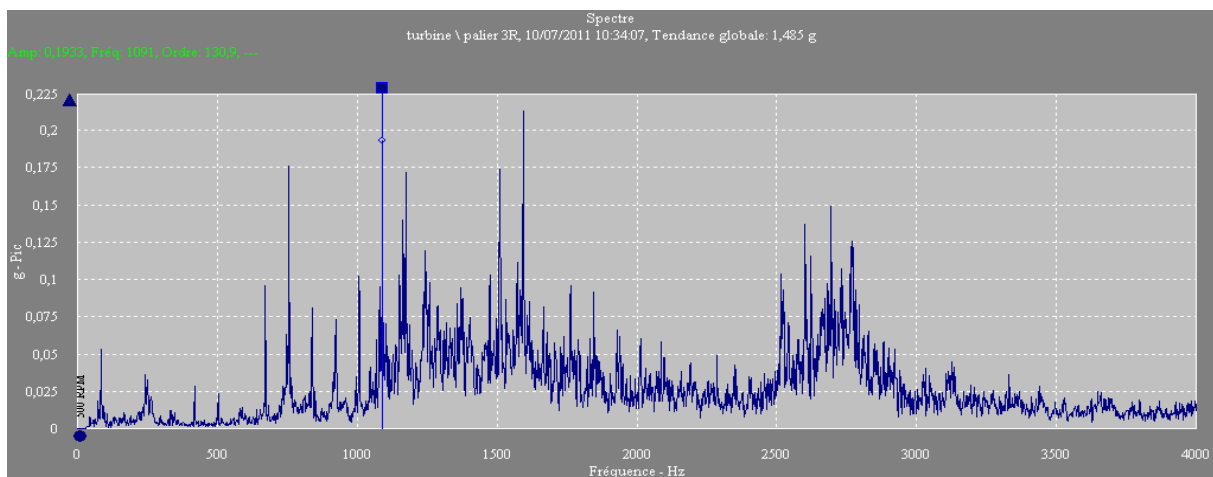


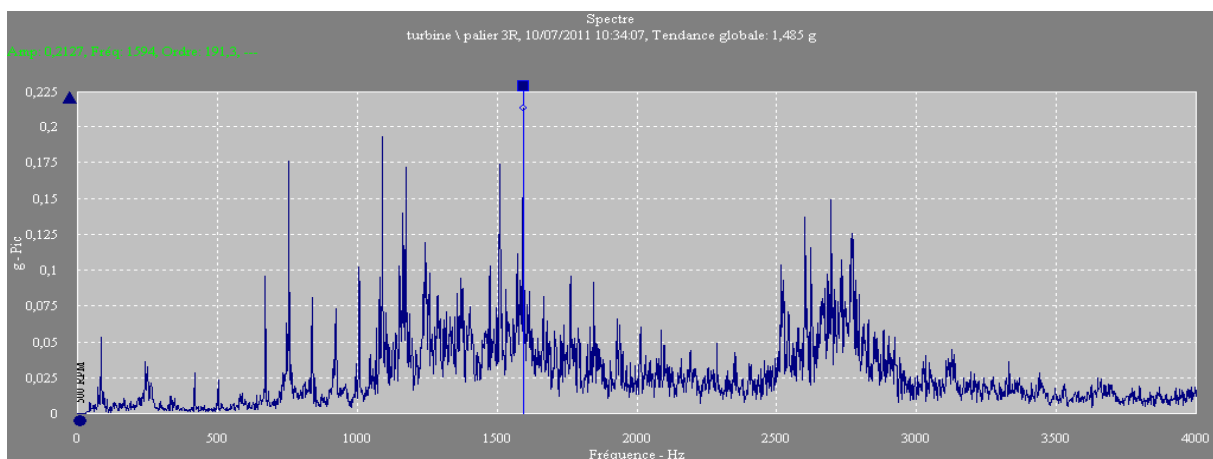
Figure V.56 : spectre du point 3R après un zoom en indiquant la 8<sup>ème</sup> harmonique de la fréquence étudié (le 10/07/2011)



**Figure V.57** : spectre du point 3R après un zoom en indiquant la 9<sup>ème</sup> harmonique de la fréquence étudiée (le 10/07/2011)



**Figure V.58** : spectre du point 3R après un zoom en indiquant la 13<sup>ème</sup> harmonique de la fréquence étudiée (le 10/07/2011)



**Figure V.59** : spectre du point 3R après un zoom en indiquant la 19<sup>ème</sup> harmonique de la fréquence étudiée (le 10/07/2011)



Nous constatons un pic à la fréquence de 84.38 Hz (Figure IV.55) qui correspond à la fréquence du défaut de la bague extérieure du roulement qui équipe le palier 3 du ventilateur, ce pic est suivi d'un peigne de raie dont le pas est coïncide à la fréquences du défaut de cette bague externe (Figure V.56, Figure V.57, Figure V.58 et Figure V.59).

L'existence du peigne de raie est la manifestation spectrale d'un phénomène de choc périodique dont l'origine est les chocs internes.

