

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DU 20 AOUT 1955 SKIKDA

FACULTE DES SCIENCES ET SCIENCES DE L'INGENIORAT

Département de génie mécanique



THESE

**Présentée pour obtenir le diplôme de Doctorat en Sciences
En Mécanique**

OPTION

Maintenance industrielle

THEME

**Surveillance, détection et diagnostic des défaillances
dans une machine tournante**

Par

BENSACI MAHMOUD

Devant le jury :

Mr A. BOUZAOUT	Président	Professeur Univ. 20Aout 55	Skikda
Mr R. CHAIB	Rapporteur	Professeur Univ. Mentouri	Constantine
Mr E. HADJADJ	Examineur	Professeur Univ. Badji Mokhtar	Annaba
Mr N. BENCHOUIA	Examineur	M. de conférences Univ. Messaadia	Souk Ahras
Mr F. INEL	Examineur	M. de conférence Univ. 20Aout 55	Skikda

Soutenue le : 23/04/2019

Remerciements

Il m'a été très difficile d'écrire cette page par souci d'oublier les nombreuses personnes qu'il me faut citer pour leur aide, leur accueil, leur soutien... ! Qu'elles soient toutes assurées de ma plus profonde reconnaissance même si leur noms n'y figure pas !

Je remercie monsieur A. BOUZAOUJ professeur à l'université 20Aout 55 SKIKDA pour l'intérêt qu'il a manifesté pour mon travail, pour ses questions constructives et ses précieux conseils, ses commentaires ainsi que ses recommandations m'ont été d'une grande importance dans l'amélioration de la qualité de ce manuscrit. Je le remercie d'avoir accepté de juger ce travail en tant que président de jury.

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à monsieur R. CHAÏB, Professeur à l'université MENTOURI Constantine, qui fut pour moi un directeur de thèse attentif et disponible malgré ses responsabilités nombreuses. Je lui suis très reconnaissant pour la liberté qu'il a bien voulu me laisser. Sa compétence, sa clairvoyance, son humanisme, m'ont beaucoup appris.

Je suis extrêmement reconnaissant à monsieur L. HADJADI, professeur à l'université Badji Mokhtar Annaba, pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail et ses encouragements et pour l'aide qu'il m'a fournie à la recherche. Je lui suis reconnaissant d'avoir accepté d'être examinateur de ce travail.

Je remercie monsieur N. BENCHOUJA Maître de conférences à l'université Messaadia Souk Ahras, pour l'attention qu'il a accordée à mon travail, pour le temps qu'il a bien voulu consacrer à ce mémoire, sa lecture attentive, Je lui suis reconnaissant d'avoir accepté d'être examinateur de ce travail.

Je remercie Monsieur F. JNEL Maître de conférences à l'université 20Aout 55 SKIKDA, pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail et ses encouragements. Je lui suis reconnaissant d'avoir accepté d'être examinateur de ce travail.

Mes remerciements à l'équipe de maintenance à SONALGAZ de SKTKDA sur leur accueil chaleureux, et en particulier à Mr KAADUANE ABDELKADER qui m'a aidé dès le début de mes recherches pour le Magister et le Doctorat, pour tous ce qui est besoins d'accomplirai les TBF de la machine GTA, vis-à-vis de la problématique fiabiliste, tout en me faisant confiance dans l'autonomie qui m'a été laissée.

Je remercie tous mes collègues de l'ENSEJ et du 20 AOUT 1955 de SKTKDA sur leur soutien et leurs conseils, tout au long de cette thèse.

Mes remerciements à Mr Lahdar khochmane, que dieu le tout puissant l'accueille en son vaste paradis et Mr Lyes Rehal sur leurs encouragements et pour l'aide qu'ils m'ont fournie à la recherche.

Résumé

Les machines tournantes jouent un rôle souvent stratégique dans un processus 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.

Or, comme les machines industrielles sujettes à des multiples modes de défaillances, ou les opportunités de pannes et d'incidents sont multiples. Et étant donné que les facteurs d'exploitation possèdent un caractère aléatoire, peuvent être à l'origine des défaillances cataleptiques non prévues. Par contre l'usure, le vieillissement, les déformations et la variation de la résistance provoquent des défaillances graduelles, par dérive. Dans tous les cas la variation de l'état technique est déterminée par un ensemble de pannes aléatoires et graduelles.

Ainsi réduire les frais globaux de maintenance, du nombre d'arrêts non planifiés, des niveaux de vibration et d'usure (d'où un allongement de la durée de vie des machines), des charges administratives, du coût de possession.

Ainsi que d'augmenter la fiabilité de la machine qui conduit à la réduction des vibrations et des défaillances indésirables pour les machines tournantes.

L'analyse de la fiabilité constitue une étape indispensable dans toute étude de sûreté de fonctionnement. A l'origine, la fiabilité concernait les systèmes à haute technologie (centrales nucléaires, aérospatial). Aujourd'hui, la fiabilité est devenue un paramètre clé de la qualité et d'aide à la décision, dans l'étude de la plupart des composants, produits et processus "grand public": Transport, énergie, bâtiments, composants électroniques, composants mécaniques...etc.

C'est pourquoi, l'objectif de ce travail est d'utiliser la loi de Waloddi Weibull qui est une méthode continue et plus largement utilisée, afin de savoir à tout moment la fiabilité, l'MTBF et assurer la disponibilité du matériel.

Mots clés

Détection précoce, maintenance conditionnelle, taux de défaillances, fiabilité.

Abstract

Rotating machines often play a strategic role in a manufacturing process. A picture of a mill in a cement plant or a turbine in a power plant, they are part of the equipment that we cannot afford to stop at any time.

However, as industrial machinery are machines subject to multiple failure modes, or opportunities failures and incidents are many.

In addition, since operating factors have a random character, can cause unforeseen failures cataleptic. For against wear, Aging, deformation and the variation of the resistance cause gradual failures, through drift. In all cases, the variation of the technical condition is determined by a set of random and gradual failures.

Thus, reduce overall maintenance costs, the number of unplanned shutdowns, levels of vibration and wear (Where Prolonged life of machines), administrative burdens, the cost of ownership.

As well as increase the reliability of the machine which leads to the reduction of vibrations and undesirable failures for rotating machinery.

Reliability analysis is an essential step in any operational safety study. Originally, reliability was for high-tech systems (nuclear, aerospace). Today, reliability has become a key parameter of quality and decision support, in the study of most components, products and processes "general public": Transport, energy, buildings, electronic components, mechanical components ... etc.

That is why the goal of this work is to use Waloddi Weibull's Law which is a continuous method and more widely used, to know at any time the reliability, the MTBF and ensure the availability of equipment.

Keywords

Early detection, conditional maintenance, failure rate, reliability.

ملخص

الآلات الدوارة غالبا ما تلعب دورا استراتيجيا في عملية التصنيع. مثلا مطحنة في مصنع الإسمنت أو توربين في محطة توليد الكهرباء، فهي أجزاء من الآلات التي لا يمكن توقيفها في أي وقت. لكن، الآلات الصناعية هي آلات تخضع لأوضاع فشل متكررة، حيث فرص الفشل والحوادث متعددة.

وبما أن عوامل التشغيل لها طابع عشوائي، فبإمكانها تكون مبدئيا عطا غير متوقعا. و من ناحية أخرى، فإن التآكل، الشيخوخة، التشوهات والتغيرات في المقاومة تحدث فشلا تدريجيا. في كل الحالات فان تغيرات الحالة التقنية محددة بمجموعة من عناصر العطب العشوائي والتدريجي.

وبالتالي تخفيض التكاليف الشاملة للصيانة، عدد التوقفات الغير مبرمجة، مستويات الاهتزازات والتآكل (حيث زيادة في فترة حياة الآلات)، الأعباء الإدارية والتكلفة الملكية.

و كذلك رفع من موثوقية الآلة مما يؤدي إلى التخفيض من الأعطاب و الاهتزازات الغير مرغوب بها للآلات الدوارة.

بعد تحليل الموثوقية مرحلة أساسية في أي دراسة سلامة التشغيل. في الأصل ، كانت الموثوقية للأنظمة عالية التقنية (النوية ، والفضائية). اليوم، أصبحت الموثوقية معلمة أساسية للجودة ودعم اتخاذ القرار ، في دراسة معظم المكونات،المنتجات والعمليات "العمليات العمومية": النقل ، الطاقة ، المباني ، المكونات الإلكترونية ، المكونات الميكانيكية ... إلخ.

ولهذا، فإن الغرض من هذا العمل هو استخدام قانون Waloddi Weibull ، الذي هو عبارة عن منهج مستمر ويستخدم على نطاق واسع ، حتى يتسنى لنا معرفة الموثوقية ، MTBF وضمن توافر المعدات في أي وقت.

الكلمات المفتاحية

الكشف المبكر ، الصيانة الشرطية، نسبة الفشل، الموثوقية.

Sommaire

– Remerciements	i
– Résumé	ii
– Sommaire.....	iii
– Introduction générale	1

Chapitre I

Etat de l'art et recherche bibliographique

I.1	Etat de l'art de la solution proposée pour la surveillance et le diagnostic des défaillances dans une machine tournante.....	5
I.1.1	Introduction	5
I.1.2	Les pannes mécaniques dans une machine tournante	6
I.1.3	Classement des machines «VIS »	7
I.2	Recherche Bibliographique générale sur la problématique des pannes, les concepts de la maintenance et des outils de surveillance et de diagnostic.....	8
I.2.1	Recherche bibliographique générale sur la problématique des pannes.....	8
I.2.2	Recherche bibliographique générale sur les concepts de la maintenance des machines tournantes.....	9
I.2.3	Recherche bibliographique générale des outils de surveillance et de diagnostic des machines tournantes	11

Chapitre II

Présentation de l'analyse vibratoire

Et

Les concepts du traitement du signal

II.1	Présentation de l'analyse vibratoire	14
II.1.1	Introduction	14
II.1.2	Notion de base d'une vibration	15
II.1.3	Définition théorique d'une vibration.....	15
II.1.4	Types de vibrations	15
II.1.4.1	Vibration sinusoïdale	15
II.1.4.2	Vibrations périodiques.....	15
II.1.4.3	Vibrations aléatoires	16
II.1.5	Fréquence	16

II.1.5.1	Définition.....	16
II.1.5.2	Relation entre fréquence et période.....	17
II.1.5.3	Unités.....	17
II.1.6	Amplitudes.....	17
II.1.6.1	Définition.....	17
II.1.6.2	Les grandeurs associées a l'amplitude d'une vibration.....	18
II.1.6.2.1	Accélération, Vitesse, Déplacement.....	18
II.1.6.2.2	Fonction logarithme.....	19
II.1.6.2.3	Niveau en décibel (dB).....	21
II.1.7	Stratégies de surveillance	20
II.1.7.1	La mesure du niveau global.....	20
a)	La valeur maximale.....	21
b)	La valeur crête à crête	21
c)	La valeur moyenne absolue	21
d)	La valeur efficace RMS.....	21
e)	Le facteur de crête	21
f)	Le kurtosis.....	22
II.1.7.2	L'analyse spectrale.....	22
II.1.7.3	L'analyse cepstrale.....	23
II.1.8	Indicateur	24
II.1.8.1	Définition.....	24
II.1.8.2	Les indicateurs principaux.....	25
II.1.8.3	Les indicateurs secondaires.....	25
II.1.9	Seuil d'un indicateur	26
II.1.10	Les normes	27
II.1.11	Normes spécifiques.....	28
II.1.12	Seuils de jugement	29
II.1.13	Choix des seuils vibratoires	30
II.1.14	Capteur	30
II.1.14.1	Définition	30
II.1.14.2	Mode de fixation du capteur.....	30
II.2	Les concepts du traitement du signal.....	31
II.2.1	Introduction et généralités sur les signaux.....	31

II.2.2	Les classes de signaux.....	31
II.2.2.1	Temps continu et temps discret.....	31
II.2.2.2	Variables continues et variables discrètes.....	32
II.2.2.3	Signaux périodiques et signaux apériodiques.....	32
II.2.3	Energie, puissance.....	33
II.2.3.1	Définitions.....	33
II.2.3.2	Remarques.....	33
II.2.4	La Transformée de Fourier.....	34
II.2.4.1	Généralités	34
II.2.4.2	Définitions.....	34
II.2.4.3	Propriétés.....	35
II.2.4.4	Linéarité.....	35
II.2.4.5	Décalage en temps/fréquence.....	35
II.2.4.6	Dérivation.....	36
II.2.4.7	Dilatation en temps/fréquence.....	36
II.2.4.8	Conjugaison complexe.....	37
II.2.4.9	Convolution de deux signaux.....	37
II.2.5	Représentation de Fourier des signaux d'énergie infinie.....	38
II.2.5.1	Impulsion de Dirac.....	38
II.2.5.2	Spectre des signaux périodiques.....	41
II.2.5.3	Cas particulier : peigne de Dirac.....	42
II.2.6	Notion de filtre linéaire.....	43
II.2.6.1	Linéarité.....	43
II.2.6.2	Invariance.....	44
II.2.6.3	Fonction de transfert	45

Chapitre III

Les concepts des lois de probabilité utilisées en fiabilité

III.1	Définition de la fiabilité R	47
III.2	Définition de la probabilité.....	47
III.3	Définition des paramètres nécessaires à la mesure de la fiabilité.....	47
III.3.1	Variable aléatoire	47
III.3.2	Densité de probabilité	48
III.3.3	Fonction de répartition	48

III.3.4	Fonction de fiabilité.....	48
III.3.5	Fonction du taux de défaillance ou taux d'avarie.....	48
III.3.6	M.T.B.F « Mean Time Between Failures ».....	49
III.3.7	Le taux moyen de défaillance	49
III.4	Les principales lois de probabilités utilisées en fiabilité.....	49
III.4.1	Lois discrètes.....	49
III.4.1.1	La loi Binomiale.....	49
a)	Remarques	49
b)	Exemple d'application	50
III.4.1.2	La loi de Poisson	50
III.4.2	Les lois continues	50
III.4.2.1	La loi de Waloddi Weibull.....	50
a)	La densité de probabilité.....	51
b)	La fonction de Répartition.....	51
c)	La fonction de Fiabilité	51
d)	Le taux d'avarie	51
III.4.2.1.1	Etude paramétrique du modèle de Weibull	51
a)	Signification du paramètre de forme β	51
b)	Signification du paramètre de localisation ou de repérage γ	51
c)	Signification du paramètre d'échelle réelle η ($\eta > 0$).....	52
III.4.2.2	La loi exponentielle	52
III.4.2.3	La loi normale (ou distribution LAPLACE-GAUSS).....	53
III.4.2.3.1	Expression mathématique.....	53
III.4.2.3.2	Influence de l'écart type	53
a)	Cas d'application de la loi normale	55
b)	Espérance et variance	55
III.4.2.4	La loi Log-normale.....	55

Chapitre IV

Application: Test et validation sur un protocole expérimental

(Critère de choix, tests de validité)

IV .1	Introduction.....	57
IV .2	Aperçu sur la loi de Waloddi Weibull.....	58
IV.2.1	Définition des paramètres de la loi de Waloddi Weibull.....	58
IV.2.2	Expressions mathématiques pour les formules de la loi de Waloddi Weibull...	58

IV.2.2.1	La fiabilité $R(t)$	59
IV.2.2.2	La fonction de répartition $F(t)$	59
IV.2.2.3	Le taux instantané de défaillance $\lambda(t)$	59
IV.2.2.4	La densité de probabilité $f(t)$	59
IV.2.2.5	Calcul du MTBF.....	59
IV.3	Détermination graphique des paramètres de Waloddi Weibull.....	60
IV.3.1	Echelles utilisées sur le papier de Waloddi Weibull	61
IV.4	L'étude de la fiabilité à partir du modèle de Waloddi Weibull.....	61
IV.4.1	Analyse analytique	61
IV.4.1.1	Préparation des données.....	61
IV.4.2	Contexte	62
IV.4.3	Calcul de la fonction de répartition $F(t)\%$	63
IV.4.4	Traçage des points $M [t, F(t)]$	65
IV.4.5	Traçage de l'allure.....	66
IV.4.6	Estimation du paramètre η	66
IV.4.7	Estimation du paramètre β	67
IV.4.8	Calcul du MTBF	67
IV.5	Etude des fonctions de la méthode de Weibull $R(t), F(t), \lambda(t), f(t)$ graphiquement.....	68
IV.5.1	Représentation graphique de la fonction de Fiabilité $R(t)$	68
IV.5.2	Représentation graphique de la fonction de Répartition $F(t)$	68
IV.5.3	Représentation graphique du Taux de défaillance $\lambda(t)$	69
IV.5.4	Représentation graphique de la fonction de Densité de probabilité $f(t)$	69
IV.5.5	Discussions des résultats	69
IV.6	Validation du modèle choisi par le test de Kolmogorov-Smirnov.....	70
IV.6.1	Calcul de la loi théorique $F_t(t)$ et la fonction réelle $F_r(t)$	70
IV.6.2	Comparaison entre les deux valeurs $D_{n,max}$ et $D_{n,\alpha}$	72
IV.6.3	Rappel	72
IV.7	Conclusion.....	72

Conclusion générale et perspectives

– Conclusion générale.....	74
– Perspectives	75
– Bibliographie	77
– Liste des figures et tableaux.....	80
– Glossaire.....	82
– Annexes	85

Introduction
Générale

Introduction Générale

La disponibilité et la fiabilité des machines tournantes sont prépondérantes pour assurer une production fiable. Les pannes imprévues sont très coûteuses. Le dégât de production produit pendant les corrections, une insuffisance à encaisser qui peut simuler les gains de l'entreprise. Si l'on y additionne les peines de sécurité imparfaite pour le personnel, la valeur de production affaiblie et le déficit incertain de célébrité pour l'entreprise, il sera certain que de tels incidents ne nécessitent pas être supportées. Pour résoudre cette question, il faut chercher une nouvelle approche de maintenance dans les ateliers.

Les approches quotidiennes de maintenance se soulagent de lisser les machines en état de fonctionnement jusqu'à l'apparition du défaut, ou bien d'utiliser l'entretien à des moments fixe. L'initiale approche intéresse les équipements peu coûteux et dupliqués, lorsqu'un dégât de production peut être supporté sur une uniformité. La deuxième approche, nommée maintenance préventive, montre le danger que des équipements en bon état de fonctionnement inacceptable, soit des équipements sur la position de rester en incident soient spontanément abandonnées sans surveillance. Une grande fiabilité, entraîne une diminution de défaillances dans les machines tournantes, le traité de la fiabilité s'est développé un peu plus rapidement depuis les vingt dernières années, surtout à l'occasion de l'intérêt plus vif des industriels qui veulent assurer une plus grande fiabilité de leurs machines tournantes. L'analyse de la fiabilité constitue une phase indispensable dans toute étude de sûreté de fonctionnement. A l'origine, la fiabilité concernait les systèmes à haute technologie (centrales nucléaires, aérospatial). Aujourd'hui, la fiabilité est devenue un paramètre clé de la qualité et d'aide à la décision, dans l'étude de la plupart des composants, produits et processus "grand public": Transport, énergie, bâtiments, composants électroniques, composants mécaniques...etc.

L'intérêt de l'étude de la fiabilité va permettre de résoudre plusieurs questions (l'âge du produit, la période de garantie peut-on donner au nouveau produit, le délai pour réaliser les tâches de maintenance ou utiliser les pièces de rechange).

Dans notre travail, nous donnons une méthodologie pour le calcul de la fiabilité pour l'entretien dans le cas d'un moto-compresseur 62 CM 101 A à l'entreprise SONALGAZ de SKIKDA.

L'objectif de notre travail est d'utiliser la loi de Waloddi Weibull qui est une méthode continue et plus largement utilisée, afin de savoir à tout moment la fiabilité, l'MTBF et assurer la disponibilité du matériel.

Organisation et aperçu général sur la thèse

Cette thèse a été élaborée sous forme d'une introduction générale et de quatre chapitres, et d'une conclusion générale et recommandation organisés de la manière suivante:

- Concernant l'introduction générale, on a parlé brièvement sur les pannes imprévues qui influent sur la production et le gain de l'entreprise, ainsi la sécurité imparfaite du personnel, on a recommandé de chercher une nouvelle approche de maintenance dans les usines pour résoudre le problème du déficit contingent de réputation pour l'entreprise.

Aussi nous voulions souligner que plus la fiabilité est élevée, plus le taux de défaillance est faible, plus le rendement des machines de production sera élevé.

Dans ce cas, nous obtenons une amélioration concernant la durée de vie du produit, la période de garantie quant on peut donner au nouveau produit, le délai pour réaliser les opérations de maintenance. En fin on a donné une méthodologie pour le calcul de la fiabilité pour l'entretien dans le cas d'une moto compresseur 62 CM 101 A, à l'entreprise de SONALGAZ de SKIKDA.

Et à travers ce que nous avons mentionné à propos de la fiabilité nous valorisons cette recherche par l'utilisation de la méthode de Waloddi Weibull qui est une méthode continue et plus largement utilisée, afin de savoir à chaque instant la fiabilité, le MTBF et assurer la disponibilité du matériel.

- Le premier chapitre présente l'état de l'art et une recherche bibliographique, on commence par l'état de l'art de la solution proposée pour la surveillance, détection et diagnostic des défaillances dans une machine tournante où on montre que l'analyse des vibrations générées par les machines en fonctionnement est une méthode utilisée en maintenance conditionnelle pour la détection précoce des défaillances et ainsi d'éviter les arrêts à tout moment des machines.

On a montré aussi que cette méthode est simple, nous devons seulement utiliser l'ensemble d'indicateur de niveaux globaux à l'analyseur de vibrations, en passant par le collecteur de données, les appareils font appel à des techniques de traitement du signal plus ou moins complexes.

Après on a terminé par une brève recherche bibliographique générale sur la problématique des pannes, les concepts de la maintenance et des outils de surveillance et de diagnostic.

Commençons par la bibliographie générale sur la problématique des pannes, la méthode d'analyse temps-fréquence, utilisée en 2012 par Junsheng Cheng, Yang Yi, Yu Yang qui est la

décomposition moyenne locale (LMD) basée sur le traitement des signaux en Amplitude Modulée et en Fréquence Modulée (AM-FM) à plusieurs composants.

Une nouvelle méthode proposée en 2013 par Yaguo Lei, Jing Lin, Zhengjia Il, Ming Zuo J, la décomposition en mode empirique (EMD) est l'une des techniques les plus puissantes de traitement de signal et a été largement étudié et largement appliquée dans le diagnostic des défauts des machines tournantes.

Une autre méthode en Avril 2013, additionnée à la problématique des pannes, l'ensemble de la décomposition en mode empirique (EEMD) améliorée avec un paquet multi-ondelettes pour le diagnostic des multi-pannes des machines tournantes, est proposée par Hongkai Jiang, Chengliang Li, Huaxing Li.

Pour la bibliographie générale sur les concepts de la maintenance des machines tournantes une méthode présentée en 2010 par Dacheng Li, Jinji Gao. L'étude et l'application de la maintenance centrée pour la fiabilité (RCM), en tenant compte de la maintenance radicale (RM). Cette dernière prend les causes profondes des défaillances en tant qu'objets exécutifs pour prendre des décisions de maintenance.

Une autre méthode proposée en 2012 par K. Efthymiou, N. Papakostas, D. Mourtzis, G. Chryssolouris, qui est une plate-forme de maintenance prédictive (PM) pour les systèmes de production. Cette plate-forme se compose de trois piliers, à savoir l'acquisition de données et l'analyse, la gestion des connaissances, et un tableau de bord de l'entretien de la durabilité.

En 2014 Marco Lewandowski, Stephan Oelker ont proposé un concept de maintenance préventive ajusté qui adapte les aspects de contrôle autonome afin de planifier et de contrôler le personnel, l'équipement, les ressources etc., sans difficultés de planification.

Concernant la bibliographie générale des outils de surveillance et de diagnostic des machines tournantes une méthode proposée en Janvier 2011 par Bovic Kilundu, Pierre Dehombreux, Xavier Chimentin, La surveillance de l'usure d'outil par les techniques de la machine d'apprentissage et l'analyse du spectre singulier, basée sur l'exploitation des données techniques pour surveiller les conditions de l'outil pendant le découpage du métal. Analyse du spectre singulier pseudo-locale (SSA) est effectuée sur des signaux de vibration mesurés sur le porte-outil.

Une autre méthode proposée en mai 2011 par T.H. Loutas, D. Roulias, E. Pauly, V. Kostopoulos, L'utilisation combinée de la vibration, l'émission acoustique et les débris de l'huile sur la surveillance en ligne vers une surveillance conditionnelle plus efficace des machines tournantes, basée sur La surveillance de l'usure progressive des engrenages à l'aide de diverses techniques non destructives, ainsi que l'utilisation des techniques avancées de

traitement de signal lors des enregistrements acquises à la direction de schémas de diagnostic plus efficaces.

Une nouvelle méthode proposée en mars 2014 par Jacek Urbanek, Tomasz Barszcz, Jérôme Antoni, qui est la distribution intégrée de l'intensité de modulation comme un outil pratique pour la surveillance conditionnelle, cette méthode présente des signaux de vibration générés par les machines tournantes, peuvent transporter beaucoup d'informations utiles sur l'état technique des objets.

- Le deuxième chapitre met en évidence une présentation brièvement sur l'analyse vibratoire et les concepts du traitement du signal. Commencant par la présentation de l'analyse vibratoire qui est une discipline appliquée à la maintenance conditionnelle qui peut détecter la plupart des défauts dans les machines tournantes en passant par la surveillance de l'état de la machine et mesurant le niveau de vibration produit par les pièces de cette dernière, s'il ya une augmentation de vibration détectée en peut identifier la cause, et par la suite on peut en déduire avec précision le délai avant de tomber en panne.

Aussi on a essayé de montrer que la deuxième partie du même chapitre est une discipline qui développe et étudie les techniques de traitement, d'analyse et d'interprétation des signaux. Parmi les types d'opérations envisageables sur ces signaux, on peut dénoter le contrôle, le filtrage, la compression de données, la transmission de données, le débruitage, la déconvolution, la prédiction, l'identification, la classification, etc.

- Le troisième chapitre est un aperçu sur les concepts des lois de probabilité utilisées en fiabilité. Dans ce chapitre on a donné les définitions des paramètres nécessaires à la mesure de la fiabilité et on a mentionné quelques lois de distributions de vie qui interviennent le plus fréquemment dans l'analyse de la fiabilité dans le domaine mécanique.

Parmi ces lois, on trouve les lois discrètes et les lois continues.

Les lois discrètes sont la loi Binomiale et la loi de Poisson.

Les lois continues sont la loi de Weibull, la loi exponentielle, la loi normale et la loi log-normale.

Pour chaque loi on a essayé de donné une mini-explication concernant la définition, la densité de probabilité, la fonction de répartition et la fonction de fiabilité.

Et finalement le dernier chapitre comporte une application : Test et validation sur un protocole expérimental, on a essayé de montrer une méthodologie de calcul de la fiabilité basée sur la loi de Waloddi Weibull, où nous avons donné des explications sur la situation d'une entreprise Algérienne.

Enfin on termine par une conclusion générale et perspective.

Chapitre I

Etat de l'art

et

recherche bibliographique

I.1 - Etat de l'art de la solution proposée pour la surveillance, détection et diagnostic des défaillances dans une machine tournante

I.1.1 - Introduction

L'analyse des vibrations générées par une machine en fonctionnement est une méthode utilisée en maintenance conditionnelle pour détection précoce de l'apparition des défauts et ainsi éviter des arrêts de production coûteux dus à la défaillance imprévue d'un roulement ou d'un engrenage. Pour réaliser une surveillance et un diagnostic vibratoire sur site, les solutions ne manquent pas : du "simple" indicateur de niveaux globaux à l'analyseur de vibrations, en passant par le collecteur de données, les appareils font appel à des techniques de traitement du signal plus ou moins complexes. Pour faire le bon choix, il faut avant tout savoir ce que l'on souhaite mesurer et l'usage que l'on veut en faire.

L'analyse des vibrations induites par une machine en fonctionnement est riche d'enseignements. Elle révèle de manière précoce la présence de toutes sortes de défauts susceptibles d'entraîner à plus ou moins long terme des arrêts de production coûteux : défauts de roulements, écaillage de dents d'engrenages, balourds, jeux, phénomènes de cavitation, etc.

Un diagnostic vibratoire plus approfondi permet en outre de comprendre l'origine de ces anomalies.

On comprend alors que l'analyse de vibrations soit la méthode la plus utilisée pour la maintenance conditionnelle des machines tournantes [1].

Toute machine possédant des composantes en mouvement génère un certain niveau de vibration quel que soit le soin apporté à leur fabrication. Ces vibrations sont caractéristiques de l'état de l'équipement et constituent sa signature. Au fur et à mesure que l'état de la machine se détériore, le niveau vibratoire change, Première manifestation physique d'une anomalie, cause potentielle de dégradation et de panne. Aujourd'hui, l'emploi des technologies intégrant les méthodes avancées de traitement de signal occupe une place privilégiée pour faire un diagnostic d'un équipement mécanique.

Ces caractéristiques font de la surveillance par analyse vibratoire, un outil indispensable pour une maintenance moderne, puisqu'elle permet d'améliorer la disponibilité et sa sécurité par détection précoce et le suivi de la dégradation des éléments critiques, ainsi localiser l'organe défectueux sans démontage de la machine. Par conséquent, la correction éventuelle et la programmation des opérations de maintenance seront limitées aux seuls maillons et organes défaillants.

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

signal électrique proportionnel mesurable de manière reproductible. Les applications industrielles de la surveillance vibratoire en fonctionnement sont diversifiées, que ce soit pour des structures mécaniques complexes (plate formes, pont, barrages, bâtiments) ou les machines (turbo - alternateurs, système d'engrenage).

Les techniques de l'analyse vibratoire, permettent à tout industriel qui les met en pratique :

- De connaître à tout moment (l'état de santé) de ces machines et ceci au niveau de chacun de ses éléments ;
- Pour un équipement neuf, l'analyse vibratoire permet la détection d'anomalies ou défauts de montage - sources potentielles de pannes-pratiquement indécélables par d'autres techniques d'investigation;
- Pour un équipement venant de faire l'objet d'une remise en état, l'analyse vibratoire vérifie si cette opération a bien corrigé les anomalies identifiées ayant conduit à la prise de décision d'arrêt ou, au contraire, a généré un autre comportement anormal susceptible d'induire, à brève échéance, une nouvelle panne (maintenance mal adaptée).
- D'en déduire l'évolution de l'état de santé pour les semaines ou les mois à venir et de faire des prévisions sur leur destin ;
- De Faire un bilan de santé ;
- D'enrichir et affiner les informations juste et pertinents nécessaires pour la maîtrise des risques.

Les avantages suivants peuvent être perçus :

- éviter la casse des machines (vrais pour plus de 90 des cas);
- éviter les arrêts de production non programmés;
- augmenter la durée de vie des équipements;
- ASSURER un contrôle qualité permanent des réparations, du montage et du graissage;
- pratiquer l'équilibrage in situ de ces équipements;
- augmenter la sécurité dans les secteurs d'activités tels que le pétrole, la pétrochimie, et la chimie;
- éviter les erreurs humaines, lors des arrêts et de remise en état;
- Améliorer la disponibilité et la sécurité [1].

I.1.2 - Les pannes mécaniques dans une machine tournante

L'analyse vibratoire est la méthode la plus puissante pour anticiper les pannes mécaniques des machines. En comparaison à l'analyse d'huile ou la thermographie, elle

détecte quasiment l'ensemble des défauts mécaniques, et les détecte de manière plus précoce et plus précise, (**Tab. I.1**) [1].

Tableau I-1 - Suivi du niveau vibratoire des indicateurs					
Types de défauts		Déplacement	Vitesse	Accélération	Chocs
Basses fréquences					
<ul style="list-style-type: none"> ● Balourd ● Désalignement ● Usure d'accouplement ● Desserrage ● ... 		/	/	oui	oui
Moyennes fréquences					
<ul style="list-style-type: none"> ● Engrènement défectueux ● ... 		oui	/	/	/
Hautes fréquences					
Roulements	● Usure régulière	oui	oui	/	oui
	● Mauvais Graissage	oui	oui	/	oui
	● Début d'écaillage	oui	oui	oui	/
	● Marquage important	oui	oui	/	/
	● Très dégradé	oui	/	/	oui

Un balourd, un jeu, un défaut d'alignement, un roulement usé ou endommagé, etc... se traduisent par une variation des efforts internes que subit la machine, et donc à une modification de son comportement vibratoire. En plaçant des accéléromètres aux endroits où se transmettent ces efforts (c'est-à-dire sur les paliers des machines), on peut alors suivre l'état de santé de l'équipement. « La méthode présente trois gros avantages : les mesures sont faciles à prendre, les défauts sont détectés à un stade précoce, et il est possible de réaliser un diagnostic approfondi pour en connaître l'origine ».

I.1.3 - Classement des machines «VIS »

Afin de ne pas surveiller inutilement des machines qui n'ont pas une importance capitale, les industriels établissent souvent le classement suivant (**Tab I.2**) [2]:

Tab I.2 surveillance des machines «VIS »

Exemple de surveillance à mettre en œuvre			
Complexité de la machine	Machine		
	Vitale	Importante	Secondaire
Complexe (Présence de réducteurs)	Surveillance spectrale	Surveillance spectrale	Surveillance par niveaux globaux
Simple (Une seule ligne d'arbre)	Surveillance spectrale	Surveillance par niveaux globaux	Surveillance par niveaux globaux

- ✓ 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 ou dont une panne ne remet pas en cause les capacités de production.

Les critères de classement dans l'une ou l'autre de ces catégories peuvent varier d'un site à l'autre. En fonction de ce classement, d'un indice de vétusté, d'un indice de complexité des machines, on détermine les outils de surveillance à employer, leur paramétrage et la fréquence des campagnes de relevés [2].

I.2 - Recherche Bibliographique générale sur la problématique des pannes, les concepts de la maintenance et des outils de surveillance et de diagnostic

I.2.1- Recherche bibliographique générale sur la problématique des pannes

Les machines tournantes couvrent un large éventail d'équipements mécaniques et jouent un rôle important dans les applications industrielles. Ils fonctionnent généralement dans un environnement de travail difficile et sont donc soumis à des défauts qui pourraient être détectés et diagnostiqués en utilisant des techniques de traitement du signal.

La méthode décomposition moyenne locale (LMD), présentée en 2012 par Junsheng Cheng, Yang Yi, Yu Yang est une nouvelle méthode d'analyse temps-fréquence d'auto-adaptatif, ce qui est particulièrement approprié pour le traitement des signaux modulés en amplitude et fréquence (AM-FM) à plusieurs composants. En utilisant LMD, tout signal complexe peut être décomposé en un certain nombre de fonctions du produit (PFs), dont chacun est le produit

d'un signal d'enveloppe et un signal de fréquence modulée uniquement à partir de laquelle les fréquences instantanées physiquement significatifs peuvent être obtenues. En fait, chaque PF est juste un mono-composant du signal AM-FM. Par conséquent, la procédure de LMD peut être considérée comme le processus de démodulation. Bien que la panne se produise dans l'engrenage ou roulement à rouleaux, les signaux vibratoires captés seraient exactement présenter des caractéristiques AM-FM. Donc, il est possible de diagnostiquer la panne de pignon et le roulement à rouleaux par LMD [3].

En Février 2013, Yaguo Lei, Jing Lin, Zhengjia Il, J. Ming Zuo, ont présentés la méthode décomposition en mode empirique (EMD), qui est l'une des techniques les plus puissantes de traitement de signal et a été largement étudié et largement appliquée dans le diagnostic des défauts des machines tournantes. Ils ont tout d'abord, présentés brièvement l'utilité de la méthode EMD, ils ont illustré et listé les problèmes et leurs solutions correspondantes. Ensuite, les applications récentes de l'EMD pour le diagnostic des pannes des machines tournantes sont résumées en termes de composants clés, tels que des paliers à roulement, des engrenages et des rotors. Enfin, les problèmes ouverts en circulation de l'EMD dans le diagnostic des pannes sont discutés et les orientations futures de la recherche potentielle sont identifiées [4].

En Avril 2013, une nouvelle méthode présentée par Hongkai Jiang, Chengliang Li, Huaxing Li, c'est l'EEMD Ensemble de décomposition en mode empirique améliorée avec paquet multi-ondelettes pour le diagnostic des multi-pannes des machines tournantes, l'identification des pannes multiples est un défi pour le diagnostic des pannes des machines tournantes. Les signaux de vibration mesurés à partir des machines tournantes sont généralement complexes, non stationnaires et non linéaires. Surtout, les valeurs utiles des multi-pannes sont trop faibles pour être identifiés à un stade précoce [5]. L'utilisation des paquets multi-ondelettes comme le préfiltre afin d'améliorer les résultats de la décomposition EEMD, paquet multi-ondelettes décompose le signal de vibration en une série de bandes de fréquences étroites et améliore les multiples défauts composants caractéristiques faibles dans les différentes bandes de fréquences étroites. En choisissant la bonne amplitude du bruit ajouté en fonction des caractéristiques de vibration, EEMD est encore améliorée pour augmenter la précision et l'efficacité des résultats de la décomposition.

I.2.2 - Recherche bibliographique générale sur les concepts de la maintenance des machines tournantes

Pour la Recherche bibliographique générale sur les concepts de la maintenance des machines tournantes une méthode à était présentée en Septembre 2010, étude et application de la

Maintenance centrée sur la fiabilité (RCM) considérant la Maintenance Radicale (RM) par Dacheng Li, Jinji Gao, la maintenance radicale (RM) prend les causes profondes des défaillances en tant qu'objets exécutifs pour prendre des décisions de maintenance. Une analyse de cause fondamentale (RCA) est effectuée sur la défaillance de l'équipement pour effectuer une RM et pour créer un plan de maintenance en utilisant les méthodes combinées, l'analyse en modes de défaillance, de leurs effets et de leurs criticité (AMDEC) (FMECA) et l'analyse de l'arbre de défaillances (FTA) [6].

Des critères d'évaluation et des matrices de criticité sont utilisés pour évaluer le niveau de criticité des modes de défaillance. De plus, les ensembles de coupe minimum (MCS) (Minimum Cut Sets) et le calcul d'importance sont appliqués pour analyser quantitativement l'arbre de défaillance. Les causes directes de l'induction des défauts de vibration dans les machines tournantes sont classées selon le mécanisme de défaillance et les caractéristiques du domaine fréquentiel.

La méthode montre que l'utilisation de RM dans la RCM traditionnelle peut aider à affecter les ressources de maintenance de manière rationnelle et améliorer la qualité des stratégies de maintenance.

K. Efthymiou, N. Papakostas, D. Mourtzis, G. Chryssolouris ont proposés en 2012 une plateforme de maintenance prédictive (PM) pour les systèmes de production.

La maintenance et le support peuvent représenter jusqu'à 60 à 75% du coût total du cycle de vie d'un système de fabrication. En présentant une revue sur les approches de la maintenance prédictive, les méthodes et les outils dans les systèmes de fabrication et propose une plateforme de maintenance prédictive intégrée. Cette plate-forme se compose de trois piliers, à savoir l'acquisition de données et l'analyse, la gestion des connaissances, et un tableau de bord de l'entretien de la durabilité. Le premier pilier est responsable de l'extraction et du traitement des données, le second se concentre sur la modélisation et la représentation des connaissances en maintenance et le troisième pilier offre des capacités de conseil sur la planification de la maintenance avec l'importance particulière accordée aux indicateurs de performance environnementale et énergétique [7].

En 2014 Marco Lewandowski, Stephan Oelker ont proposé un concept de maintenance préventive ajusté qui adapte les aspects de contrôle autonome afin de planifier et de contrôler le personnel, l'équipement, les ressources etc., sans difficultés de planification.

La maintenance et la logistique des pièces de rechange déterminent souvent les coûts du cycle de vie liés à la phase d'utilisation des actifs. Par conséquent, différentes stratégies de maintenance sont connues dans la littérature et adoptées par les entreprises afin de réduire ces

coûts. Le plus souvent, ces stratégies rencontrent des problèmes en raison des incertitudes dans les processus et les tâches. En proposant un concept de maintenance préventive ajusté qui implémente des aspects de contrôle autonome afin de planifier et de contrôler le personnel, l'équipement, les ressources, etc.

Par conséquent, les objets de maintenance eux-mêmes ont la possibilité de déclencher des mesures de maintenance, qu'il s'agisse d'inspection, de maintenance ou de réparation, en fonction de leurs exigences particulières. Le document donne un aperçu précieux d'un concept efficace de la gestion de la situation complexe des processus de maintenance opérationnelle ainsi que de la logistique des pièces détachées en général et illustre les premières approches concrètes [8].

I.2.3 - Recherche bibliographique générale des outils de surveillance et de diagnostic des machines tournantes

Dans ce domaine en Janvier 2011, Bovic Kilundu, Pierre Dehombreux, Xavier Chimentin ont présentés une méthode, la surveillance de l'usure d'outil par les techniques de la machine d'apprentissage et l'analyse du spectre singulier, en explorant l'utilisation de l'exploitation des données techniques pour surveiller les conditions de l'outil pendant le découpage du métal. L'analyse du spectre singulier (SSA) pseudo-locale est effectuée sur des signaux de vibration mesurés sur le porte-outil.

Ceci est couplé à un filtre passe-bande pour permettre la définition et l'extraction de caractéristiques qui sont sensibles à l'usure des outils. Ces caractéristiques sont définies, dans certaines bandes de fréquences.

Cette étude met en évidence deux aspects importants :

Forte pertinence de l'information dans les composants de vibration à haute fréquence et les avantages de la combinaison de la SSA et filtrage passe-bande pour se débarrasser des composants inutiles (bruit) [9].

Une autre méthode proposée en mai 2011 par T.H. Loutas, D. Roulias, E. Pauly, V. Kostopoulos, l'utilisation combinée de la vibration, l'émission acoustique et les débris de l'huile sur la surveillance en ligne vers une surveillance conditionnelle plus efficace des machines tournantes, basée sur La surveillance de l'usure progressive des engrenages à l'aide de diverses techniques non destructives, ainsi que l'utilisation des techniques avancées de traitement de signal lors des enregistrements acquises à la direction de schémas de diagnostic plus efficaces.

Pour cette raison, des tests des heures ont été effectués dans les engrenages en bonne état dans une boîte de vitesses à l'échelle du laboratoire à un seul étage jusqu'à ce qu'ils soient gravement endommagés.

Trois techniques de surveillance en ligne sont mises en œuvre dans les tests. Vibrations et des enregistrements d'émissions acoustiques (AE) en combinaison avec les données provenant de la surveillance des débris d'huile (ODM) de l'huile de lubrification sont utilisés afin d'évaluer l'état des engrenages. Une pléthore de paramètres (caractéristiques) ont été extraites des signaux acquis par le biais classique (dans le temps et dans le domaine fréquentiel).

La fusion de données a été réalisée dans le degré d'intégration des plus représentatifs parmi les caractéristiques extraites à partir de l'ensemble des trois technologies de mesure dans une matrice de données unique. L'analyse des composantes principales (PCA) a été utilisée pour réduire la dimension de la matrice de données alors que l'analyse en composantes indépendantes (ICA) a été en outre appliquée pour identifier les composants indépendants parmi les données et corrélérer les différents modes de dégâts de la boîte de vitesses.

Enfin les règles heuristiques basées sur les valeurs des caractéristiques des composants indépendants aboutis ont été fixés, réalisant ainsi un système de surveillance de la santé pour les boîtes de vitesses. L'intégration des données de vibration, AE et ODM augmente la capacité de diagnostic et la fiabilité de la surveillance [10].

Jacek Urbanek, Tomasz Barszcz, Jérôme Antoni, en Mars 2014, ils ont proposés une méthode, distribution intégrée de l'intensité de modulation (MID) comme un outil pratique pour la surveillance conditionnelle. Les modulations présentées dans les signaux de vibration générés par les machines tournantes peuvent transporter beaucoup d'informations utiles sur l'état technique des objets. Il a été prouvé que les défauts de deux boîtes de vitesses et les roulements à éléments roulants (REB) se manifestent eux-mêmes comme des modulations. Le document décrit une technique pour la détection de modulations dans les signaux vibro-acoustiques, appelée distribution d'intensité de modulation (MID), qui est une fonction qui combine plusieurs densités de corrélation spectrale d'une manière ou d'une autre, en fonction de l'application. En outre, le document décrit une fonctionnelle obtenue en intégrant un MID qui a l'avantage d'être une fonction de la seule variable de fréquence au lieu de deux. L'article examine l'utilité de la MID comme un indicateur pour la détection de la présence des défauts dans le roulement à éléments roulants dans les environnements très bruyants. Pour les besoins du test, une éolienne qui a souffert à la fois des pannes avancée de la boîte à vitesses et des pannes à un stade précoce de roulement choisie. En outre, le document traite le problème de l'application de l'outil proposé dans le cas d'un système de surveillance industrielle.