On peut diagnostiquer la présence d'un écaillage affectant la bague externe du roulement qui équipe ce palier.

### **Remarque**

Les fréquences de passage sont des fréquences théoriques sensiblement respectées tant qu'il y a roulement parfait des billes sans glissement. Dès qu'il y a amorce de grippage, le frottement a tendance à ralentir la partie dégradée. Le défaut se manifeste donc à une fréquence inférieure à la fréquence calculée.

## **V.4. Conclusion**

L'objectif de ce suivi était de connaître le comportement vibratoire du broyeur et du ventilateur, qui sont des machines clé à la cimenterie, nous pouvons dire que pour le broyeur le niveau vibratoire est élevé aux paliers qui portent le réducteur. Ces niveaux sont, d'après les normes (voir annexe (A.1)), classés comme Mauvais. Ces vibrations sont dues au choc périodique des dents du réducteur et le plus important est le frottement détecté au niveau des deux paliers 2 et 3. En ce qui concerne les niveaux vibratoires des autres paliers on peut les classer comme Passables.

Pour le ventilateur, on peut conclure que les niveaux vibratoires sont Passables, sauf aux paliers 2 et 3 qui sont un peu élevés selon les normes (voir annexe (A.1)), on les classe comme Mauvais. Ceci est dû au défaut de roulement du palier 3.

# Conclusion générale

Durant mon stage d'un mois au sein de la société des ciments algérois RAIS HAMIDOU, et dans un but d'établir une stratégie de maintenance conditionnelle préventive des machines tournantes, l'étude consiste à un suivi sur site de ces dernières, des mesures réelles ont été analysées. La première machine suivie est un broyeur qui est alimenté par un moteur qui tourne à 986 tr/min, sa chaîne cinématique comprend aussi un réducteur de vitesse, trois accouplements et neuf paliers. La deuxième machine est un ventilateur qui contient un moteur de vitesse de rotation égale à 990tr/min et une transmission par courroies, une turbine et quatre paliers. Ces deux équipements ont une importance capitale dans la production des ciments. La démarche pour l'investigation, consiste en premier lieu, de faire une analyse des NG acc (niveau globale accélération) qui déclare le problème dans son ensemble, ce qui nécessite de faire une analyse poussée utilisant la méthode de l'analyse spectrale pour identifier l'origine du problème à l'aide d'une chaîne d'acquisition comporte principalement un capteur accéléromètre, un Collecteur de données Microlog GX et un Ordinateur sur lequel est installé le logiciel Machine Analyst. Sur le logiciel machine analyst une hiérarchie est préalablement préparée selon la chaîne cinématique de de l'équipement qu'on veut surveiller.

Les vibrations sont transmises à la structure par l'intermédiaire des paliers. De ce fait, les paliers sont les points de mesure les plus adéquats pour quantifier l'état vibratoire d'une machine tournante. Et pour avoir une image vibratoire complète sur l'état de l'équipement surveillé, l'emplacement du capteur ce fait, suivant les directions des efforts qui engendre ces vibrations, qui sont généralement suivant deux direction une axiale et une radiale .

Le suivi du niveau global en accélération montre que l'évolution des niveaux vibratoire est non-significative c'est-à-dire qu'on n'a pas remarqué une augmentation continue du niveau vibratoire durant notre suivi, pour les deux machines tournantes.

Pour le broyeur, on a rencontré le problème du manque de la matière première pendant notre stage, qui nous a forcés à suivre le comportement vibratoire du broyeur à vide pendant trois compagnes de mesure. Le comportement vibratoire au niveau du réducteur est très remarquable, même avec un broyeur à vide. L'étude spectrale des mesures prélevées aux paliers qui porte le réducteur montre que le choc périodique des dents est l'un des causes de l'augmentation du niveau vibratoire, le phénomène observé au niveau des deux paliers de réducteur est aussi la cause de l'augmentation du niveau vibratoire, ce phénomène fait apparaître les harmoniques de la fréquence fondamentale à une plage de fréquence très étendue. Ce phénomène est probablement un frottement.

Pour notre ventilateur le niveau vibratoire a été important aux deux paliers coté poulie moteur et coté poulie turbine, on remarque après l'étude spectrale un pic à la fréquence du défaut de la bague extérieure du roulement qui équipe le palier coté poulie turbine, ce pic est suivi d'un

peigne de raie dont le pas coïncide à la fréquence du défaut de cette bague, ceci est la manifestation spectrale d'un écaillage affectant la bague externe du roulement.

Les niveaux vibratoires des deux équipements sont passables sauf au niveau du réducteur pour le broyeur, et au niveau du palier coté poulie turbine pour le ventilateur qui sont mauvais.

Concernant les causes de défaillances, et la localisation des défauts dans les machines tournantes permettent de conclure que les organes les plus sensibles sont les engrenages et les roulements.

Ce travail valide bien la performance de l'analyse vibratoire dans les travaux de gestion de la maintenance. Cependant, son efficacité dépend en grande partie de l'analyse et de l'interprétation des fréquences ainsi que de l'évolution des amplitudes et surtout de l'utilisation et de la maîtrise des outils spécifiques tel que l'analyse spectrale .