Afin de montrer le comportement des composants cycliques générés par la turbine à l'étude sur une longue période de temps, l'ensemble des MID intégré sur toute la gamme de signaux porteurs potentiels a été présenté comme un terrain en cascade [11].

Chapitre II

Présentation de l'analyse vibratoire

et

les concepts du traitement du signal

II.1 - Présentation de l'analyse vibratoire

II.1.1 – Introduction

Les pannes inattendues sont quelques fois très coûteuses [12,13]. La perte de production pendant les réparations engendre un manque à gagner qui peut affecter les bénéfices de l'entreprise [13].

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 [14].

Pour régler ce problème, il faut trouver une nouvelle approche maintenance dans les ateliers [13,15].

Les méthodes traditionnelles de maintenance se contentent de faire fonctionner les machines jusqu'à rupture, ou bien d'effectuer la maintenance à intervalles fixes [15]. 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 parfait état de marche soit arrêt inutilement, soit des machines sur le point de tomber en panne soient inconsciemment laissées sans surveillance.

Désormais, 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 [5].

Un certain nombre de variables des machines peuvent être utilisées: la température, la pression d'huile, la vibration, etc. Cependant, l'expérience a montré que le paramètre le plus fiable qui donne le plus précocement et de la meilleure façon l'état de détérioration d'une machine tournante est la vibration [16,17,18].

Toutes les machines vibrent et au fur et à mesure que l'état de la machines se détériore (Déséquilibre d'un arbre, défaut de roulement ou de boîte de vitesse) le niveau de vibration augmente [16,19,2].

En mesurant et en surveillant le niveau de vibration produit par une machine, on obtient un indicateur idéal sur son état de santé.

Si l'augmentation de vibration de la machine permet de détecter un défaut, l'analyse des caractéristiques de vibration de la machine permet d'identifier la cause.

On peut ensuite en déduire avec précision le délai avant qu'il ne devienne critique [13].

II.1.2 – Notion de base d'une vibration

On appelle une vibration, la variation cyclique d'une grandeur physique autour de sa valeur moyenne. Un système mécanique est dit en vibration, lorsqu'il est animé d'un mouvement de va et vient, autour d'une position d'équilibre (de repos).

Les vibrations sont la manifestation la plus évidente de l'apparition de contraintes sur une machine tournante. C'est la réponse de la structure à l'excitation des forces internes et externes [15] :

$$\text{Vibrations} = \text{Force} \times \text{Mobilité.}$$

II.1.3 – Définition théorique d'une vibration

D'après La norme ISO 2041 «Vibrations et chocs » la vibration est la variation avec le temps de l'intensité d'une grandeur caractéristique du mouvement ou de la position d'un système mécanique, lorsque l'intensité est alternativement plus grande et plus petite qu'une certaine valeur moyenne ou de référence.

En fait, un corps est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement oscillatoire autour d'une position d'équilibre ou de référence [15].

II.1.4 – Types de vibrations

II.1.4.1 – Vibration sinusoïdale

La sinusoïde : c'est la forme d'onde la plus simple à caractériser. Cette forme d'onde particulière, peut se visualiser comme le mouvement de la projection verticale de l'extrémité d'une aiguille d'une horloge, ou le mouvement de translation d'un système masse – ressort non amorti. La période T correspond à un tour complet de l'aiguille ou au temps que met la masse pour faire un aller retour. Une sinusoïde est une courbe alternative, de valeur moyenne nulle, représentée par une fonction mathématique simple (**Fig. II.1**) [20].

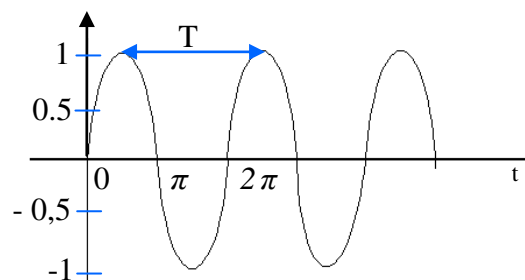


Fig. II.1 : Représentation de la sinusoïde

II.1.4.2 – Vibrations périodiques

Le motif d'une vibration périodique consiste en la superposition, c'est-à-dire l'addition algébrique d'une vibration pure fondamentale et de vibrations pures harmoniques (**Fig. II.2**). Les fréquences des harmoniques sont des multiples entiers de celle du fondamental. Par

exemple, le mouvement d'un piston d'un moteur à combustion interne génère des oscillations harmoniques [20].

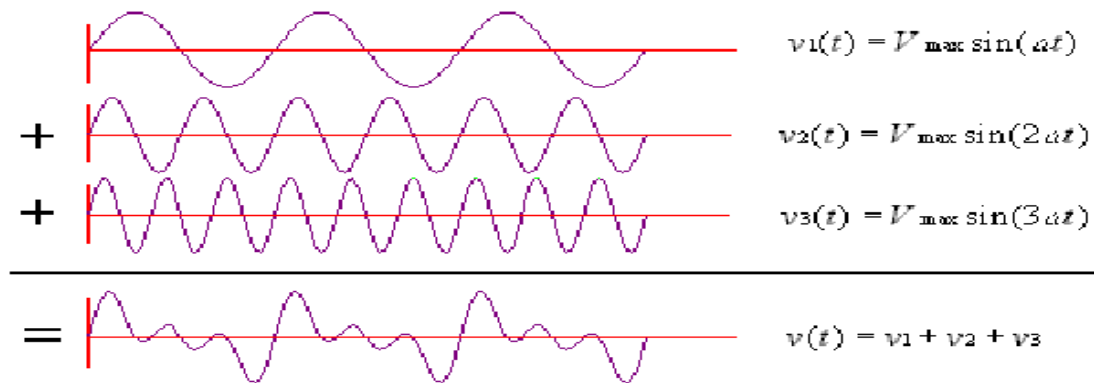


Fig. II.2. Représentation de vibration périodique [14]

II.1.4.3 – Vibrations aléatoires

La forme d'onde des vibrations n'a pas toujours une structure aussi simple que celle des vibrations pures et des vibrations harmoniques. Très souvent, on ne peut plus y distinguer la répétition d'un motif. La forme du signal vibratoire évolue au contraire constamment de manière anarchique. Ce sont les vibrations aléatoires (Fig. II.3) [20].

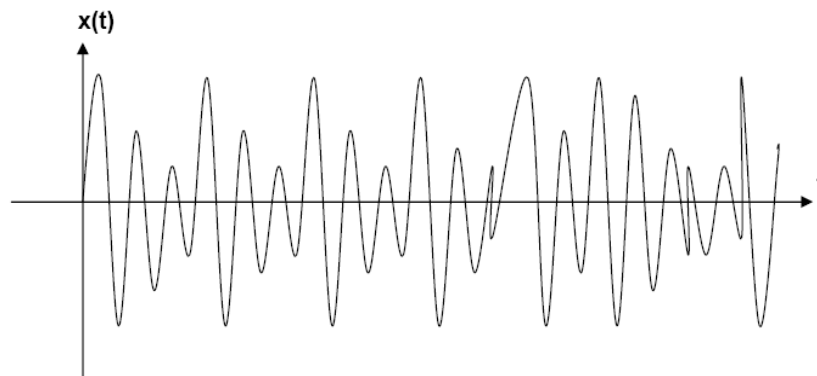


Fig. II.3: Vibrations aléatoires

II.1.5 – Fréquence

II.1.5.1 – Définition

La fréquence est le nombre de fois qu'un phénomène se répète en un temps donné.

Lorsque l'unité de temps choisie est la seconde, la fréquence s'exprime en hertz (Hz). Une vibration qui se produira 50 fois par seconde aura donc une fréquence de 50 Hz.

D'après la norme française NF X 02-202, l'Hertz est la fréquence d'un phénomène périodique, dont la période est une (01) seconde.

$$1 \text{ Hz} = \frac{1 \text{ Cycle}}{1 \text{ seconde}} \dots\dots\dots(2.1)$$

II.1.5.2 – Relation entre fréquence et période

Si la fréquence f d'un phénomène est de 50 Hertz, c'est à dire, 50 cycles par seconde la durée d'un cycle (ou période T) est de 1/50 éme de seconde, ainsi :

$$f = \frac{1}{T} \dots \dots \dots (2.2)$$

$$f = 50 \text{ Hertz}, T = 1/50 \text{ de seconde}$$

La fréquence f est donc l'inverse de la période.

II.1.5.3 – Unités

Si l'unité normalisée de la fréquence est l'Hertz, on rencontre parfois des valeurs exprimées en CPM (cycles par minute) ou en RPM (rotations par minute) d'où :

$$1 H_z = \frac{1 CPM}{60} = \frac{1 RPM}{60} \dots \dots \dots (2.3)$$

Il est intéressant parfois d'exprimer les phénomènes liés à la vitesse de rotation en multiple ou en ordre de la fréquence de rotation. Cette représentation a l'avantage de lier le phénomène vibratoire à une fréquence de référence (généralement la vitesse de l'arbre induisant le phénomène).

II.1.6 – Amplitudes

II.1.6.1 – Définition

L'amplitude d'une onde est la valeur de ses écarts par rapport au point d'équilibre. On peut définir que (Fig. II.4) :

- l'amplitude maximale par rapport au point d'équilibre appelée amplitude de crête A_c ,
- l'amplitude double appelée aussi l'amplitude de crête à crête A_{cc} ,
- l'amplitude efficace A_{eff} , appelée aussi RMS (Root Mean Square) [15].

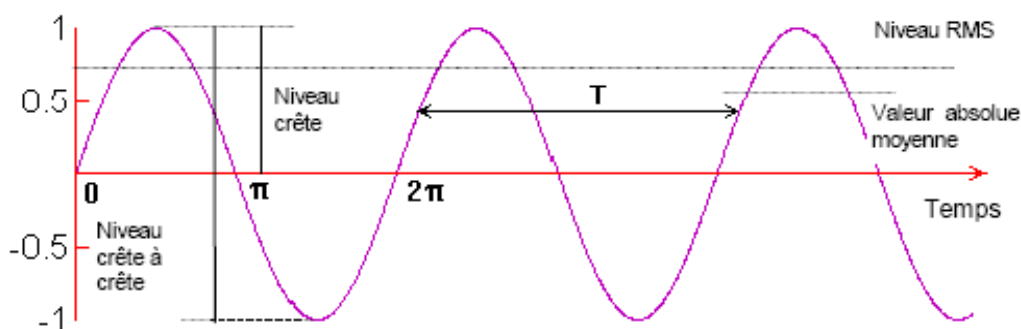


Fig. II.4 La représentation des différentes amplitudes (vibration sinusoïdale)
Pour un signal de type sinusoïdal [20]

$$A_{eff} = \frac{A_c \cdot \sqrt{2}}{2} = 0,707 \cdot A_c \dots \dots \dots (2.4)$$

La vibration instantanée $V(t)$ peut s'écrire : $V(t) = V_{max} \sin(\omega t + \varphi)$; où :

- V_{\max} est la valeur maximale atteinte par la vibration appelée aussi valeur crête,
- ω est une grandeur liée à la fréquence du signal. On l'appelle la pulsation.
- φ est appelée la phase à l'origine des temps, elle caractérise l'amplitude du signal à l'instant $t=0$.

II.1.6.2 – LES GRANDEURS ASSOCIEES A L'AMPLITUDE D'UNE VIBRATION

II.1.6.2.1 – ACCELERATION, VITESSE, DEPLACEMENT

Décrire les vibrations, c'est donner les valeurs d'un certain nombre de paramètres caractéristiques. Etant donné que les vibrations d'une machine tournante sont des mouvements, elles répondent aux lois physiques qui régissent les mouvements et dont les trois paramètres principaux sont : accélération, vitesse, déplacement [20].

- Dans le cas d'une vibration périodique et prenant pour variable caractéristique le déplacement x par rapport à la position d'équilibre, la forme d'onde est de la forme :

$$x(t) = X_{\max} \sin(\omega t)$$

Le déplacement s'exprime en m, ou plus couramment en mm, ou en μm .

- La vitesse v qui caractérise l'accroissement de position par unité de temps se décrit par la dérivée du déplacement $v = dx / dt$ ce qui donne la fonction de vitesse suivante :

$$v(t) = \omega X_{\max} \cos(\omega t) = V_{\max} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

Cette équation montre que la vitesse est en avance de phase de 90° sur le déplacement et est en m/s ou mm/s qu'elle soit exprimée.

- L'accélération qui caractérise l'accroissement de vitesse par unité de temps se décrit par la dérivée de la vitesse ou la double dérivée du déplacement

$$a = dv / dt = d^2x / dt^2 \dots\dots\dots (2.5)$$

ce qui donne la fonction d'accélération suivante :

$$a(t) = -\omega^2 X_{\max} \sin(\omega t) = A_{\max} \sin(\omega t + \pi) \dots\dots\dots (2.6)$$

Cette équation montre que l'accélération est en avance de phase de 180° sur le déplacement et donc de 90° sur la vitesse. L'accélération s'exprime en m/s^2 ou en g ($1g = 9.81 \text{ m/s}^2$).

Donc pour les signaux sinusoïdaux, déplacement, vitesse et accélération sont reliés mathématiquement par une fonction de la fréquence et du temps. Sans tenir compte de la phase du signal, comme c'est le cas pour des intégrations dans le temps, la vitesse peut être obtenue en divisant le signal accélération par un facteur proportionnel à la fréquence ($v = a / 2\pi f$), et le déplacement par un facteur proportionnel au carré de la fréquence ($x = a / 4\pi f^2$) [20].

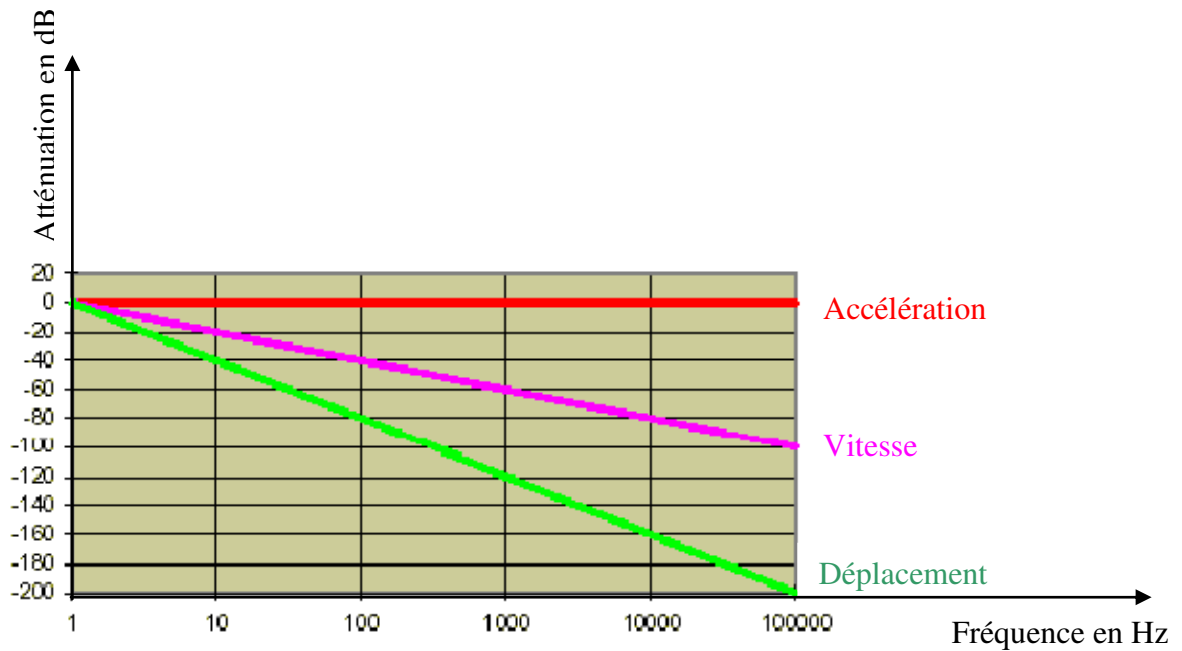


Fig. II.5- Relations des : accélération, vitesse, déplacement pour un signal sinusoïdal [20]

Le choix de mesure de l'un des paramètres cités plus haut doit tenir compte de leur sensibilité. On constate que l'accélération sera prédominante aux fréquences élevées et que le déplacement sera prépondérant aux très basses fréquences. L'important domaine de valeurs que peuvent prendre ces grandeurs justifie encore, l'utilisation d'échelles et de grandeurs logarithmiques. Ces grandeurs logarithmiques correspondent au logarithme du rapport des valeurs de deux grandeurs de même espèce.

II.1.6.2.2 – fonction logarithme

La fonction logarithme transformant l'échelle linéaire en échelle logarithmique, est souvent plus pratique. Elle permet de compresser une gamme de valeurs souvent trop large pour que ces valeurs soient discernées entre elles. L'opérateur «logarithme» est destiné à représenter sur un même graphe de très fortes valeurs et de très faibles [20].

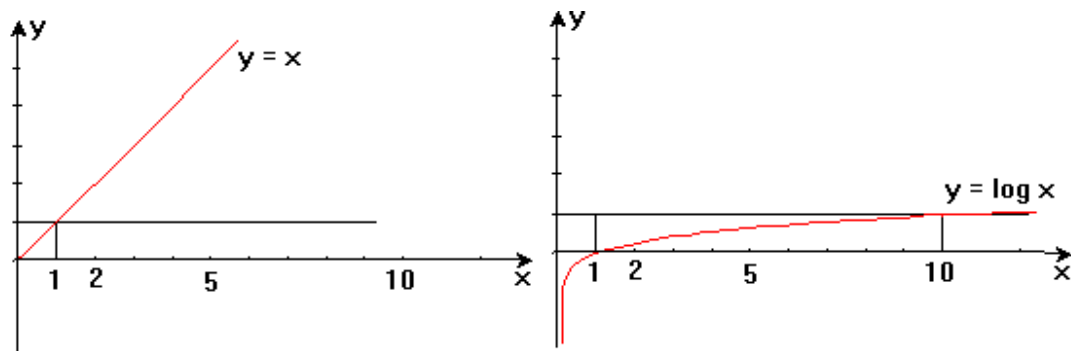


Fig. II.6. Transformation d'une échelle linéaire en logarithmique [20]

II.1.6.2.3 – Niveau en décibel (dB)

Dans les systèmes mécaniques en résonance, les amplitudes sont très élevées par rapport aux amplitudes hors résonance, l'une des unités est le décibel. De manière générale, le niveau L en décibels (noté dB) est par définition dix fois le logarithme décimal du rapport à une valeur de référence [21].

- Le niveau d'accélération en log, se définit par :

$$L_a = 10 \log \frac{A}{A_{ref}} \dots\dots\dots (2.7)$$

Où A_{ref} est une accélération de référence qui vaut $1 \mu\text{m/s}^2 = 10^{-6} \text{ m/s}^2$;

- Le niveau de vitesse en log, se définit par :

$$L_v = 10 \log \frac{V}{V_{ref}} \dots\dots\dots (2.8)$$

Où V_{ref} est une vitesse de référence qui vaut $1 \text{ nm/s} = 10^{-9} \text{ m/s}$;

- Le niveau déplacement en log, se définit par :

$$L_d = 10 \log \frac{X}{X_{ref}} \dots\dots\dots (2.9)$$

où X_{ref} est un déplacement de référence qui vaut $1 \text{ pm} = 10^{-6} \mu\text{m}$ [20].

II.1.7 – Stratégies de surveillance

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. Deux niveaux d'intervention sont possibles :

II.1.7.1 – La mesure du niveau global

Cette mesure permet d'exécuter une surveillance basée sur l'appréciation des amplitudes dans une bande de fréquences donnée, qui à son tour s'effectue de façon continue et les valeurs mesurées sont couramment actualisées.

Comme tout mouvement, la vibration peut être mesurée en termes de déplacements, vitesses et accélérations. L'expérience montre que tout phénomène vibratoire se manifestant par l'un de ces trois paramètres et est constaté soit en :

- basse fréquence : dont la mesure est effectuée en mode déplacement. Ainsi la plage de fréquences dans laquelle les défauts décelés (balourd, fouettement, desserrage,...) s'étale sur une gamme d'analyse de 0-200Hz ;
- moyenne fréquence : c'est en mode de vitesse que différents défauts (balourd, délignage, choc, aubages....) sont observés. Les fréquences constatées ne sont pas trop élevées et ne doivent pas dépasser les 5000Hz ;

- haute fréquence : les phénomènes tels que les défauts (roulement, engrènement, turbulence....) sont principalement détectés en hautes fréquences. La gamme d'analyse accessible d'exprimée l'accélération de ces défauts est généralement déterminée jusqu'à les 20000Hz.

D'autre part l'amplitude d'une vibration qui est le paramètre décrivant l'importance de la vibration et peut être évaluée de différentes façons. Sur le graphe (**Fig. II.7**), sont indiquées par les relations entre la valeur crête à crête, la valeur crête, les valeurs moyenne et efficace pour une vibration pure [15].

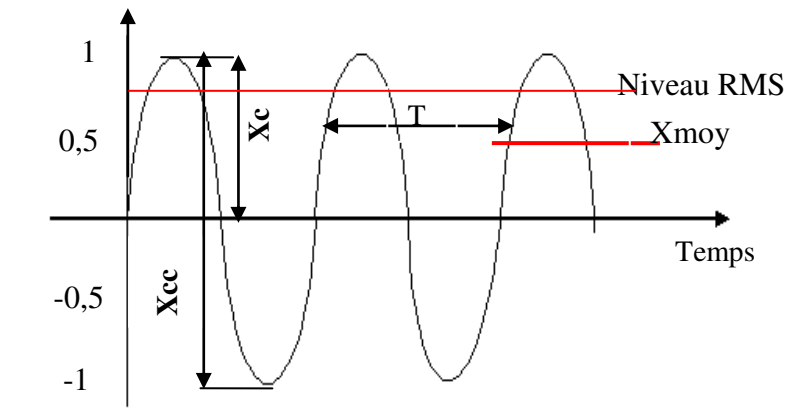


Fig. II.7 - Les indicateurs d'une amplitude

- La valeur maximale X_c** : c'est la plus grande valeur atteinte qui ne prend pas en compte l'évolution de la vibration en fonction du temps donc peu utilisée ;
- La valeur crête à crête X_{cc}** : c'est la différence entre la plus grande valeur du signal et sa plus petite valeur ;
- La valeur moyenne absolue $X_{moyenne}$** : c'est la moyenne du signal redressé sur une période ; elle est peu utilisée car elle n'est pas reliée directement à une grandeur physique :

$$X_{moyenne} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \dots\dots\dots (2.10)$$

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

$$\text{Valeur efficace RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T X^2(t) dt} \dots\dots\dots (2.11)$$

- Le facteur de crête** : ce facteur est défini par la relation : $F_c = X_c / \text{RMS}$.

C'est un indicateur sans dimension.

Le rôle des détecteurs dans un système de mesure est important, car il doit qualifier tout type de signal. En fait, il s'agit de comparer les valeurs réelles des paramètres vibratoires surveillées avec les consignes fixées afin d'établir les critères d'alarme et de danger, ou encore résultant de mesures précédentes pour déceler une évolution significative d'une dégradation.

Cependant, si la mesure du niveau global permet de suivre de manière fiable une machine, elle ne permet pas d'établir un diagnostic. En effet, sous une seule valeur (en déplacement, vitesse ou accélération) tous les phénomènes mécaniques (balourd, lignage, engrenement, roulement) sont confondus. Cependant, la mesure simultanée de ces trois niveaux globaux, où au moins des niveaux globaux de déplacements et d'accélération (voir Fig. II.1, annexe II) permettent d'émettre un avis sur la situation du phénomène en fréquence (phénomène d'origine basses ou hautes fréquences).

f) Le kurtosis : Plus spécifique au dépistage des défauts de roulements, le kurtosis est une grandeur statistique permettant d'analyser le caractère « pointu » ou « plat » d'une distribution, et donc d'observer la forme du signal. Dérivé du moment statistique d'ordre quatre, il est défini comme le rapport de la valeur moyenne du signal élevée à la puissance 4 sur le carré de son énergie. Il est donné par la formule suivante [22]:

$$K = \frac{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} (S(t) - \bar{S})^4}{\left[\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} (S(t) - \bar{S})^2 \right]^2} \dots\dots\dots (2.12)$$

est un indicateur adimensionnel. Il a l'avantage d'être indépendant des variations des vitesses de rotation et des charges de la machine.

Le Kurtosis approche la valeur de 3 pour un fonctionnement sans défauts de roulement, et augmente de façon remarquable dès l'apparition d'impulsions dues à la naissance d'un défaut. Pour être plus efficaces le Kurtosis et le facteur crête sont calculés dans certaines bandes fréquentielles où l'effet engendré par les dégradations est plus visible.

II.1.7.2 – L'analyse spectrale

Le diagnostic vibratoire se base sur l'identification du phénomène mécanique à la fréquence de la vibration qu'il génère. Pour cela, il faut donc représenter la vibration dans l'espace des fréquences. Cette opération se réalise mathématiquement en effectuant la transformée de FOURIER du signal temporel vibratoire. Le résultat est appelé spectre fréquentiel. Les formules représentent respectivement la transformée de Fourier et sa variante discrète [22].

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-i2\pi f t} dt \dots\dots\dots (2.13)$$

$$X(f) = \sum_{k=0}^{N_e-1} x(k) \cdot e^{-i2\pi f \frac{k}{N}} \dots\dots\dots (2.14)$$

Selon la nature du signal vibratoire, on obtient deux types de spectres :

- si le signal est périodique, on obtient un spectre des raies discrète, c'est le cas par exemple, des vibrations générées par le balourd, lignage, les engrenages, les dégradations localisées de roulements... ;
- si le signal est aléatoire ou transitoire, on obtient un spectre continu (l'intervalle entre les raies tend vers zéro), c'est le cas des turbulences d'écoulement, les dégradations généralisées de roulements de chocs non périodiques.

L'analyse des phénomènes périodiques est bien plus aisée que celle des phénomènes transitoires ou aléatoires puisqu'ils sont identifiés par des fréquences discrètes. Ces derniers sont néanmoins significatifs de problèmes réels : ils ne sont donc pas à négliger en diagnostic.

L'analyse spectrale permet de fournir au personnel consterné, non seulement des informations sur le comportement vibratoire instantané, mais également des informations sur la tendance des phénomènes et de l'apparition du défaut.

II.1.7.3 – L'analyse cepstrale

L'analyse cepstrale est une technique complémentaire, développée sur plusieurs variantes, dont les plus utilisées sont le cepstre, défini comme la transformée de Fourier inverse du logarithme de la transformée de Fourier, s'exprime selon une variable uniforme au temps, et est représentée par la formule suivante [22].

$$C = TF^{-1}[Ln|X(f)|]$$

Le cepstre de puissance défini comme la transformée de Fourier inverse du logarithme du module de la transformée de Fourier du signal, représenté par la formule suivante

$$C = TF^{-1}[Ln|X(f)|]^2$$

Cette fonction (transformée inverse du logarithme du spectre) permet, dans un spectre, de rechercher, d'identifier et de quantifier rapidement toute famille de composantes périodiques. Ces familles de composantes peuvent se présenter tant sous forme de peignes de raies que sous forme de bandes latérales de modulation autour d'une fréquence cinématique (fréquence d'engrènement, fréquence d'encoches, fréquence de rotation, ...).

L'identification visuelle de ces familles sur le spectre n'est pas toujours évidente (notamment lorsqu'elles se superposent) et ce même si l'on dispose d'outils tels que des curseurs d'harmoniques ou de bandes latérales.

Le cepstre peut être donc utilisé avec succès, pour mettre en évidence un certain nombre de défauts induisant des chocs périodiques (par exemple, desserrages, jeux, écaillages de roulements, défauts de dentures) [24].

Le cepstre permet également de dissocier, dans l'espace « temps », la réponse impulsionnelle d'une structure et ses sources d'excitation. Il est possible, dans le cas d'une excitation par chocs périodiques, d'éliminer les sources d'excitation par filtrage du cepstre et d'accéder à la fonction de transfert « réponse de la structure aux sollicitations » en calculant un nouveau spectre à partir du cepstre modifié (cepstre « filtré »).

Cette technique utilisée dans le domaine cepstral peut permettre de :

- « Nettoyer » le spectre de ses éléments excitateurs pour ne garder que la réponse de la structure et observer ainsi les variations de la raideur de celle-ci ; ces variations se traduisent par un glissement en fréquence et sont généralement significatives d'une fissuration, d'un défaut de serrage.
- « Nettoyer » le spectre dans le cas où plusieurs familles de composantes cohabitent, afin de n'observer que la famille désirée.

***Intérêt :**

Outil puissant de diagnostic, le cepstre peut aussi servir efficacement d'indicateur de dépistage, capable avec une fiabilité accrue de détecter l'apparition d'un certain nombre de défauts et d'en suivre l'évolution. Certains systèmes de surveillance autorisent aujourd'hui ce type de suivi.

II.1.8 – Indicateur

II.1.8.1 – Définition

Un indicateur de surveillance est issu d'un paramètre ou d'une grandeur plus ou moins élaboré dont l'acquisition est le plus souvent possible en fonctionnement. Un indicateur doit, par définition, caractériser l'état ou les performances d'une machine. Son évolution dans le temps doit être significative de l'apparition ou de l'aggravation d'un défaut ou d'un ensemble de défauts. La température d'un palier, le taux de concentration dans le lubrifiant de particules métalliques et le spectre dimensionnel de ces dernières, le rendement mécanique ou thermodynamique d'une machine, le bruit, le spectre ou la forme du courant d'alimentation d'un moteur, le taux de rebuts de fabrication... sont autant d'indicateurs susceptibles de représenter l'état ou les performances d'un équipement et d'en suivre l'évolution dans le temps. De plus, toute machine en fonctionnement induit des vibrations. Ces dernières, en tant qu'images directes des forces dynamiques engendrées par les pièces en mouvement, occupent

une place privilégiée parmi les grandeurs à prendre en considération pour assurer la surveillance d'une machine. Les techniques de traitement des signaux vibratoires permettent de définir des myriades d'indicateurs de surveillance dont certains peuvent être extrêmement sensibles à l'apparition d'un défaut et permettre sa localisation, voire même l'identification précise de sa nature.

L'analyse des vibrations joue un rôle essentiel non seulement dans le diagnostic de l'état des machines à des fins de maintenance, mais aussi dans le cadre de la recette d'un équipement neuf ou venant de faire l'objet d'une révision :

- Pour un équipement neuf, l'analyse vibratoire permet la détection d'anomalies ou défauts de montage - sources potentielles de pannes - pratiquement indécélables par d'autres techniques d'investigation.
- Pour un équipement venant de faire l'objet d'une remise en état, elle permet de vérifier si cette opération a bien corrigé les anomalies vibratoires identifiées ayant conduit à la prise de décision d'arrêt ou, au contraire, a généré un autre comportement anormal susceptible d'induire, à brève échéance, un nouvel arrêt.

La présence de particules métalliques dans le lubrifiant ou la montée en température d'un palier sont souvent des signes de dégradation déjà avancée. Les informations délivrées par ces indicateurs sont tardives par rapport à celles fournies par certains indicateurs issus du mouvement vibratoire de l'arbre ou du palier. A titre d'exemple, dans le cas de paliers à film d'huile certains indicateurs vibratoires permettent d'identifier immédiatement toute amorce d'instabilité de palier ou de frottement au niveau des labyrinthes d'étanchéité, sources potentielles de graves dégradations en matière de surveillance, il y a donc lieu de distinguer deux classes d'indicateurs:

II.1.8.2 – Les indicateurs principaux ou précoces qui permettent d'identifier de manière précoce l'apparition d'anomalies, sources potentielles de pannes à plus ou moins long terme, et d'en suivre l'évolution.

II.1.8.3 – Les indicateurs secondaires ou tardifs pour lesquels une évolution significative traduit déjà des dégradations conséquentes et nécessite un arrêt à brève échéance, voire immédiat, de l'installation.

La première famille d'indicateurs est particulièrement bien adaptée aux concepts et impératifs de la maintenance préventive conditionnelle ou prévisionnelle. Les informations véhiculées par cette catégorie d'indicateurs permettent la détection de défauts à un stade précoce. De ce fait, les informations tirées des signaux émis par une machine en fonctionnement permettent de réduire considérablement le nombre d'arrêts inopinés sur panne et de planifier les interventions nécessaires au mieux des intérêts de la production, notamment

en les intégrant, dans la mesure du possible, dans les arrêts techniques de fabrication. Cette planification se traduit par une réduction sensible des coûts de remise en état et de la durée d'immobilisation de l'équipement et permet d'optimiser à gestion du stock de pièces de rechange.

Il serait cependant peu réaliste et dangereux de penser que la fiabilité d'une surveillance repose uniquement sur le traitement des informations délivrées par des capteurs ou véhiculées par un lubrifiant. L'inspection visuelle régulière d'un parc de machines, qui est en fait la première forme de surveillance apparue, fait partie intégrante de toute stratégie de maintenance et ne saurait être abandonnée dans le cadre d'une maintenance conditionnelle ou prévisionnelle. Dans la plupart des cas, cette forme de surveillance permet de détecter la présence de défauts potentiellement générateurs d'incidents graves à court terme oubliés par les autres techniques de surveillance (fuites de garniture...). Ces oublis peuvent être la conséquence :

- de l'inadaptation des techniques de surveillance retenues à la détection de ce défaut,
- du coût de sa détection,
- de la non-prise en compte, volontaire ou non, de l'éventualité de son apparition. La fiabilité et le coût d'une surveillance dépendent non seulement des techniques de surveillance retenues (analyse des vibrations, thermométrie, thermographie infrarouge, suivi d'évolution des paramètres de fonctionnement, inspection visuelle en fonctionnement, contrôles non destructifs), du nombre et du choix des indicateurs associés à ces techniques, mais aussi de la périodicité de ces contrôles ou inspections.

Nous avons volontairement limité le cadre de cette analyse à la surveillance des machines à partir d'indicateurs issus du mouvement vibratoire d'une ligne d'arbres ou de ses paliers. Cette limitation ne nie nullement l'intérêt que présentent les autres indicateurs de surveillance précédemment évoqués, dont la prise en compte joue souvent un rôle complémentaire important dans la décision d'arrêter une installation.

II.1.9 – Seuil d'un indicateur

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

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

Tout dépassement de seuil doit déclencher la mise en œuvre d'une procédure parfaitement définie comprenant un certain nombre d'opérations (validation de l'alarme, diagnostic plus

élaboré, modification de la périodicité et du mode de surveillance, programmation d'une action corrective, arrêt immédiat de l'installation ...).

Le concept de seuil associé à un indicateur est un des points clés de la surveillance et de la maintenance conditionnelle ou prévisionnelle. Tant que la valeur d'un indicateur n'excède pas une valeur prédéfinie ou seuil, l'installation est considérée en bon état. Aucune investigation complémentaire, arrêt pour inspection ou intervention corrective n'est à envisager.

Le choix de la valeur du seuil est donc un acte fondamental :

- une valeur trop basse entraîne des alarmes non justifiées,
- une valeur trop élevée rend la détection précoce d'un défaut impossible et une panne peut même se produire sans la moindre alarme préalable.

Dans ces deux situations, la surveillance se trouve discréditée.

Les systèmes de surveillance offrent souvent la possibilité de définir au moins deux seuils hiérarchisés : un premier seuil dit seuil d'alarme, un second seuil dit seuil de danger.

II.1.10 – LES NORMES

– La procédure : ISO 2372

Comme l'appareillage dont on dispose est bien normalisé, les mesures de l'intensité vibratoire d'une machine sont prises selon la procédure décrite dans la norme **ISO 2372** [22].

Selon cette norme, l'intensité vibratoire est “ la plus grande des mesures en vitesse vibratoire efficace, dans la gamme de fréquence 10 - 1000 Hz, sur chaque palier, support et bride, dans trois directions perpendiculaires entre elles ” (en général : **horizontale, verticale, axiale**)[21].

Cette norme distingue six groupes de machines. Les critères de distinction sont la puissance, les fondations et la présence d'effets de masse alternatifs non compensables (par exemple pour les machines à piston). Ces groupes sont définis comme suit [21]:

GROUPE I :

Eléments de moteurs ou de machines qui, dans leurs conditions normales de fonctionnement, sont intimement solidaires de l'ensemble d'une machine (par exemples moteurs électriques produits en série, puissance jusqu'à 15 kW).

GROUPE II :

Machines de taille moyenne (en particulier moteurs électriques de puissance comprise entre 15 et 75 kW) sans fondations spéciales. Moteurs montés de façon rigide ou machines (puissance jusqu'à 300 kW) sur fondations spéciales.

GROUPE III :

Moteurs de grandes dimensions et autres grosses machines ayant leurs masses tournantes montées sur des fondations lourdes et relativement rigides dans la direction des vibrations.

GROUPE IV :

Moteurs de grandes dimensions et autres grosses machines ayant leurs masses tournantes montées sur des fondations relativement souples dans la direction des vibrations (par exemple groupes turbogénérateurs, particulièrement ceux qui sont installés sur des fondations légères).

GROUPE V :

Machines et dispositifs mécaniques d'entraînement avec effets d'inertie non équilibrés (dus au mouvement alternatif des pièces), montés sur des fondations relativement rigides dans la direction des vibrations.

GROUPE VI :

Machines et dispositifs mécaniques d'entraînement avec effets d'inertie non équilibrés (dus au mouvement alternatif des pièces), montés sur des fondations relativement souples dans la direction des vibrations. Machines avec masses tournantes accouplées souplement (par exemple arbres de broyeurs). Machines telles que centrifugeuses avec déséquilibres variables, capables de fonctionner isolément, sans l'aide d'éléments de liaison.

Cribles, machines à tester la fatigue dynamique et génératrice de vibrations pour les industries de transformation.

II.1.11 – Normes spécifiques

Outre la norme **ISO 2372**, qui est utilisable en général et pour tous les types de machines dont la vitesse de rotation est comprise entre 10 et 200 tr/s, deux normes apportent plus de précision pour deux catégories de machines.

– **ISO 20816 :**

"Vibrations mécaniques des grandes machines tournantes ayant une fréquence de rotation comprise entre 10 et 200 tours par seconde. Mesurage et évaluation de l'intensité vibratoire in situ."

Elle concerne les machines dont la puissance est supérieure à 300 kW, installées dans leurs conditions de service.

Elle propose des seuils de jugement par classification des supports, en fonction des types de fixation (rigide ou souple), qui déterminent les domaines suivants (**Fig. II.2, Annexe II**).

– **ISO 2954 :**

"Vibrations mécaniques de certaines machines électriques tournantes, de hauteur d'axe comprise entre 80 et 400 mm. Mesurage et évaluation de l'intensité vibratoire."

Elle concerne les machines électriques tournantes alimentées en courant alternatif triphasé ou en courant continu.

Il s'agit d'une norme de réception de machines, utilisable dans l'atelier du constructeur ou du réparateur. Elle propose des seuils de jugement par intensité vibratoire en fonction des hauteurs d'axe et des vitesses de rotation, pour les trois classes de qualité suivantes (**Fig. II.3, Annexe II**)

- N (normale) : Par exemple, moteurs de ventilateurs
- R (réduite) : Par exemple, moteurs de compresseurs centrifuges
- S (spéciale) : Par exemple, moteurs de rectifieuses de précision

– **ISO 20816 :**

"Vibrations mécaniques – Mesurage et évaluation des vibrations de machines" Cette norme a pour objet de préciser les dispositions technologiques imposées dans la conception et la construction des machines auxiliaires embarquées sur le matériel ferroviaire. Elle traite entre autres du comportement vibratoire de ces machines.

Les valeurs efficaces maximales d'intensité vibratoire des machines tournantes auxiliaires sont précisées dans la figure (**Fig. II.4, Annexe II**).

Ces mesures sont effectuées sur les moteurs au droit des paliers. Les valeurs maximales sont mesurées à la vitesse nominale de rotation des machines. Dans le cas de machines à vitesse de rotation variable, une mesure est effectuée sur toute la plage des vitesses de rotation utilisables en régime permanent.

II.1.12 – Seuils de jugement

La norme propose pour chacun des quatre premiers groupes des seuils de jugement qui déterminent les domaines suivants (**Fig. II.1, Annexe II**) [12]:

- Bon
- Admissible
- Encore admissible
- Inadmissible

Ces seuils ne sont qu'une proposition basée sur une statistique regroupant de très nombreuses machines de types très différents. Il est de la responsabilité de l'utilisateur d'affiner ces seuils machine par machine, en fonction de leur historique. Ces seuils pourront ainsi être modifiés à la baisse ou à la hausse.

La norme ne propose aucun seuil de jugement pour les machines des **groupes V et VI**, car ils comprennent les machines alternatives, présentant des comportements très variables en fonction du nombre de cylindres, de l'angle entre ces cylindres et du calage des manetons.

Ces groupes comprennent également des machines à balourd variable ou des machines construites spécialement pour vibrer.

Les seuils de jugement pour les machines des groupes **V** et **VI** ne pourront donc être déterminés que par le constructeur ou l'utilisateur.

II.1.13 – Choix des seuils vibratoires

Les types de seuils vibratoires [23]

- Seuils d'accélération
- Seuils des vitesses axiales et verticales

– Seuils d'accélération

Les seuils d'accélération sont en fonction du nombre de tours par minute et du diamètre de l'arbre en millimètre (**Fig. II.5, Annexe II**).

– Seuils des vitesses axiales et verticales

Les seuils des vitesses axiales sont la moitié des seuils des vitesses verticales (**Fig. II.6, Annexe II**).

II.1.14 – Capteur

II.1.14.1 – Définition

Un capteur est un dispositif qui transforme l'état d'une grandeur physique observée en une grandeur utilisable. En d'autres termes, les capteurs prélèvent une information sur le comportement de la partie opérative et la transforment en une information exploitable par la partie commande (donc sous une forme électrique). Le but étant de faire évoluer le système aux caractéristiques de l'environnement extérieur.

II.1.14.2 – Mode de fixation du capteur

Plusieurs modes de fixation existent, par goujon vissé ou embase collée, par embase magnétique ou par simple pression avec une pointe de touche. Le mode de fixation d'un capteur a une incidence considérable sur la bande passante de ce dernier (**Fig. II.7, Annexe II**) et surtout sur la répétitivité de la mesure qui est le fondement même de la surveillance. Seuls les modes de fixation par goujon vissé ou par embase collée offrent une réelle garantie sur la répétitivité des prises de mesures et une bande passante maximale. Cependant, avec quelques précautions, la fixation par embase magnétique donne des résultats acceptables tout en réduisant sensiblement le temps de collecte. Par contre, l'utilisation d'une pointe de touche offre une mauvaise répétitivité des mesures et une très mauvaise bande passante. Malgré sa facilité de mise en œuvre, cette technique de prise de mesures doit donc vivement être déconseillée [24].

II.2 - LES CONCEPTS DU TRAITEMENT DU SIGNAL

II.2.1- Introduction et généralités sur les signaux

Le traitement du signal est la discipline qui développe et étudie les techniques de traitement, d'analyse et d'interprétation des signaux. Parmi les types d'opérations envisageables sur ces signaux, on peut dénoter le contrôle, le filtrage, la compression de données, la transmission de données, le débruitage, la déconvolution, la prédiction, l'identification, la classification, etc.

Les signaux à traiter peuvent provenir de sources particulièrement diverses, mais la majorité sont des signaux électriques ou devenus électriques avec capteurs et transducteurs

(Microphones, rétines, senseurs thermiques, optiques, de pression, de position, de vitesse, d'accélération et généralement de l'ensemble des grandeurs physiques et chimiques).

Le concept de signal est extrêmement vaste [25]:

- le relevé en fonction du temps de l'actionnement d'un interrupteur ;
- une émission radiophonique ou télévisée ;
- une photographie.

... sont autant de signaux différents.

Un signal y dépend d'une variable x , sous la forme générale :

$$y=S(x)$$

Avec $y \in \mathbb{C}^m$ et $x \in \mathbb{C}^n$.

On se limitera, sauf mention contraire, au cas où $m=1$ et $n=1$. Le cas le plus courant est celui où x est en fait le temps t .

II.2.2 - Les classes de signaux

II.2.2.1 - Temps continu et temps discret

- Dans le premier cas, le signal x est une fonction continue du temps t .

Exemple :

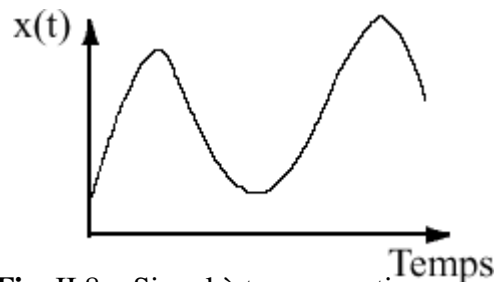


Fig. II.8 – Signal à temps continu

On notera souvent un tel signal sous la forme $x(t)$.