### **Recommandations**

Pour éviter des arrêts de production imprévus et les pertes économiques qui en découlent, il faut surveiller en permanence ces équipements et "traquer" tous les signes précurseurs de défauts avant qu'il ne soit trop tard. Pour cela, il existe une grande variété de techniques. L'analyse vibratoire est la plus connue et la plus largement employée. La surveillance par analyse vibratoire est devenue un pilier d'une stratégie de maintenance qui est la maintenance préventive conditionnelle. Ce type de maintenance devra s'étendre à la plupart des entreprises de production et d'exploitation. Les exemples de succès sont nombreux et l'intérêt de pouvoir détecter rapidement les anomalies, sans même devoir ausculter l'équipement. Ainsi, que de pouvoir prévenir la panne et en prévoir la réparation en temps opportun, tout en tenant compte des impératifs de production, de la pièces de rechange et de l'équipage d'intervention.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] BIGRET R. FERON J,-L. Diagnostic, Maintenance et disponibilité des machines tournantes- MASSON- 1995.
- [2] LANDOLSI F. cours de techniques de surveillances. février 2011, sur [www.thechnologuepro.com](http://www.thechnologuepro.com)
- [3] MOREL J. Techniques de l'Ingénieur – Traité Mesure et contrôle – Surveillances vibratoire et maintenance prédictive. R 6 100
- [4] AUGÉIX D., -Techniques de l'Ingénieur - Traité Génie mécanique – Analyse vibratoire des machines tournantes. BM 5 145, vol BD 2 janv. 2001.
- [5] MANUEL de l'utilisateur MICROLOG GX. réf-no 32001200 FR révision A.2005.
- [6] BABA H-S. diagnostic des défauts de machines tournantes par l'analyse spectrale des vibrations. Projet de fin d'études. ENP 2005.
- [7] Claire BRENEUR\_2002, Éléments de maintenance préventive de machines tournantes dans le cas de défauts combinés d'engrenages et de roulements, thèse de doctorat, école doctorale des sciences pour l'ingénieur de Lyon.
- [8] CHAIB R. contribution à l'optimisation de la maintenance conditionnelle par l'analyse des vibratoire. Thèse de doctorat. Université Mentouri de Constantine
- [9] BOUFNAR M. éléments de maintenance préventive des machines tournantes par Analyse de vibration. Mémoire de magistère .ENP 2006
- [10] BOULENGER A., CHRISTIAN P. Analyse vibratoire en maintenance, DUNOD, 3<sup>ème</sup> édition, février 2007.
- [11] LAVALLEE L. analyse des vibrations cours niveau I. mars 2007. Ingénieure.

## ANNEXE

### A.1. Tolérance en accélération :

<b>Évaluation</b>	<b>SPM Acoustique</b>	<b>SKF, CSI -HFD</b>
	dB	G-S
Dangereux	50+	5+
Très Mauvais	40 - 49	3 - 5
Mauvais	30 - 39	1.5 - 3
Passable	20 - 29	0.75 - 1.49
Bon	10 - 19	0.3 - 0.74
Très Bon	1 - 9	0.01 - 0.29

**Tableau 1** : Tolérance en accélération [11]

## **A.2. Caractéristiques techniques du Microlog GX [5]**

### **Modes d'entrée**

Accélération, vitesse et déplacement à partir de terminaux de poche, de capteurs installés ou de systèmes de surveillance : Capteurs CA/CC

Le capteur utilisé est un accéléromètre piézoélectrique (qualité de tout matériau pouvant convertir une excitation physique en une charge électrique)

### **Traitement préalable**

Enveloppement (démodulateur) : Muni de quatre (4) filtres d'entrée sélectionnables pour améliorer la détection des défaillances au niveau des roulements et des engrenages. Sélection du filtre :

- 5 Hz – 100 Hz ;
- 50 Hz – 1 000 Hz ;
- 500 Hz – 10 kHz ;
- 5 kHz – 40 kHz.

### **Mesure**

- Plage : mesures ROUTE et non-ROUTE : de 16 à 40 kHz ;
- Calcul de la moyenne : programmable de 1 à 9 999 ;
- Type de calcul de la moyenne : linéaire, synchronisation temporelle et continue ;
- Curseur : fixe, unique, harmonique et pic ;
- Modes du déclencheur : pente de déclenchement et amplitude, libre et externe ;
- Résolution : 100, 200, 400, 800, 1 600, 3 200, 6 400 et 12 800 lignes, programmables (12 800 lignes en non-ROUTE uniquement) ;
- Fenêtres de mesure : Hanning, Flat top et Rectangular ;
- Automatisation multi-point : on peut lier jusqu'à 12 mesures à une même collecte de données automatisées (activation avec un seul bouton) pour chaque emplacement de mesure.

### **Affichages de données**

Spectre, temps, table de phase, processus, orbite, phase trans-canal et double spectre et Tracés temporels (deux canaux non-ROUTE uniquement). Jusqu'à 12 bandes (fixe ou base ordre) téléchargeables à partir du logiciel hôte.