- Dans le deuxième, x n'est défini qu'en un ensemble dénombrable de points.

Exemple :

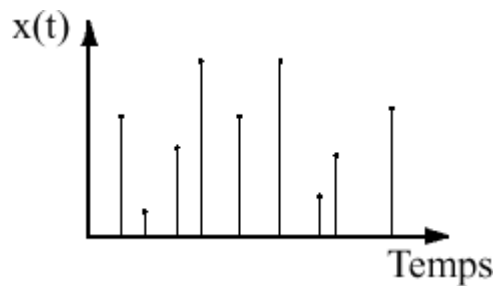


Fig. II.9 – Signal à temps discret

On notera souvent un tel signal sous la forme $x(n)$. Ces points sont souvent répartis à des intervalles de temps réguliers.

II.2.2.2 - Variables continues et variables discrètes

– Dans le premier cas, le signal x peut prendre toutes les valeurs possibles dans un ensemble de définition donné (exemple] $-\infty; +\infty$ [ou \mathbb{C}). Un tel signal est également appelé **analogique** en référence à l'électronique.

– Dans le deuxième, le signal x ne peut prendre qu'un ensemble dénombrable de valeurs. Un tel signal est également appelé **numérique** en référence à l'électronique.

Exemple :

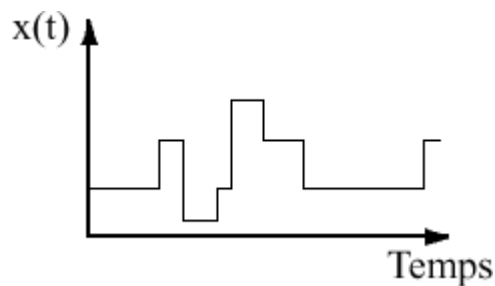


Fig. II.10 – Signal à valeurs discrètes

Notez que les quatre combinaisons sont possibles : les figures (**Fig. II.8**, **Fig. II.9** et **Fig. II.10**) donnent ainsi respectivement un exemple de signal analogique à temps continu, de signal analogique à temps discret, et de signal numérique à temps continu.

II.2.2.3 - Signaux périodiques et signaux apériodiques

Un signal périodique $x(t)$ est une fonction du temps qui satisfait la condition [26]

$$x(t) = x(t + T) \text{ Pour tout } t \dots\dots\dots(2.15)$$

T est une constante positive. Il est évident que si la condition est satisfaite pour $T = T_0$, elle est aussi satisfaite pour $T = 2T_0$, $T = 3T_0$; $T = 4T_0$.

La valeur la plus petite de T qui satisfait l'équation de définition est appelée (période fondamentale) de $x(t)$.

La période fondamentale de T définit donc la durée d'un cycle complet de $x(t)$. L'inverse de la période fondamentale est appelé (la fréquence fondamentale) du signal périodique $x(t)$; elle d'écrit combien de fois le signal périodique se reproduit par seconde.

On peut donc écrire formellement

$$f = \frac{1}{T} \dots \dots \dots (2.16)$$

La fréquence est mesurée en hertz (Hz) ou en cycles par seconde.

La fréquence angulaire (ou pulsation), mesurée en radians par seconde, est définie par

$$\omega = 2\pi f = 2\pi / T \dots \dots \dots (2.17)$$

II.2.3 - Energie, puissance

II.2.3.1 - Définitions

a) **Energie:** soit un signal $x(t)$ à temps continu, tel que $\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt$ existe et converge. Alors le signal est dit à *énergie finie* et la valeur de cette intégrale est appelée énergie du signal x [29,31]:

$$E_x \triangleq \int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt \dots \dots \dots (2.18)$$

b) **Puissance:** pour le même type de signaux, on définit également la *puissance*, notée P_x par:

$$P_x \triangleq \lim_{\theta \rightarrow +\infty} \frac{1}{2\theta} \int_{-\theta}^{+\theta} |x(t)|^2 dt \dots \dots \dots (2.19)$$

II.2.3.2 - Remarques

1. Pour un signal périodique, l'intégrale 2.18 ne converge pas. On peut néanmoins définir la puissance d'un signal x T -périodique par :

$$P_x \triangleq \frac{1}{T} \int_{(T)} |x(t)|^2 dt$$

2. Il existe des signaux ni périodiques, ni d'énergie finie, pour lesquels la puissance ne peut être définie, comme par exemple la "rampe" $x(t)=t$.

3. Il s'agit là de définitions mathématiques. En pratique, un signal mesuré ne l'est *jamais* sur un intervalle de temps infini. Par exemple, on peut commencer à visualiser un signal à un instant qu'on prendra comme origine des temps, et dans ce cas on arrêtera son examen au bout d'un temps T_{obs} . Comme on ne *sait* pas ce que ce signal était avant qu'on ne l'observe, ni ce qu'il deviendra après, il serait présomptueux d'utiliser les bornes $-\infty$ et $+\infty$ dans l'intégrale 2.18, et on se limitera donc à l'écrire sous la forme $\int_0^{T_{obs}} |x(t)|^2 dt$.

Remarquons d'ailleurs que cette dernière intégrale converge toujours.

II.2.4 - La Transformée de Fourier

II.2.4.1- Généralités

Cet outil fut introduit pour la première fois par le physicien français Joseph Fourier, pour ses travaux sur la conduction de la chaleur au XIX^e siècle. Depuis lors, il a longuement été développé, et des extensions en ont été proposées. Il existe plusieurs sortes de Transformées de Fourier, chacune adaptée aux classes de signaux qu'elle analyse, ou au type de signal qu'elle génère. On dénombre ainsi :

- une transformée continue pour les signaux à temps continu : la Transformée de Fourier à proprement parler ;
- une transformée continue pour les signaux à temps discret : la Transformée de Fourier à temps discret ;
- une transformée discrète pour les signaux périodiques à temps continu : le développement en série de Fourier, ou Transformée de Fourier au sens des distributions ;
- une transformée discrète pour les signaux à temps discret : la Transformée de Fourier Discrète.

Nous allons nous limiter, pour l'établissement des propriétés, à la Transformée de Fourier continue des signaux à temps continu.

II.2.4.2 - Définitions

- a) **Transformée de Fourier** : soit un signal $x(t)$ à temps continu, tel que $\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)| dt$ converge. On définit alors la **transformée de Fourier** de x , notée $X(\nu)$ ou **TF**[$x(t)$], par [28,31]:

$$X(\nu) \triangleq \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi\nu t} dt \dots\dots\dots(2.20)$$

Où j est tel que $j^2 = -1$. La transformée de Fourier permet de mesurer le "contenu fréquentiel" d'un signal, à savoir la manière dont on peut le décomposer en une somme de sinusoïdes de fréquences ν .

- b) **Transformée de Fourier inverse**: si de plus x est à *énergie finie*, cette relation est inversible en [28]

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(\nu) e^{+j2\pi\nu t} d\nu \dots\dots\dots(2.21)$$

L'opération correspondante est appelée transformation de Fourier inverse : elle permet de revenir au signal temporel x à partir de son contenu fréquentiel.

Ces deux définitions permettent de disposer de deux manières de définir complètement un signal qui satisfait aux conditions d'irréversibilité de la transformée de Fourier. On peut le définir :

- soit par sa représentation temporelle ;
- soit par sa représentation fréquentielle.

Ces deux domaines sont souvent appelés "duaux" car leurs variables t et f sont liées par

$$f = \frac{1}{t} .$$

c) **Spectre** : on appelle spectre de x le **module** de la transformée de Fourier de x :

$$S(\nu) = |X(\nu)|$$

Remarque importante : La notation $TF[x(t)]$ est abusive, puisqu'il faudrait plutôt écrire $TF[x]$, l'opérateur TF s'appliquant à la fonction x , et non au réel $x(t)$. Elle sera néanmoins utilisée tout au long de ce cours, pour des raisons de facilité de notation.

II.2.4.3 - Propriétés

Pour toutes les démonstrations suivantes, les signaux x et y sont d'intégrales absolument convergentes. On notera indifféremment $X(\nu)$ et $TF_x(\nu)$ la transformée de Fourier du signal x .

II.2.4.4 - Linéarité

Soient λ et μ deux nombres complexes quelconques. La linéarité de l'équation 2.20 entraîne facilement que :

$$TF(\lambda x + \mu y) = \lambda TF(x) + \mu TF(y) \dots \dots \dots (2.23)$$

II.2.4.5 - Décalage en temps/fréquence

Soit t_0 un réel strictement positif. Calculons $TF[x(t - t_0)]$:

$$TF[x(t - t_0)] = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t - t_0) e^{-j2\pi\nu t} dt$$

On effectue le changement de variable $u = t - t_0$, et il vient:

$$TF[x(t - t_0)] = \int_{-\infty}^{+\infty} x(u) e^{-j2\pi\nu(u+t_0)} du$$

D'où:

$$TF[x(t - t_0)] = e^{-j2\pi\nu t_0} \int_{-\infty}^{+\infty} x(u) e^{-j2\pi\nu u} du$$

et donc:

$$TF[x(t - t_0)] = e^{-j2\pi\nu t_0} X(\nu) \dots \dots \dots (2.24)$$

Par symétrie dans les relations 2.20 et 2.21, on obtient de même :

$$\text{TF}[e^{+j2\pi\nu_0 t} x(t)] = X(\nu - \nu_0) \dots\dots\dots(2.25)$$

II.2.4.6 - Dérivation

On note $x'(t) = dx/dt$. Alors :

$$\text{TF}[x'(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} x'(t)e^{-j2\pi\nu t} dt$$

On effectue une intégration par parties en intégrant $x'(t)$ et en dérivant l'exponentielle complexe. On obtient alors:

$$\text{TF}[x'(t)] = [x(t)e^{-j2\pi\nu t}]_{-\infty}^{+\infty} + j2\pi\nu \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j2\pi\nu t} dt$$

Comme x est, physiquement, nécessairement nul à $\pm\infty$, et que l'exponentielle complexe y reste bornée, le premier terme de la somme devient nul et donc :

$$\text{TF}[x'(t)] = j2\pi\nu X(\nu) \dots\dots\dots(2.26)$$

II.2.4.7 - Dilatation en temps/fréquence

Soit λ un réel non nul. Calculons $\text{TF}[x(\lambda t)]$:

$$\text{TF}[x(\lambda t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\lambda t)e^{-j2\pi\nu t} dt$$

Effectuons le changement de variable $u = \lambda t$. Deux cas se présentent alors :

— Soit $\lambda > 0$; alors

$$\text{TF}[x(\lambda t)] = \frac{1}{\lambda} \int_{-\infty}^{+\infty} x(u)e^{-j2\pi\frac{\nu}{\lambda}u} du$$

et donc

$$\text{TF}[x(\lambda t)] = \frac{1}{\lambda} X\left(\frac{\nu}{\lambda}\right) \text{ avec } \lambda > 0 \dots\dots\dots(2.27)$$

— Soit $\lambda < 0$; alors

$$\text{TF}[x(\lambda t)] = \frac{1}{\lambda} \int_{+\infty}^{-\infty} x(u)e^{-j2\pi\frac{\nu}{\lambda}u} du = -\frac{1}{\lambda} \int_{-\infty}^{+\infty} x(u)e^{-j2\pi\frac{\nu}{\lambda}u} du$$

et donc

$$\text{TF}[x(\lambda t)] = -\frac{1}{\lambda} X\left(\frac{\nu}{\lambda}\right) \text{ avec } \lambda < 0 \dots\dots\dots(2.28)$$

Remarque : si on applique la formule 2.28 en posant $\lambda = -1$, on obtient

$\text{TF}[x(-t)] = X(-\nu)$. On en déduit donc que la parité de la Transformée de Fourier est la même que celle du signal original.

II.2.4.8 - Conjugaison complexe

On note x^* le signal conjugué de x . Calculons $TF[x^*(t)]$:

$$TF[x^*(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} x^*(t) e^{-j2\pi vt} dt = \left(\int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{+j2\pi vt} dt \right)^*$$

et donc :

$$TF[x^*(t)] = X^*(-\nu) \dots\dots\dots(2.29)$$

Remarque : Si x est un signal réel, alors $x(t) = x^*(t)$, donc 1

$$X(\nu) = X^*(-\nu) .$$

Si de plus x est pair (ou impair), alors $x(t) = x(-t)$ (respectivement $x(t) = -x(-t)$), il vient $X^*(-\nu) = X^*(\nu)$ (respectivement $X^*(-\nu) = -X^*(\nu)$), d'où $X(\nu) = X^*(\nu)$ et X est réelle (respectivement imaginaire pure). En définitive, on obtient le tableau récapitulatif suivant :

Tab. II.1 : tableau récapitulatif des signaux Pair et Impair

Signal x	Pair	Impair
Réel	X réelle paire	X imaginaire pure Impaire
Imaginaire	X imaginaire pure paire	X réelle impaire

II.2.4.9 - Convolution de deux signaux

Définition : Soit $x(t)$ et $y(t)$ deux signaux de la variable réelle t . On appelle produit de convolution ou convolution de $x(t)$ par $y(t)$ l'opération notée $(x * y)(t)$ (on note plus souvent, mais de façon impropre $x(t) * y(t)$) et définie par [15,18] [28,31]:

$$(x * y)(t) \triangleq \int_{-\infty}^{+\infty} x(\theta)y(t - \theta)d\theta \dots\dots\dots (2.30)$$

On vérifie aisément que $(x * y)(t) = (y * x)(t)$, c'est-à-dire que la convolution est *commutative*, par :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x(\theta)y(t - \theta)d\theta = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t - \theta)y(\theta)d\theta \dots\dots\dots (2.31)$$

Transformée de Fourier : calculons $TF[(x * y)(t)]$:

$$TF[(x * y)(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} x(\theta)y(t - \theta)d\theta \right) e^{-j2\pi vt} dt$$

Ou :

$$\text{TF}[(x * y)(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x(\theta)y(t - \theta)e^{-j2\pi\nu t} d\theta dt$$

On écrit $e^{-j2\pi\nu t} = e^{-j2\pi\nu(t-\theta)} e^{-j2\pi\nu\theta}$ et on obtient, en regroupant :

$$\text{TF}[(x * y)(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} y(t - \theta)e^{-j2\pi\nu(t-\theta)} dt \right) x(\theta)e^{-j2\pi\nu\theta} d\theta$$

Dans l'intégrale centrale, on effectue le changement de variable $u = t - \theta$; il vient alors :

$$\text{TF}[(x * y)(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} y(u)e^{-j2\pi\nu(u)} du \right) x(\theta)e^{-j2\pi\nu\theta} d\theta$$

On peut ensuite séparer les variables, et on obtient :

$$\text{TF}[(x * y)(t)] = \left(\int_{-\infty}^{+\infty} y(u)e^{-j2\pi\nu(u)} du \right) \left(\int_{-\infty}^{+\infty} x(\theta)e^{-j2\pi\nu\theta} d\theta \right)$$

Et donc :

$$\text{TF}[(x * y)(t)] = X(\nu)Y(\nu) \dots\dots\dots (2.32)$$

Par symétrie dans les relations 2.20 et 2.21, on obtient de même :

$$\text{TF}[(x \cdot y)(t)] = (X * Y)(\nu) \dots\dots\dots (2.33)$$

La transformée de Fourier de la convolution de deux signaux est le produit de leurs transformées de Fourier, et la transformée de Fourier inverse d'une convolution de deux TF est le produit des deux transformées de Fourier inverses.

II.2.5 - Représentation de Fourier des signaux d'énergie infinie

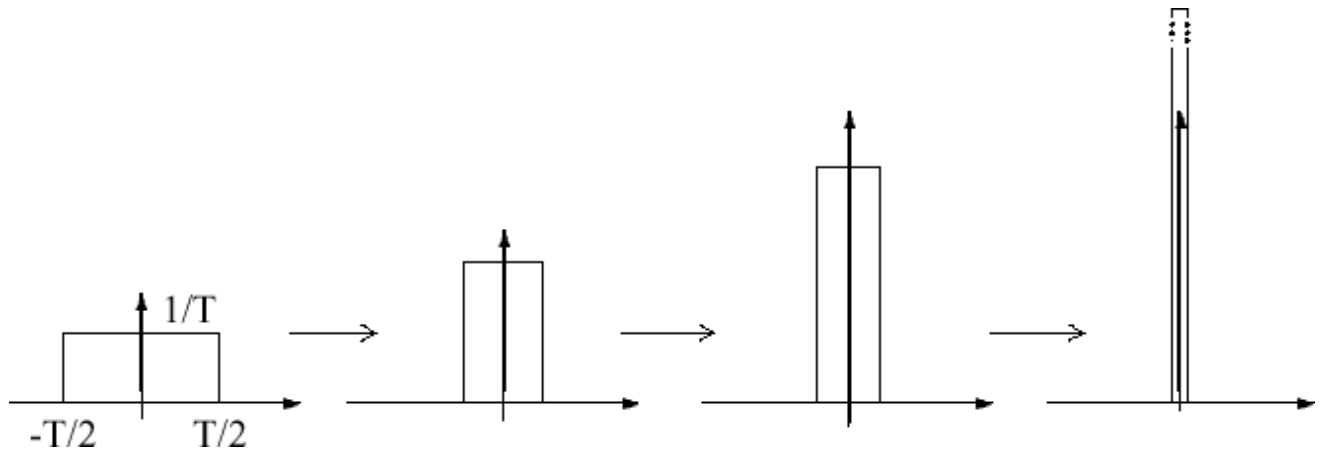
Les signaux d'énergie infinie sont ceux pour lesquels l'intégrale 2.18 ne converge pas.

II.2.5.1 - Impulsion de Dirac

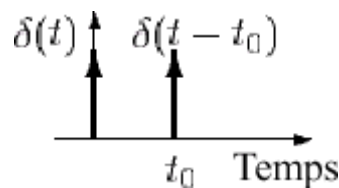
Définition : on introduit $\delta(t)$, noté *impulsion de Dirac* (ou pic de Dirac), défini par sa transformée de Fourier, tel que [29]:

$$\text{TF}[\delta(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) dt = 1 \dots\dots\dots (2.34)$$

où **1** désigne la fonction uniformément égale à 1 sur \mathbb{R} . Plus "physiquement", δ est la limite quand $T \rightarrow 0$ du signal suivant :



On représente graphiquement cette impulsion ainsi :



Propriétés : soit x un signal à temps continu, d'énergie finie.

1. Calculons $TF[x(t)\delta(t)]$: il s'agit de la transformée de Fourier d'un produit, donc en appliquant la formule 2.33, le résultat est la convolution des deux transformées de Fourier :

$$TF[x(t)\delta(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} X(v') 1(v - v') dv' = \int_{-\infty}^{+\infty} X(v') dv'$$

On écrit, $1 = e^{+j2\pi v'0}$ et on obtient :

$$TF[x(t)\delta(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} X(v') e^{+j2\pi v'0} dv'$$

Or le membre de droite n'est autre que la valeur prise par $x(t)$ en $t = 0$. IL vient donc:

$$TF[x(t)\delta(t)](v) = x(0) \dots \dots \dots (2.35)$$

En particulier, pour $v = 0$, on obtient facilement :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\delta(t) dt = x(0) \dots \dots \dots (2.36)$$

En généralisant, on obtient également facilement par un changement de variable :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\delta(t - t_0) dt = x(t_0) \dots \dots \dots (2.37)$$

2. Calculons également $(x * \delta)(t)$:

$$(x * \delta)(t) = \text{TF}^{-1}[\text{TF}(x * \delta)] = \text{TF}^{-1}[X(v) \cdot 1] = \text{TF}^{-1}[X(v)] = x$$

L'impulsion de Dirac est donc l'élément neutre de la convolution.

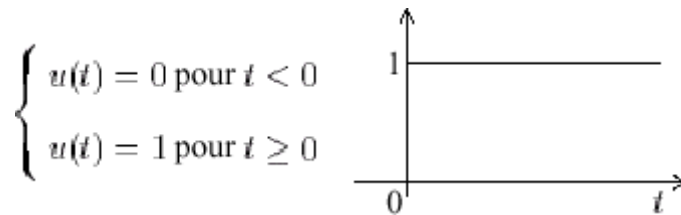
3. La définition 2.34 se traduit par :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} e^{+j2\pi vt} dv = \delta(t)$$

mais également par symétrie entre les relations 2.20 et 2.21, par :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j2\pi vt} dt = \delta(v) \dots\dots\dots (2.38)$$

4. Impulsion de Dirac et échelon de Heaviside. L'échelon de Heaviside est défini par :



Soient a et b deux réels non nuls, $b > a$. Calculons $I = \int_a^b u'(t)x(t)dt$:

$$\int_a^b u'(t)x(t)dt = [u(t)x(t)]_a^b - \int_a^b u(t)x'(t)dt$$

en utilisant une intégration par parties.

Trois cas se présentent alors:

1. $a > 0$ et $b > 0$: alors $u(b) = u(a) = 1$, et

$$I = u(b)x(b) - u(a)x(a) - [x(b) - x(a)] = 0$$

2. $a < 0$ et $b < 0$: alors $u(b) = u(a) = 0$, et

$$I = 0 - 0 + \int_a^b 0 \cdot x(t)dt = 0$$

3. $a < 0$ et $b > 0$: alors $u(b) = 1$ et $u(a) = 0$, et

$$I = x(b) - \int_0^b x'(t)dt = x(b) - [x(b) - x(0)] = x(0)$$

4. Cette relation devant être vérifiée quels que soient a et b , on obtient :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} u'(t)x(t)dt = x(0)$$

En comparant avec la relation 2.36, et ces égalités devant être vérifiées quel que soit le signal x , il vient donc que

$$u'(t) = \delta(t) \dots\dots\dots (2.39)$$

La dérivée de l'échelon de Heaviside est l'impulsion de Dirac.

II.2.5.2 - Spectre des signaux périodiques :

Soit $x(t)$ un signal à temps continu, de période T . On *admet* que $x(t)$ est "développable en série de Fourier" sous la forme :

$$x(t) = \sum_{n \in \mathbb{N}} x_n e^{j2\pi n \frac{t}{T}} \dots\dots\dots (2.40)$$

avec

$$x_n = \frac{1}{T} \int_{(T)} x(t) e^{-j2\pi n \frac{t}{T}} dt \dots\dots\dots (2.41)$$

Pour un signal x impair, son développement en série de Fourier se simplifie en

$$x(t) = \sum_{n \in \mathbb{N}} \alpha_n \sin\left(2\pi n \frac{t}{T}\right)$$

Si x est pair, on peut de même écrire

$$x(t) = \sum_{n \in \mathbb{N}} \alpha_n \cos\left(2\pi n \frac{t}{T}\right)$$

Dans les deux cas, le coefficient α_1 est " l'amplitude du fondamental" et pour $n > 1$ les coefficients α_n sont les amplitudes des "harmoniques". On peut alors définir le "*taux d'harmoniques*" τ par

$$\tau = \frac{\alpha_1}{\sum_{n>1} \alpha_n}$$

Calculons la transformée de Fourier de x :

$$X(\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi \nu t} dt = \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\sum_{n \in \mathbb{Z}} x_n e^{j2\pi n \frac{t}{T}} \right) e^{-j2\pi \nu t} dt$$

En admettant la validité de la permutation des symboles de somme et d'intégration, on obtient :

$$X(\nu) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} x_n \left(\int_{-\infty}^{+\infty} e^{j2\pi n \frac{t}{T}} e^{-j2\pi \nu t} dt \right) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} x_n \left(\int_{-\infty}^{+\infty} e^{j2\pi \left(\frac{n}{T} - \nu\right) t} dt \right)$$

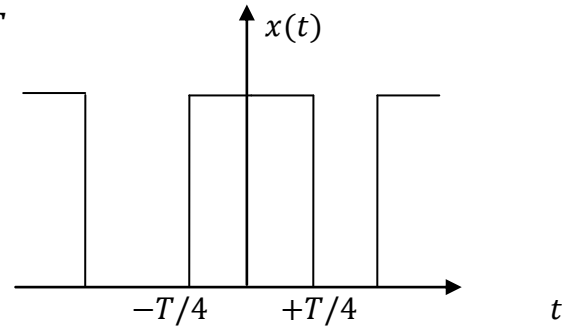
Or la relation 2.38 donne $\int_{-\infty}^{+\infty} e^{j2\pi \left(\frac{n}{T} - \nu\right) t} dt = \delta\left(\nu - \frac{n}{T}\right)$ donc :

$$X(\nu) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} x_n \delta\left(\nu - \frac{n}{T}\right) \dots\dots\dots (2.42)$$

Exemple : cas d'un signal carré

On considère le signal T -périodique $x(t)$ tel que :

$$\begin{cases} x(t) = 1 & \text{pour } -T/4 < t < +T/4 \\ x(t) = 0 & \text{pour } +T/4 < t < T \end{cases}$$



On a alors

$$x_n = \frac{1}{T} \int_{(T)} x(t) e^{-j2\pi n \frac{t}{T}} dt = \frac{1}{T} \int_{-T/4}^{+T/4} e^{-j2\pi n \frac{t}{T}} dt = \frac{-1}{j2\pi n} (e^{-jn\pi/2} - e^{+jn\pi/2}) = \frac{1}{\pi n} \sin \frac{\pi}{2}$$

En remarquant que seuls les termes d'ordre n impair sont non nuls, et en écrivant dans ce cas $n = 2k + 1$, on obtient

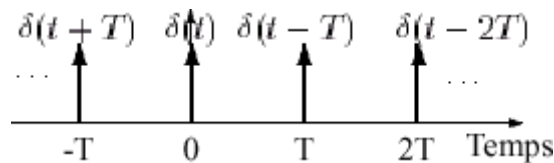
$$X(v) = \frac{1}{\pi} \sum_{k \in \mathbb{Z}} \frac{(-1)^k}{2k + 1} \delta \left(v - \frac{n}{T} \right)$$

II.2.5.3 - Cas particulier : peigne de Dirac

Définition : on définit le *peigne de Dirac* de période par la relation suivante [29]:

$$\delta_T(t) \triangleq \sum_{n \in \mathbb{Z}} \delta(t - nT) \dots\dots\dots (2.43)$$

Il se représente graphiquement comme suit :



Propriété : le peigne de Dirac est un signal périodique, de période « T » il est donc "développable en série de Fourier" :

$$\delta_T(t) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} \delta_n e^{j2\pi n \frac{t}{T}}$$

Chacun des coefficients δ_n vaut en vertu de la formule 2.41 :

$$\delta_n = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} \delta_T(t) e^{-j2\pi n \frac{t}{T}} dt$$

soit :

$$\delta_n = \frac{1}{T} \sum_{n \in \mathbb{Z}} \int_{-T/2}^{+T/2} \delta(t - nT) e^{-j2\pi n \frac{t}{T}} dt$$

Dans cette somme infinie, seul le terme pour $n=0$ est non nul (les autres " $\delta(t - nT)$ " sont nuls sur l'intervalle $[-T/2; +T/2]$). Il vient donc :

$$\delta_n = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} \delta(t) e^{-j2\pi n \frac{t}{T}} dt$$

Et en utilisant la formule 2.36 il vient

$$\delta_n = \frac{1}{T}$$

En notant $\Delta_T(\nu)$ la transformée de Fourier du peigne δ_T , il vient donc :

$$\delta_T(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Delta_T(\nu) e^{j2\pi\nu t} d\nu = \frac{1}{T} \sum_{n \in \mathbb{Z}} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(\nu - \frac{n}{T}) e^{j2\pi\nu t} d\nu \right)$$

On peut alors retenir le résultat suivant :

La transformée de Fourier d'un peigne de Dirac (en temps) est un peigne de Dirac (en fréquence).

Corollaire : Autre formule du peigne de Dirac.

Utilisons la relation 2.21 de la transformée de Fourier inverse :

$$\delta_T(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Delta_T(\nu) e^{j2\pi\nu t} d\nu = \frac{1}{T} \sum_{n \in \mathbb{Z}} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(\nu - \frac{n}{T}) e^{j2\pi\nu t} d\nu \right)$$

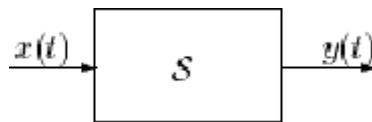
On applique alors la propriété 2.38, et il vient :

$$\delta_T(t) = \frac{1}{T} \sum_{n \in \mathbb{Z}} e^{+j2\pi \frac{n}{T} t}$$

II.2.6 - Notion de filtre linéaire

II.2.6.1 Linéarité:

Un système fait subir une transformation à un signal d'entrée $x(t)$ et délivre un signal de sortie $y(t)$



On appelle filtre, d'entrée $x(t)$ et sortie $y(t)$, un système défini par [27]:

- Si on est à temps continu :

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t, \theta) x(\theta) d\theta \dots\dots\dots(2.44)$$

- Si on est à temps discret :

$$y(n) = \sum_{m \in \mathbb{Z}} h(n, m)x(m)$$

h , Réponse impulsionnelle du système. En effet, en étudiant la réponse du système à une impulsion, dans le cas par exemple de signaux à temps continu, avec par exemple une impulsion retardée d'un temps τ $x(t) = \delta(t - \tau)$, on obtient facilement en utilisant la formule 2.37 :

$$y(t, \tau) = h(t, \tau)$$

A priori, la réponse du système dépend donc du moment de l'excitation.

Par la suite, on se limitera une fois encore aux signaux à temps continu pour l'établissement des équations.

II.2.6.2 - Invariance

Comme il a été souligné dans le paragraphe précédent, la réponse du système dépend *a priori* de l'instant où il est excité. L'invariance est la traduction du fait que l'on désire que cette réponse ne dépende plus de cet instant. Autrement dit, si $y(t)$ est la réponse au signal $x(t)$, alors que si l'entrée $x(t)$ est retardée de τ , la sortie a aussi un retard [14], le signal $x(t - \tau)$ doit entraîner la réponse $y(t - \tau)$.

Soit donc le signal $x_1(t)$; son image par le système S est le signal $y_1(t)$. On considère le signal $x_2(t) = x_1(t - \tau)$ (il s'agit du signal x_1 retardé du temps τ) ; son image est le signal $y_2(t)$. On cherche à avoir $y_2(t) = y_1(t - \tau)$. Traduisons cette égalité en utilisant la relation 2.44 :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} h(t, \theta)x_2(\theta)d\theta = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t - \tau, \theta)x_1(\theta)d\theta$$

Soit :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} h(t, \theta)x_1(\theta - \tau)d\theta = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t - \tau, u)x_1(u)du$$

On effectue dans la première intégrale le changement de variable $u = \theta - \tau$; il vient alors :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} h(t, u + \tau)x_1(u)du = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t - \tau, u)x_1(u)du$$

Cette égalité devant être vérifiée quel que soit le signal $x_1(t)$, on a donc nécessairement, quels que soient t, τ, u :

$$h(t, \tau + u) = h(t - \tau, u)$$

En particulier, pour $u=0$, on obtient :

$$h(t, \tau) = h(t - \tau, 0)$$

La fonction de *deux* variables $h(t, \theta)$ peut donc se mettre sous la forme d'une fonction de la *différence* de ces deux variables. Par la suite, pour un système linéaire invariant, nous écrivons donc plus simplement $h(t, \theta) = h(t - \theta)$. En remplaçant dans l'équation 2.44, on obtient:

$$S \text{ est un système linéaire invariant} \Leftrightarrow y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t - \theta)x(\theta)d\theta \dots\dots\dots(2.45)$$

Soit, plus simplement, en comparant avec la relation 2.30 :

$$S \text{ est un système linéaire invariant} \Leftrightarrow y(t) = (h * x)(t)$$

La réponse d'un système linéaire invariant à une entrée quelconque est la *convolution* de cette entrée par la réponse impulsionnelle du système.

II.2.6.3 - Fonction de transfert

Soit S un système linéaire invariant, et h sa réponse impulsionnelle. Appliquons à l'entrée de S le signal $x(t) = x_0 e^{st}$, avec $s \in \mathbb{C}$. En utilisant la relation 2.45, il vient :

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t - \theta)x_0 e^{j\theta} d\theta$$

Soit encore, en utilisant la commutativité de la convolution, formule 2.31 :

$$y(t) = x_0 \int_{-\infty}^{+\infty} h(\theta)e^{j(t-\theta)} d\theta$$

On peut alors "sortir" e^{st} de l'intégrale :

$$y(t) = (x_0 e^{jt}) \cdot \left(\int_{-\infty}^{+\infty} h(\theta)e^{-j\theta} d\theta \right)$$

Le premier terme du produit est en fait $x(t)$. Le deuxième terme du produit ne dépend pas du temps, mais seulement de la variable s . Pour les mathématiciens, ces deux remarques se traduisent par la constatation que les signaux de la forme e^{st} sont des *signaux propres* du système S . On note le deuxième terme $H(s)$:

$$H(s) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\theta)e^{-j\theta} d\theta$$

$H(s)$ est appelée fonction de transfert de S . Dans le cas particulier où $s = j2\pi\nu$, on reconnaît dans l'expression précédente la transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle h , et on parle alors de la *fonction de transfert en régime harmonique*.

La fonction de transfert en régime harmonique est la transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle, soit :

$$H(\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\theta)e^{-j2\pi\nu\theta} d\theta \dots\dots\dots(2.46)$$

Fonction de transfert et représentation complexe : On a démontré que pour un système

linéaire invariant S , de fonction de transfert $H(s)$ dans le cas où l'entrée était de la forme $x(t) = x_0 e^{st}$, on avait la relation suivante entre l'entrée x et la sortie y : $y(t) = H(s)x(t)$. Lorsque l'on utilise la représentation complexe, en écrivant $x_0 e^{j\omega t}$, la relation qui apparaît lie directement les représentations complexes de l'entrée et de la sortie, et la fonction de transfert en régime harmonique :

$$y(t) = y_0 e^{j\omega t} = x_0 e^{j\omega t} H(j\omega) = x(t)H(j\omega)$$

Chapitre III

Les concepts des lois de probabilité

utilisées en fiabilité

Introduction

L'analyse de la fiabilité constitue une phase indispensable dans toute étude de sûreté de fonctionnement. A l'origine, la fiabilité concernait les systèmes à haute technologie (centrales nucléaires, aérospatial). Aujourd'hui, la fiabilité est devenue un paramètre clé de la qualité et d'aide à la décision, dans l'étude de la plupart des composants, produits et processus "grand public": Transport, énergie, bâtiments, composants électroniques, composants mécaniques....

De nombreux industriels travaillent à l'évaluation et l'amélioration de la fiabilité de leurs produits au cours de leur cycle de développement, de la conception à la mise en service (conception, fabrication et exploitation) afin de développer leurs connaissances sur le rapport Coût/Fiabilité et maîtriser les sources de défaillance.

L'analyse de la fiabilité dans le domaine de la mécanique est un outil très important pour caractériser le comportement du produit dans les différentes phases de vie, mesurer l'impact des modifications de conception sur l'intégrité du produit, qualifier un nouveau produit et améliorer ses performances tout au long de sa mission [32].

III.1 – Définition de la fiabilité

D'après la norme NF X06-501, la fiabilité est la caractéristique d'un dispositif exprimée par la probabilité que le dispositif accomplisse une fonction requise dans des conditions d'utilisations données et pour une période déterminée, dénoté $R(t)$ [33].

III.2 – Définition de la probabilité:

C'est une quantité indiquant, sous forme de fraction ou de pourcentage, le nombre de chances qu'a un événement de se produire sur un nombre total d'essais ou de tentatives. R est donc un nombre compris entre 0 et 1. Ex: pour une fiabilité $R = 0,85$ après 1000 heures de travail => Une installation aura 85 % de chance de fonctionner correctement pendant 1000 heures.

III.3 – Définition des paramètres nécessaires à la mesure de la fiabilité

III.3.1 – Variable aléatoire

On appelle variable aléatoire X une variable telle que chaque valeur x de X on puisse associer une probabilité. La correspondance entre une variable aléatoire et la probabilité qui lui est associée établit une loi de probabilité [33].

Deux types de variables aléatoires:

- Une variable aléatoire est dite continue lorsque l'ensemble image de X est non dénombrable. Ex : un intervalle de temps entre deux défaillances consécutives d'un matériel.
- Une variable aléatoire est dite discrète lorsque l'ensemble image de X est fini ou dénombrable [34].

Ex : nombre de défaillances d'un matériel sur une période donnée ou pour une quantité fabriquée.

III.3.2 – Densité de probabilité

En fiabilité elle est généralement notée $f(t)$ et représente la probabilité de défaillance juste au temps (t) .

III.3.3 – Fonction de répartition

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt \dots \dots \dots (3.1)$$

En fiabilité elle est généralement notée $F(t)$ et représente la probabilité de défaillance dans l'intervalle de temps de $[0, t]$.

III.3.4 – Fonction de fiabilité

$$R(t) = 1 - F(t) \dots \dots \dots (3.2)$$

En fiabilité elle est généralement notée $R(t)$ et représente la probabilité de non-défaillance dans l'intervalle de temps de $[0,t]$, c'est-à-dire la probabilité de défaillance au-delà du temps (t) . C'est la fonction complémentaire de la fonction de répartition.

III.3.5 – Fonction du taux de défaillance ou taux d'avarie

Elle est généralement notée $\lambda(t)$ et représente la probabilité de défaillance à $t + \Delta t$ donc encore au bon fonctionnement à (t) (**Fig. III.1**). $\lambda(t)$ est une densité de probabilité conditionnelle car elle ne considère que la probabilité de défaillance du matériel encore en fonctionnement. Ce taux de défaillance est également appelé taux de mortalité instantanée.

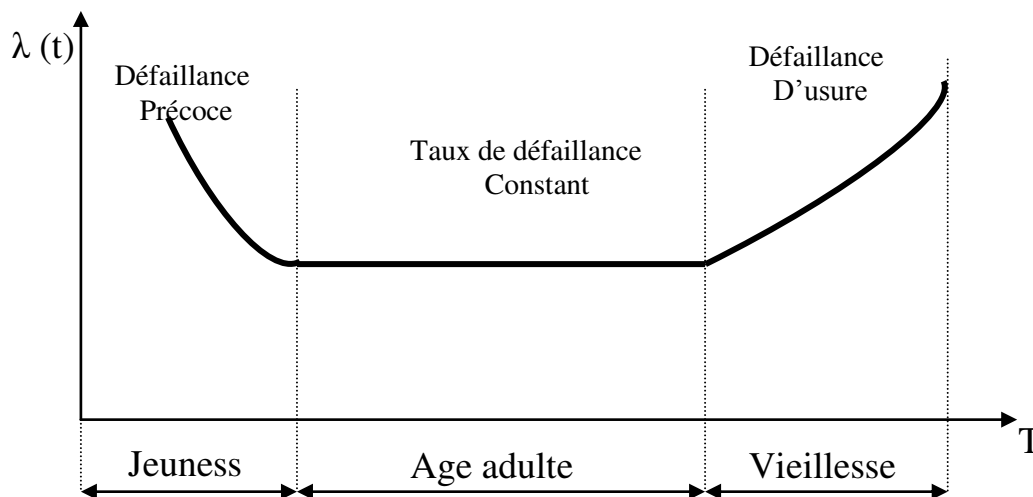


Fig. III.1 Courbe en baignoire

L'axe des abscisses peut représenter une période, un cycle, une quantité de produit fabriqué, une distance parcourue, etc.

III.3.6 – M.T.B.F « Mean Time Between Failures »

La MTBF est souvent traduit comme étant la moyenne des temps de bon fonctionnement, mais en réalité il représente la moyenne des temps entre deux défaillances.

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t)dt \dots\dots\dots(3.3)$$

III.3.7 – Le taux moyen de défaillance

$$\frac{1}{MTBF} \text{taux de défaillance ramené à l'unité de temps.}$$

III.4 – Les principales lois de probabilités utilisées en fiabilité

Dans ce paragraphe, nous présenterons quelques distributions de vie qui interviennent le plus fréquemment dans l'analyse de la fiabilité dans le domaine mécanique.

Les lois discrètes : la loi Binomiale et la loi de Poisson.

Les lois continues : la loi de Weibull, la loi exponentielle, la loi normale et la loi log-normale.

Quelque soit la loi de distribution utilisée, il sera nécessaire de procéder avec méthode.

III.4.1 – Lois discrètes

III.4.1.1 – la loi Binomiale

Si une défaillance a une probabilité (p) de survenir, la probabilité de la voir apparaître (k) fois en (n) essais est :

$$\text{Prob}(X = k) = C_n^k \cdot p^k \cdot (1 - p)^{n-k} \dots\dots\dots (3.4)$$

avec $C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}$

$\text{Prob}(X = k) \longrightarrow$ Probabilité pour que la défaillance se produise (k) fois.

$p \longrightarrow$ Probabilité pour que la défaillance se produise au cours d'un seul essai.

$C_n^k \longrightarrow$ Nombre de combinaisons de (k) défaillances pris parmi (n) essais.

a) Remarques :

1) - un dispositif a une probabilité (p) d'être défaillant donc (1 - p) d'être au bon fonctionnement.

2) - Nous sommes en présence d'une loi discrète puisque la variable aléatoire (k) ne peut prendre que des valeurs entières.

3) - L'espérance mathématique est $E(X) = n \cdot p$

La variance est $V(X) = n \cdot p \cdot (1 - p)$

L'écart-type $\sigma_x = \sqrt{n \cdot p \cdot (1 - p)}$

Conclusion : cette loi apparaît comme étant particulièrement intéressante pour des essais.

b) Exemple d'application

Un dispositif a une probabilité $p = 0,2$ de défaillance pour un essai.

Quelle est la probabilité d'avoir une défaillance au bout de 10 essais ?

La probabilité d'avoir une défaillance au bout de 10 essais est de 0,2684 voir Annexe3 (PSY1004 Table 1).

On démontre que lorsque n croît, la loi se rapproche de la loi normale. On peut les confondre lorsque $n \rightarrow 20$. Lorsque $n \rightarrow \infty$ et que $n.p$ reste constant. La loi binomiale tend vers une loi de poisson de paramètre $m = n.p$.

L'approximation est bonne dès que $n > 10$ et $p < 0,1$.

III.4.1.2 - la loi de Poisson

Soit X une variable aléatoire. On dit que X suit une loi de Poisson si elle est susceptible de prendre les valeurs entières $X = k \geq 0$.

La probabilité pour que x soit égal à k est :

$$P(X = k) = e^{-m} \cdot \frac{m^k}{k!} \dots \dots \dots (3.5)$$

m est un paramètre de la loi (constante positif), et $0! = 1$ (par définition).

On calcule la moyenne et la variance de X :

$$\bar{X} = \sum_0^{\infty} k \cdot e^{-m} \cdot \frac{m^k}{k!} \quad \text{et} \quad V(X) = \sum_0^{\infty} k^2 \cdot e^{-m} \cdot \frac{m^k}{k!} - (\bar{X})^2$$

On trouve $\bar{X} = m = E(X)$ et $V(X) = m$

Relation de poisson : La probabilité de constater un certain nombre de panne (n) dans le temps (t) et seulement (n) pannes est :

$$P(n, t) = e^{-\lambda t} \cdot \frac{(\lambda t)^n}{n!} \dots \dots \dots (3.6)$$

L'espérance mathématique est $E(t) = \lambda t$

La variance $V(t) = \lambda t$

L'écart type $\sigma(t) = \sqrt{\lambda t}$

III.4.2 – Les lois continues

III.4.2.1 – la loi de Waloddi Weibull

La méthode de Weibull permet de couvrir les cas où le taux de défaillance λ est variable. Elle permet aussi d'ajuster les différentes périodes (jeunesse à obsolescence). Weibull a donné au taux d'avarie $\lambda(t)$ une formule générale dépendant des trois paramètres (γ, β, η) , ce qui lui permet de s'ajuster à grand nombre d'échantillons prélevés au long de la vie d'un équipement.

Les différentes formules utilisées pour la distribution de Weibull sont :

a) La densité de probabilité

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \dots\dots\dots(3.7)$$

f(t) = probabilité d'avarie au temps (t).

b) La fonction de Répartition

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \dots\dots\dots(3.8)$$

F(t) = probabilité d'avarie cumulée au temps de 0 à t.

c) La fonction de Fiabilité

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} = 1 - F(t) \dots\dots\dots(3.9)$$

R(t) = probabilité de survie cumulée au-delà du temps

d) Le taux d'avarie

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \dots\dots\dots(3.10)$$

$\lambda(t)$ = probabilité d'avarie au temps $t + \Delta t$.

III.4.2.1.1 – Etude paramétrique du modèle de Weibull

a) signification du paramètre de forme β

β est un nombre sans dimension, il définit l'allure de la distribution de Weibull.

L'allure générale des courbes de densité de probabilité et de celles de la fonction du taux d'avarie varie avec β (**Fig. III.2** et **Fig. III.3**).

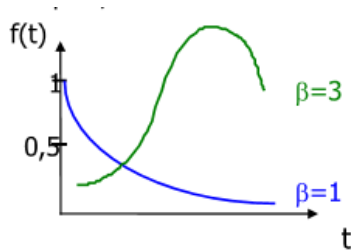


Fig. III.2 – Densité de probabilité

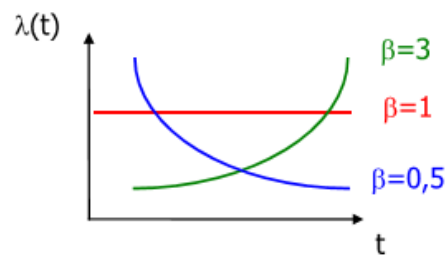


Fig. III.3 – Fonction du taux d'avarie

b) signification du paramètre de localisation ou de repérage γ

Ce paramètre indique une survie totale du lot entre 0 et γ ainsi qu'une fréquence ou densité de probabilité nulle durant cette période (**Fig. III.4**).

Si $\gamma > 0$ il y a survie totale entre $t = 0$ et $t = \gamma$

Si $\gamma = 0$ les défaillances débutant à l'origine des temps

Si $\gamma < 0$ les défaillances ont débuté avant l'origine des temps relevés, ce qui montre que la mise en service de l'équipement étudié a précédé la mise en historique des TBF.

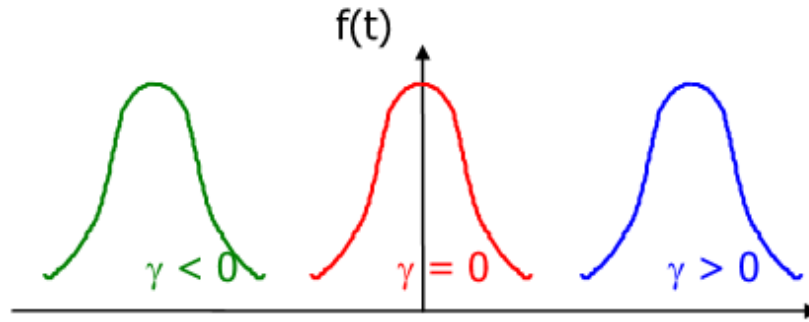


Fig. III.4 – densité de probabilité avec la variation du paramètre γ .

c) **signification du paramètre d'échelle réelle η ($\eta > 0$)**

Caractérisant le choix d'une échelle, il s'exprime dans la même unité de temps que les TBF (Fig. III.5).

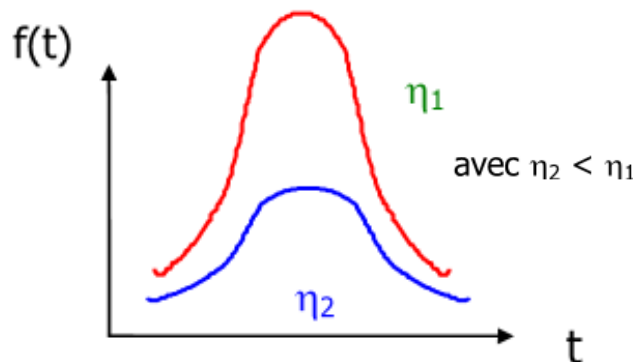


Fig. III.5 – densité de probabilité avec la variation du paramètre η .

III.4.2.2 – la loi exponentielle

Cette loi a de nombreuses applications dans plusieurs domaines. C'est une loi simple, très utilisée en fiabilité dont le taux de défaillance (λ) est constant. Elle décrit la vie des matériels qui subissent des défaillances brutales [32].

La densité de probabilité d'une loi exponentielle de paramètre λ s'écrit :

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \dots\dots\dots (3.11)$$

La fonction fiabilité :

$$R(t) = e^{-\lambda t} \dots\dots\dots (3.12)$$

Le taux de défaillance est constant dans le temps :

$$\lambda(t) = \lambda \dots\dots\dots (3.13)$$

Son espérance mathématique est :

$$E(t) = \int_0^{+\infty} t \cdot f(t) dt = E(t) = \lambda_0 \int_0^{+\infty} t \cdot e^{-\lambda_0 t} dt = \frac{1}{\lambda_0} = \text{M.T.B.F}$$

III.4.2.3 – La loi normale (ou distribution LAPLACE-GAUSS)

III.4.2.3.1 – Expression mathématique

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} \dots\dots\dots(3.14)$$

La densité de probabilité de pannes est caractérisée par 2 paramètres :

μ qui est la moyenne arithmétique des durées de vie (ou des temps entre pannes) ;

σ qui est l'écart type, grandeur représentative de la dispersion de la distribution :

$$\sigma^2 = \frac{(t_1-\mu)^2 + (t_2-\mu)^2 + \dots + (t_n-\mu)^2}{n}$$

t₁, t₂, t₃ étant les différentes valeurs des durées de vie ;

n le nombre des durées de vie.

Cette fonction est représentée par la courbe en cloche de **GAUSS** ci-dessous.

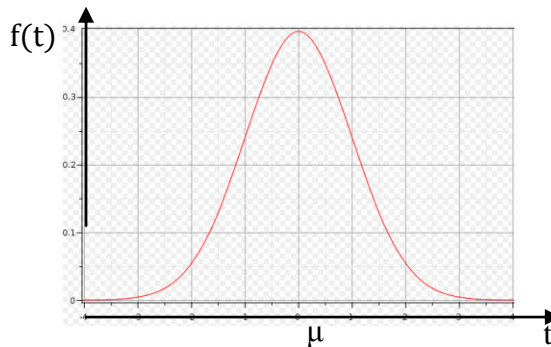


Fig. III.6 – Fonction de densité de la loi normale centrée

III.4.2.3.2 – Influence de l'écart type

Voici ci-dessous les courbes des densités correspondantes à une espérance de **μ = 4** et aux écarts types respectifs de **σ = 1/2, 1 et 2**.

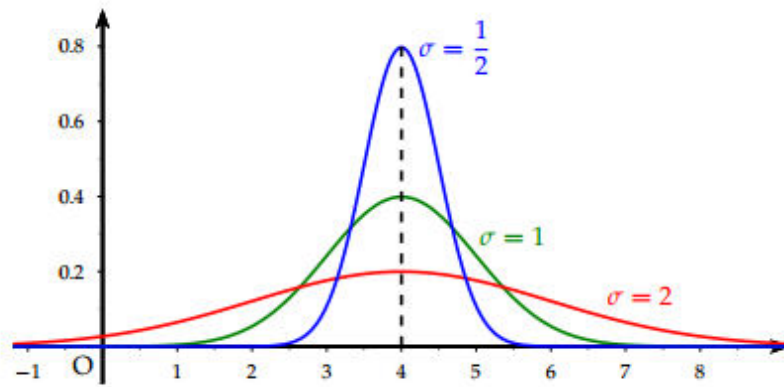


Fig. III.7 – Courbes de densités correspondant aux différentes valeurs de l'écart type

On constate que plus l'écart type est important, plus la courbe de densité est évasée et plus le maximum est petit. En effet un écart type important signifie que la dispersion des données est importante.

Ces différentes courbes peuvent être repérées par 3 intervalles caractéristiques : $[\mu - \sigma, \mu + \sigma]$, $[\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma]$ et $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$

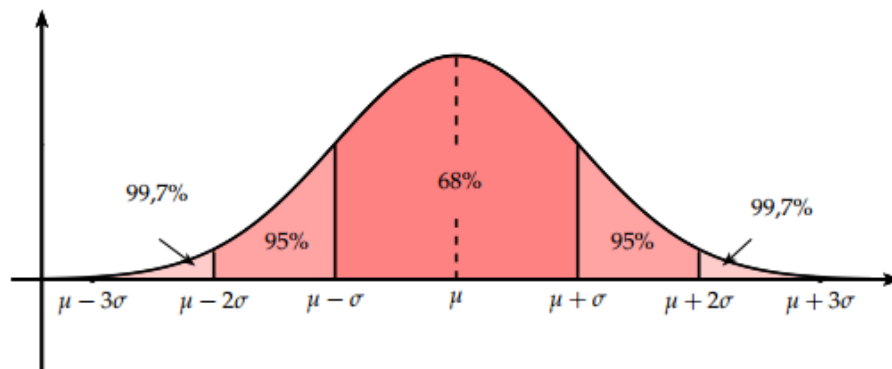


Fig. III.8 – Courbe de densité présentée par les 3 intervalles caractéristiques

On a alors :

Pour une distribution normale $N(\mu ; \sigma)$, μ = moyenne de la variable x .

68% des défaillances sont comprises entre $\mu - \sigma$ et $\mu + \sigma$, ou bien il ya 68 chances sur 100 pour que $\mu - \sigma \leq X_0 \leq \mu + \sigma$;

95% des défaillances sont comprises entre $\mu - 2\sigma$ et $\mu + 2\sigma$, ou bien il ya 95 chances sur 100 pour que $\mu - 2\sigma \leq X_0 \leq \mu + 2\sigma$;

99,7% des défaillances sont comprises entre $\mu - 3\sigma$ et $\mu + 3\sigma$, ou bien il ya 99,7 chances sur 100 pour que $\mu - 3\sigma \leq X_0 \leq \mu + 3\sigma$.

La MTBF est bien sur égale à μ .

a) Cas d'application de la loi normale

La loi normale s'applique au cas où les durées de vie sont aléatoires et varient autour d'une valeur centrale. Il est admis que les fluctuations constatées autour de la valeur centrale sont nombreuses, quelconques, de dispersion relativement petites devant la dispersion totale.

Les causes de défaillances sont essentiellement dues à l'usure. C'est la raison pour laquelle les avaries sont groupées autour de l'MTBF et la dispersion est faible [33].

Nous pouvons vérifier par la loi de Weibull que les avaries ont pour origine l'usure.

La loi de Weibull avec un paramètre de forme $\beta = 3$, correspond à la loi normale (Fig. III.9)

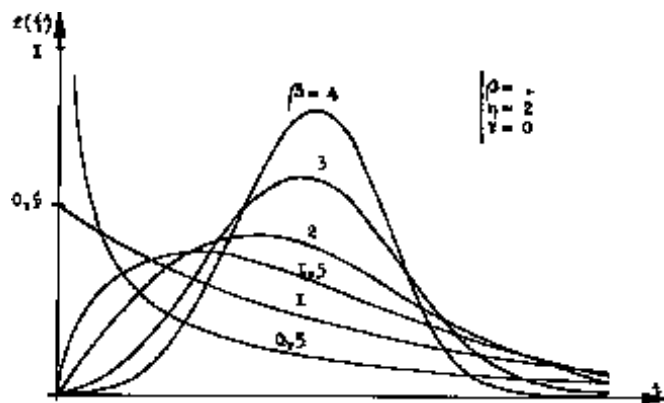


Fig. III.9 La correspondance des courbes de densité entre la loi Normale et celle de Weibull pour $\beta = 3$

b) Espérance et variance

L'espérance de la loi normale vaut : $E(X) = \mu$

La variance de la loi normale vaut : $V(X) = \sigma^2$

III.4.2.4 – La loi Log-normale

Nous disons qu'une variable aléatoire positive X suit une "fonction log-normale" (ou "loi log-normale") de paramètres $\mu, \sigma > 0$ (moment de la loi log-Normale), si et seulement si en posant :

$$y = \ln(x)$$

nous voyons que y suit une fonction de probabilité cumulée de type loi Normale de moyenne μ et de variance σ^2 (moments de la loi Normale).

La fonction de densité de X pour $x \geq 0$ est alors :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

Densité de probabilité et fonction de répartition pour $\mu = 0$

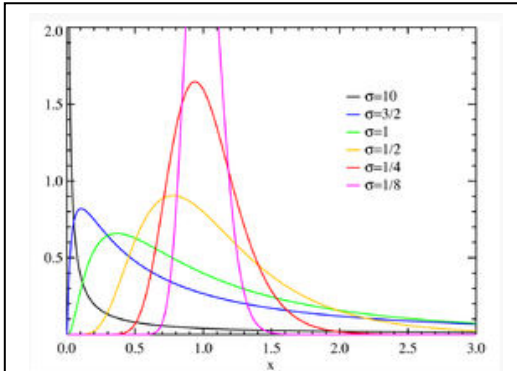


Fig. III.10 Densité de probabilité
 $\mu=0$

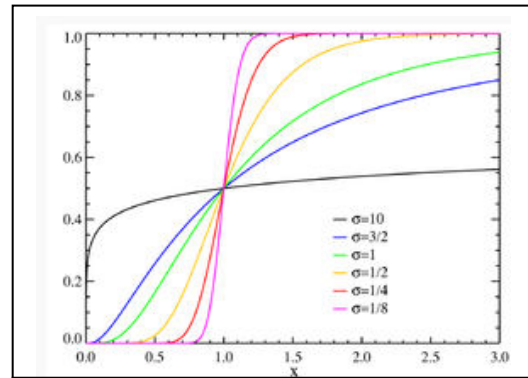


Fig. III.11 Fonction de Répartition
 $\mu=0$

Chapitre IV

*Application: Test et validation sur
un protocole expérimental*

IV.1 – Introduction

Les pannes imprévues sont très coûteuses [12,13]. Le dégât de production pendant les corrections produit une insuffisance à encaisser qui peut simuler les gains de l'entreprise [12]. Si l'on y additionne les peines de sécurité imparfaite pour le personnel, la valeur de production affaiblie et le déficit incertain de célébrité pour l'entreprise, il sera certain que de tels incidents ne nécessitent pas être supportées [14]. Pour résoudre cette question, il faut chercher une nouvelle approche de maintenance dans les ateliers [13,15].

Les approches quotidiennes de maintenance se soulagent de lisser les machines en état de fonctionnement jusqu'à l'apparition du défaut, ou bien d'utiliser l'entretien à des moments fixes [15]. L'initiale approche intéresse les équipements peu onéreux et reproduits, lorsqu'un dégât de production peut être supportée sur une uniformité. La deuxième approche, nommée maintenance préventive, montre le danger que des équipements en bon état de fonctionnement inacceptable, soit des équipements sur la position de rester en incident soient spontanément abandonnées sans surveillance. Désormais, La méthode actuel comprend à métrer la situation d'un équipement l'instant de sa marche dans le but de ne soutenir que comme les paramètres le montrent, cette démarche est appelée maintenance conditionnelle (prédictive). Pour que la maintenance conditionnelle soit efficiente, il faut des mesures exactes et fiables de la situation des machines [16]. Quelque nombre de variables d'équipements peuvent être utilisé: la température, la pression d'huile. Pourtant, la pratique a montré que le paramètre le plus véritable qui donne le plus prématurément et de la meilleure manière l'état de dommage d'un équipement est la vibration [16,17,18]. Toutes les machines vibrent et au fur et à mesure que la situation de l'équipement se détruit (Déséquilibre d'un arbre, défaut d'un engrenage ou d'une boîte de vitesse) le degré de vibration augmente [16,19,2]. En mesurant et en contrôlant le degré de vibration provient par l'équipement, on peut avoir un indicateur idéal sur sa situation de comportement. Si l'augmentation de vibration de l'équipement permet de repérer une défaillance, l'étude des caractéristiques de vibration de l'équipement permet d'identifier le prétexte. On peut ensuite en tirer avec exactitude la période avant qu'il ne soit dangereux [13].

Une grande fiabilité, entraîne une diminution de vibrations et de défaillances dans les machines tournantes, le traité de la fiabilité s'est développé un peu plus rapidement depuis les vingt dernières années, surtout à l'occasion de l'intérêt plus vif des industriels qui veulent assurer une

plus grande fiabilité de leurs machines tournantes [35].

L'intérêt de l'étude de la fiabilité va permettre de résoudre plusieurs questions (l'âge du produit, la période de garantie peut-on donner au nouveau produit, le délai pour réaliser les tâches de maintenance ou remplacer une pièce) [35]. Dans notre travail, nous donnons une méthodologie pour le calcul de la fiabilité pour l'entretien dans le cas d'une moto compresseur 62 CM 101 A. Parmi les méthodes utilisées on utilise la loi de Waloddi Weibull qui est une méthode continue et plus largement utilisée.

IV.2 – Aperçu sur la loi de Waloddi Weibull

La distribution de Waloddi Weibull est flexible et s'adapte à un large éventail de données, elle permet de couvrir les cas où le taux de défaillance λ est variable, elle permet aussi d'ajuster les différentes périodes (jeunesse à obsolescence) [36].

la distribution de Weibull est une sorte de loi caméléon, très souple, qui, grâce à ses trois paramètres (γ, β, η), ce qui lui permet de s'ajuster à un grand nombre d'échantillons prélevés au long de la vie d'un équipement. La distribution de Waloddi Weibull à deux paramètres est la distribution la plus largement utilisée pour l'analyse des données de vie.

IV.2.1 – Définition des paramètres de la loi de Waloddi Weibull

Les paramètres de la loi de Waloddi Weibull sont définis de cette manière [37].

β : paramètre de forme qui définit l'allure de la distribution, $\beta > 0$;

η : paramètre d'échelle Caractérisant le choix d'une échelle, il s'exprime dans la même unité de temps que les TBF, $\eta > 0$;

γ : paramètre de position indique la date de l'apparition de mode défaillance ;

-Si $\gamma > 0$ on a survie totale entre $t = 0$ et $t = \gamma$;

-Si $\gamma = 0$ les défaillances débutant à l'origine des temps ;

-Si $\gamma < 0$ les défaillances ont débuté avant l'origine des temps relevés, ce qui montre que la mise en service de l'équipement étudié à précéder la mise en historique des TBF.

IV.2.2 – Expressions mathématiques pour les formules de la loi de Waloddi Weibull

L'expression mathématique pour les lois de l'approche de Waloddi weibull est présentée de la façon suivante [37].

IV.2.2.1 – La fiabilité R(t)

R(t) est la probabilité de bon fonctionnement à l'instant t.

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \dots\dots\dots (4.1)$$

IV.2.2.2 – La fonction de répartition F(t)

F(t) est la probabilité que le dispositif soit en défaillance à l'instant t.

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \dots\dots\dots (4.2)$$

IV.2.2.3 – Le taux instantané de défaillance λ(t)

λ(t) est un évaluateur de fiabilité.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \dots\dots\dots (4.3)$$

IV.2.2.4 – La densité de probabilité f(t)

f(t) est une densité de probabilité.

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \dots\dots\dots (4.4)$$

IV.2.2.5 – Calcul du MTBF

La MTBF sera calculée d'après l'équation suivante

$$MTBF = A \eta + \gamma \dots\dots\dots (4.5)$$

IV.3 – Détermination graphique des paramètres de Waloddi Weibull

On utilise le papier de Waloddi Weibull (graphique d'Allan Plait) [38], pour déterminer les paramètres suivants (**Fig. IV.1**).

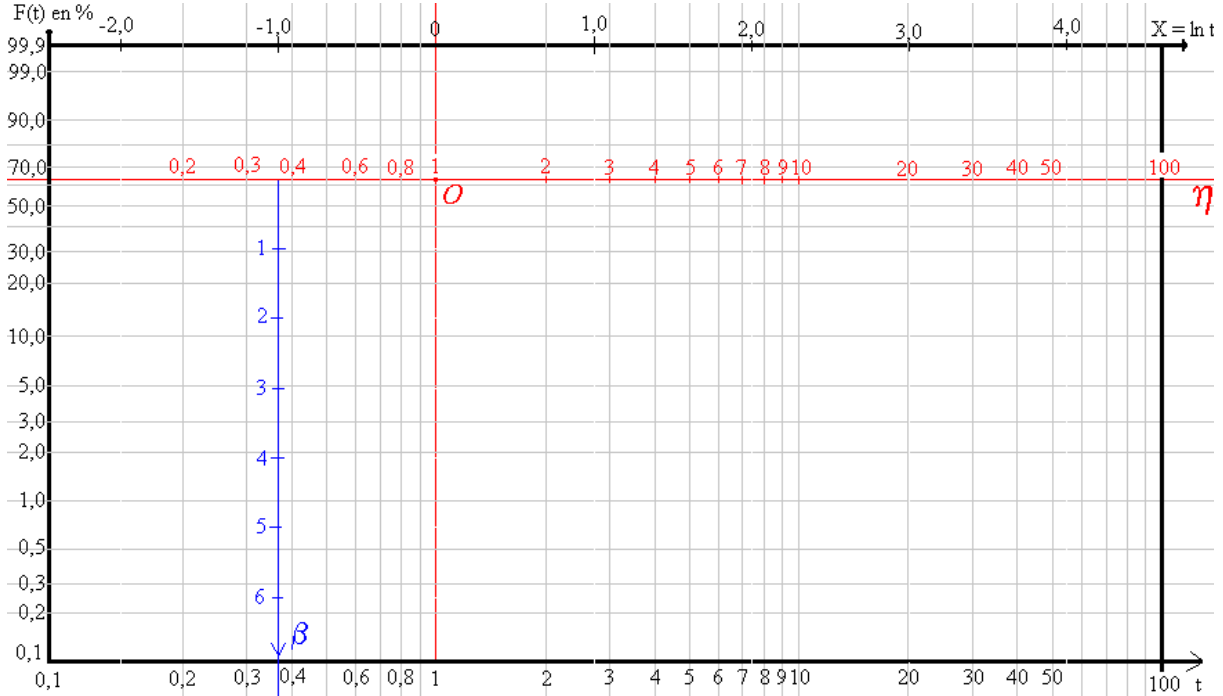


Fig. IV.1 – Papier de Weibull (graphique d'Allan Plait)

Ce papier de Waloddi Weibull sert à lire graphiquement les paramètres d'une loi de Weibull. En effet la fonction de répartition associée à une loi de Weibull de paramètres β , γ et η est déterminée par (cas $\gamma = 0$) [39] :

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \dots\dots\dots(4.6)$$

$$\Leftrightarrow \ln(1 - F(t)) = -\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta \dots\dots\dots(4.7)$$

$$\Leftrightarrow -\ln(1 - F(t)) = \left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta \dots\dots\dots(4.8)$$

$$\Leftrightarrow \ln[-\ln(1 - F(t))] = \beta \ln\left(\frac{t}{\eta}\right) \dots\dots\dots(4.9)$$

$$\Leftrightarrow \ln[-\ln(1 - F(t))] = \beta \ln(t) - \beta \ln(\eta) \dots\dots\dots(4.10)$$

$$\Leftrightarrow Y = \beta X - \beta \ln(\eta) \dots\dots\dots(4.11)$$

L'équation (4.11) présente la forme d'une droite passant par le point (O ; X ; Y) où O est l'origine, correspond à $X = 0$ et $Y = 0$ soit à $t = 1$ et $F(t) = 1 - \frac{1}{e^t}$, [40].

Le paramètre η se lit directement à l'intersection de la droite précédente avec l'axe des abscisses puisque celui-ci est gradué en échelle logarithmique.

Le paramètre β est le coefficient directeur de la droite précédente, il suffit de tracer une droite parallèle à la précédente et de lire directement le coefficient directeur de cette droite sur l'axe d'équation $X = -1$ [39].

IV.3.1 – Echelles utilisées sur le papier de Waloddi Weibull

abscisse haute : échelle naturelle en X

abscisse intermédiaire : échelle logarithmique (lecture du paramètre η).

abscisse basse : échelle logarithmique (on fait correspondre à chaque valeur de t son logarithme népérien $\ln t$).

ordonnée gauche : on place les valeurs de F(t) en pourcentage en échelle $\ln(-\ln(1-F(t)))$.

ordonnée sur l'axe $X = -1$ (lecture du paramètre β) : ce sont les valeurs $\ln(-\ln(1-F(t)))$.

IV.4 – L'étude de la fiabilité à partir du modèle de waloddi weibull

IV.4.1 – Analyse analytique

I V.4.1.1 – Préparation des données

D'après L'historique, on détermine les TBF et on calcul les fréquences cumulées de défaillance $F(i)$, approximation de $F(t)$ [39].

- Classement des TBF en ordre croissant dans un tableau ;
- n est le nombre de défaillances ;
- N = nombre de TBF ;
- Calcul des cumules de $F(i)$ dans un tableau, $F(i)$ représente la probabilité de panne au temps correspondant au TBF de l'ième défaillant.

- Si $N < 20$, On affecte un rang "i" à chaque défaillance (approximation des rangs médians) :

$$F_i(t) = \frac{(i - 0,3)}{(N + 0,4)} \dots\dots\dots(4.12)$$

- Si $20 < N < 50$, On affecte un rang "i" à chaque défaillance (approximation des rangs moyens) :

$$F_i(t) \% = \frac{\sum n_i .100}{(N + 1)} \dots\dots\dots(4.13)$$

- Si $N > 50$, regroupement des TBF par classes avec la fréquence cumulée :

$$F_i(t) = \frac{\sum ni}{N} \dots\dots\dots(4.14)$$

• Tracé de l'ensemble des points M ($F_{(i)}, t$) sur le papier de weibull, on a 2 cas :

a) Premier cas

Si l'ensemble des points correspond à une droite, alors γ (gamma) = 0 et il nous reste à déterminer η (êta) et β (béta).

b) Deuxième cas

Si l'ensemble des points correspond à une courbe, on a les paramètres à déterminer (γ, η et β).

Prenant l'étude du premier cas, car elle correspond à la recherche que je suis en train de la réalisée.

IV.4.2 – Contexte

L'étude d'un historique du suivi arrêt groupe turbo alternateur (GTA) de SONALGAZ de la zone de SKIKDA, de la date de 01/01/2010 au 09/01/2012, voir tableau (**Tab.IV.1**, Annexe IV), il nous a donné les TBF en heures, se résumant de telle manière (**Tab.IV.2**).

Tab.IV.2 – TBF classées par ordre croissant.

numéro de rang	TBF	numéro de rang	TBF	numéro de rang	TBF
N°	h	N°	h	N°	h
1	0.98	14	57.95	27	540.56
2	1.36	15	64.31	28	650.93
3	1.7	16	73.43	29	668.31
4	3.36	17	192.13	30	726.61
5	7.63	18	194.64	31	745.95
6	12.16	19	218.53	32	839.58
7	14.33	20	240.71	33	971.33
8	18.95	21	380.8	34	979.35
9	20.23	22	421.41	35	1195.48
10	23.41	23	466.11	36	1277.11
11	30.53	24	466.21	37	1467.73
12	34.33	25	520.28		
13	54.36	26	538.71		

IV.4.3 – Calcul de la fonction de répartition F(t) %

Il se réalise comme suit, nous avons les TBF, N=37 (20 < N < 50), dans ce cas on utilise l'équation (13) pour effectuer le tableau (**Tab.IV.3**).

Exemple de calcul:

$$F_i(t) \% = \frac{\sum n_i \cdot 100}{(N+1)}, \quad N=37$$

Pour $i=1$, $n_i=1$, $F(t) = \frac{1 \cdot 100}{(37+1)} = 2,63 \%$

$i=23$, $\sum n_i = 23$, $F(t) = \frac{23 \cdot 100}{(37+1)} = 60,53 \%$

Tab.IV.3 – Calcul des F(t)%

Numéro de rang	TBF	TBF convertis sur l'éch. log	Nombre de défaillances	Défaillances Cumulées	Fonction de Répartition
i	h	h	n _i	∑ n _i	F(t) en %
1	0.98	0.066	1	1	2,63
2	1.36	0.092	1	2	5,26
3	1.7	0.115	1	3	7,89
4	3.36	0.228	1	4	10,53
5	7.63	0.519	1	5	13,16
6	12.16	0.828	1	6	15,79
7	14.33	0.976	1	7	18,42
8	18.95	1.29	1	8	21,05
9	20.23	1.37	1	9	23,68
10	23.41	1.59	1	10	26,32
11	30.53	2.08	1	11	28,95
12	34.33	2.33	1	12	31,58
13	54.36	3.7	1	13	34,21
14	57.95	3.94	1	14	36,84
15	64.31	4.38	1	15	39,47
16	73.43	5	1	16	42,11
17	192.13	13.09	1	17	44,74
18	194.64	13.26	1	18	47,37
19	218.53	14.88	1	19	50,00
20	240.71	16.4	1	20	52,63
21	380.8	25.94	1	21	55,26
22	421.41	28.71	1	22	57,89
23	466.11	31.75	1	23	60,53
24	466.21	31.76	1	24	63,16
25	520.28	35.44	1	25	65,79
26	538.71	36.7	1	26	68,42
27	540.56	36.82	1	27	71,05
28	650.93	44.34	1	28	73,68
29	668.31	44.53	1	29	76,32
30	726.61	49.5	1	30	78,95
31	745.95	50.82	1	31	81,58
32	839.58	57.2	1	32	84,21
33	971.33	66.17	1	33	86,84
34	979.35	66.72	1	34	89,47
35	1195.48	81.45	1	35	92,11
36	1277.11	87.01	1	36	94,74
37	1467.73	100	1	37	97,37

Les TBF sont converties sur l'échelle Logarithmique pour l'adaptation sur le papier de Walloodi Weibull. Ex : $i=10$, $TBF=23,41$ h, nous donne $TBF = (23,41 \times 100) / 1467,73 = 1,59$ h.

IV.4.4 – Traçage des points M [t, F(t)]

Le traçage des points M [t, F(t)] se réalise sur le papier Waloddi Weibull, (**Fig.IV.2**)

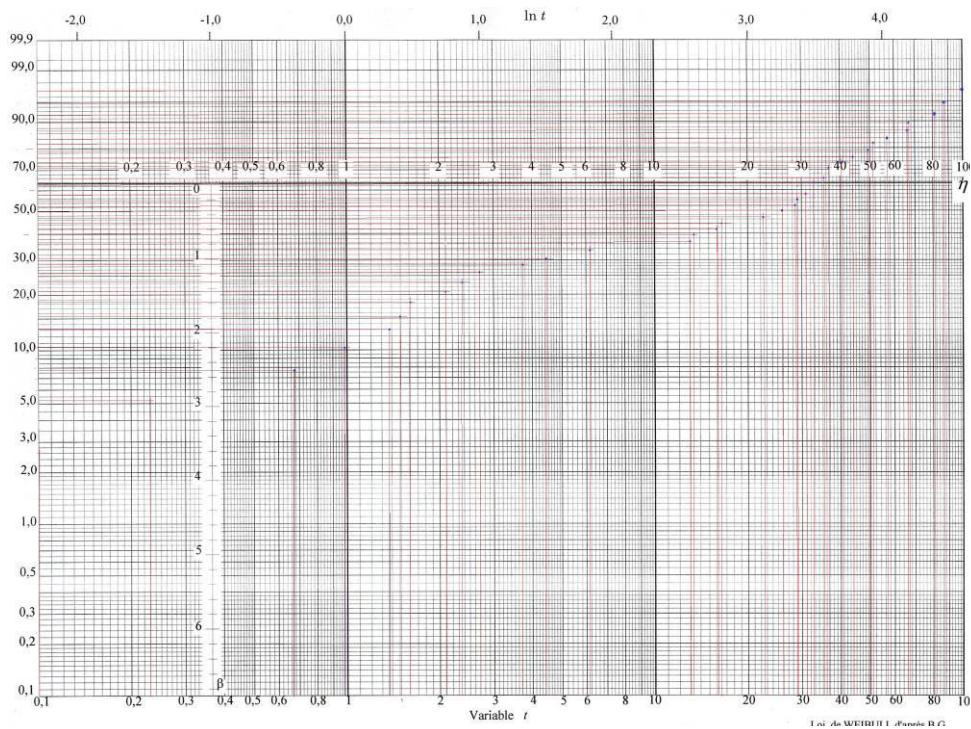


Fig.IV. 2 – Tracé du nuage des points M[t, F(i)]

IV.4.5 – Traçage de l'allure

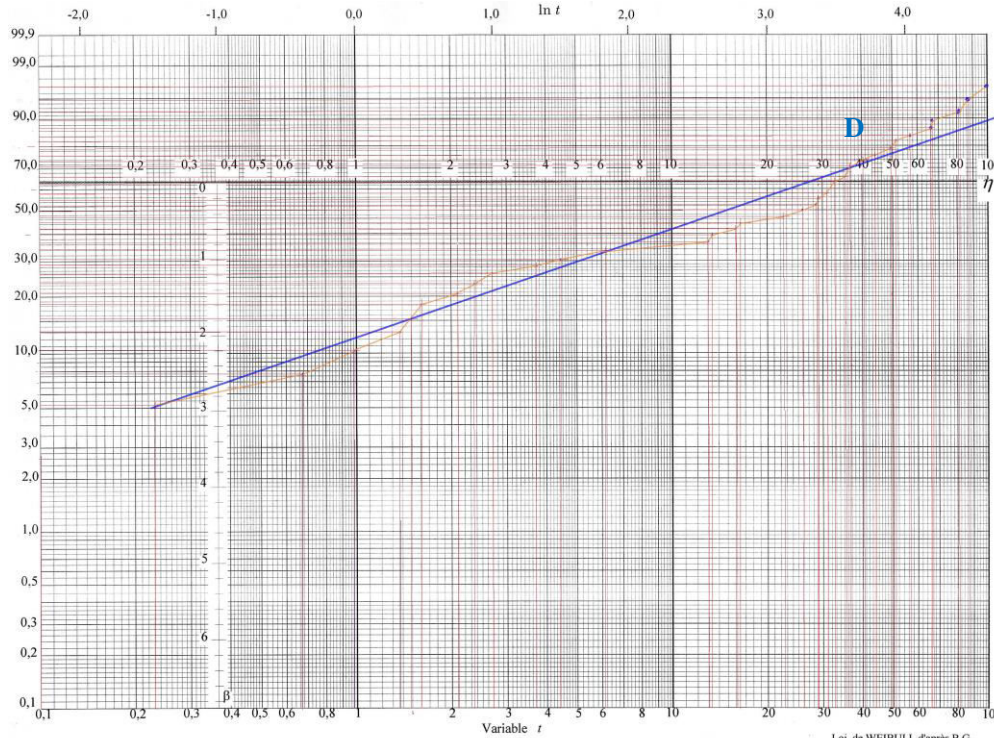


Fig.IV.3 – Tracé de la droite D

Le tracé de l'allure est une droite **D** (Fig.IV.3)

IV.4.6 – Estimation du paramètre η

L'estimation du paramètre η se fera d

e telle façon sur le papier de Waloddi Weibull, la droite D coupe l'axe η (Fig.IV.3) par la valeur 28 et après la conversion on trouve

$$\eta = (28 \times 1467,73) / 100 = 410,96 \text{ heures.}$$

IV.4.7 – Estimation du paramètre β

L'estimation du paramètre β se réalise de telle manière sur le papier de Waloddi Waloddi Weibull (**Fig.IV.4**)

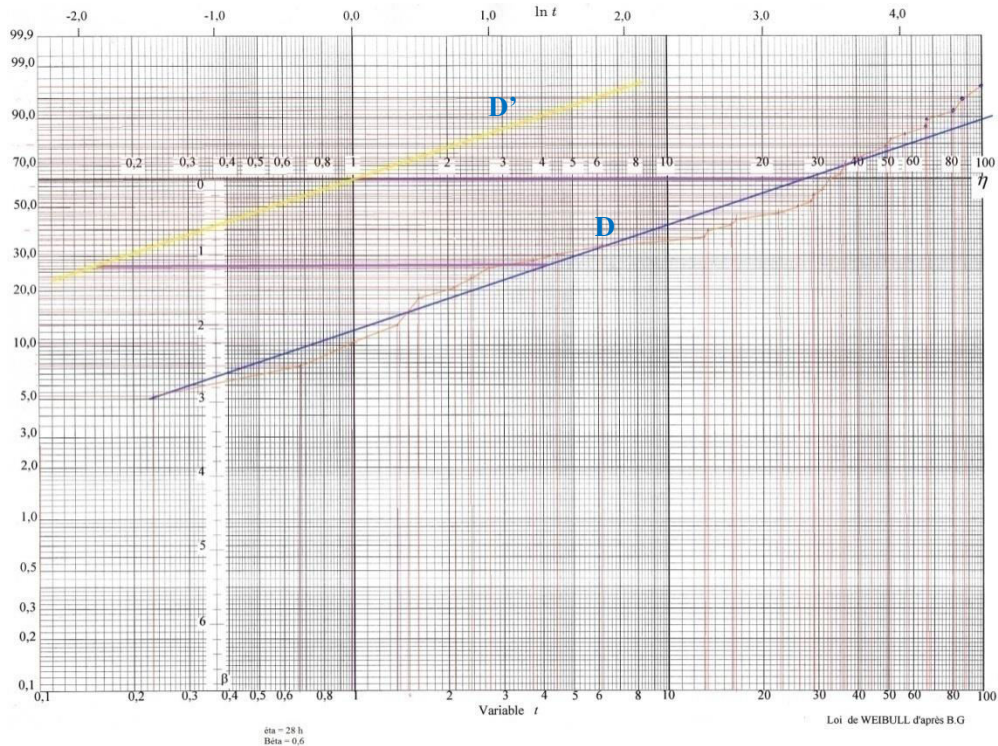


Fig.IV.4 – Tracé de la parallèle (D') à la droite (D)

On trace la droite (D') parallèle à (D) passant par l'origine O, elle coupe l'axe des β en un point qui montre la valeur du paramètre β . On lit $\beta = 0,6$.

IV.4.8 – Calcul du MTBF

D'après les tables numériques de Waloddi Weibull, permettent de déterminer la valeur A (**Tab.IV.4, Annexe IV**), on calcule la MTBF.

Pour $\beta = 0,6$ on prend $A = 1,50458$, l'équation (4.5) nous donne :

$MTBF = A \eta + \gamma = 1,50458 \times 410,96 + 0$, on aura La $MTBF = 618,32$ heures.

Donc les paramètres de Waloddi Weibull sont :

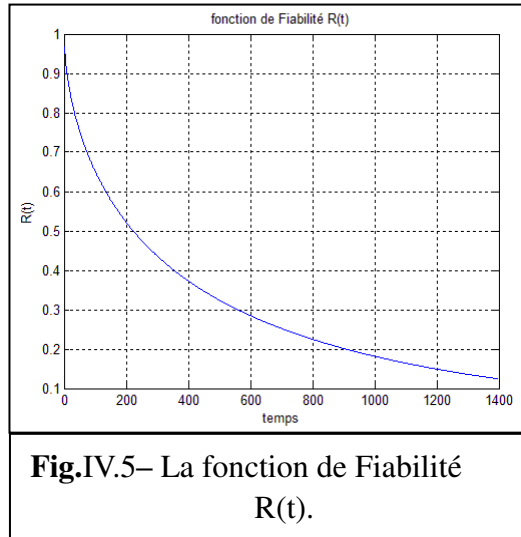
$\gamma = 0$ (Cas d'une droite) $\eta = 410,96$ heures

$\beta = 0,6$ $MTBF = 618,32$ heures

IV.5–Etude des fonctions de la méthode de Weibull $R(t)$, $F(t)$, $\lambda(t)$ et $f(t)$ graphiquement

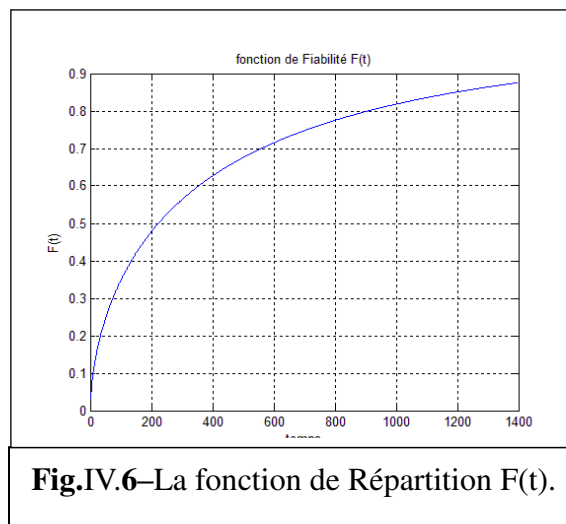
IV.5.1– Représentation graphique de la fonction de Fiabilité $R(t)$,

On représente la courbe de la fiabilité par l'équation (4.1)



IV.5.2–Représentation graphique de la fonction de Répartition $F(t)$

On représente la courbe de la fonction de Répartition par l'équation (4.2)



IV.5.3– Représentation graphique du Taux de défaillance $\lambda(t)$

On représente la courbe de la fonction du taux de défaillance par l'équation (4.3)

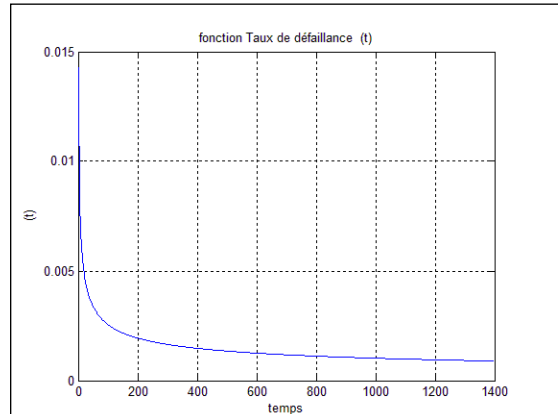


Fig.IV.7– La fonction du Taux de défaillance $\lambda(t)$.

IV.5.4– Représentation graphique de la fonction de Densité de probabilité $f(t)$

On trace la courbe de la fonction de densité de probabilité d'après l'équation (4.4)

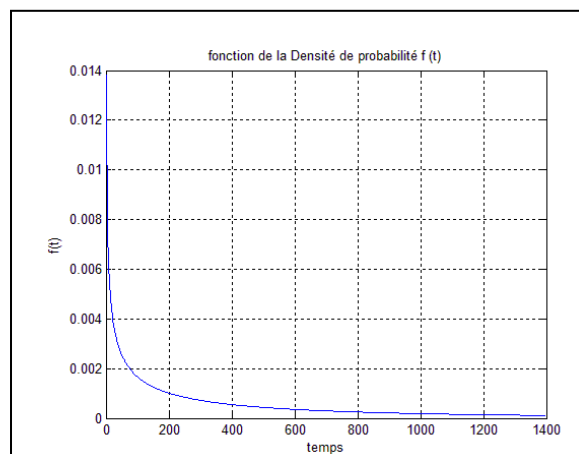


Fig.IV.8– La fonction de la densité de probabilité $f(t)$.

IV.5.5– Discussion des résultats

Les graphiques de l'analyse de la méthode de weibull nous permet de faire les constatations suivantes, on remarque bien que la fonction de répartition est relativement inversée à la fiabilité, elle présente le risque de tomber en panne c.à.d. plus la fiabilité diminue plus le risque de tomber

en panne augmente **Fig.IV.5** et **Fig.IV.6**.

La **Fig.IV.7** de la fonction Taux de défaillance nous montre que la courbe a une forme décroissante due à la diminution du risque de défaillance avec le temps, on dit que les installations ayant des « défauts de jeunesse » Cela aussi nous montre un état de rodage. Après l'allure de la courbe, elle va se stabiliser et est due au fonctionnement normal (période de maturité).

La **Fig.IV.8** de la fonction Densité de probabilité son intérêt est de voir comment se distribuent les défaillances enregistrées et leurs répartitions autour de la moyenne de tenue d'un matériel. Pour notre application la densité de probabilité devient presque nulle lorsque l'équipement dépasse la valeur de l'MTBF. Ce qui désigne que les pannes se minimisent après l'utilisation moyenne c .à. d. la probabilité de la défaillance diminue avec le temps pour qu'elle reste presque stable avec le temps.

IV.6– Validation du modèle choisi par le test de Kolmogorov-Smirnov

Il est primordial pour valider une loi de fiabilité, il faut tester les hypothèses pour savoir si la nécessité d'accepter ou de refuser le modèle choisi [39].

IV.6.1– Calcul de la loi théorique $F_t(t)$ et la fonction réelle $F_r(t)$

On se fixe à un seuil de confiance $\alpha = 5\%$ (0,05) et $n=37$, dépendant de la politique exigée.

Il s'agit de calculer l'écart entre la fonction théorique $F_t(t)$ et la fonction réelle $F_r(t)$ et de prendre le maximum de leur différence en valeur absolue en utilisons la formule suivante :

$$D_{n,max} = |F_t(t_i) - F_r(t_i)| \dots \dots \dots (4.15)$$

En appliquant les formules (4.2), (4.13) et (4.15) pour compléter le tableau ci-dessous, ce qui nous donne les valeurs suivantes qui sont présentées par le tableau (**Tab.IV.5**) suivant :

Tab.IV.5– Détermination de l'écart entre la fonction théorique et la fonction réelle

nombres d'arrêts	TBF(h)	Nombre de défaillances	Nombre cumulé	Fonction théorique	Fonction Réelle	$D_n= F_t(t)-F_r(t) $	
N	TBF(h)	n_i	$\sum n_i$	$F_t(t)$	$F_r(t)$	D_n en %	D_n
1	0.98	1	1	2,63	3,28	0,65	0,0064
2	1.36	1	2	5,26	5,56	0,30	0,0029
3	1.7	1	3	7,89	10,007	2,11	0,0211
4	3.36	1	4	10,53	12,75	2,22	0,0222
5	7.63	1	5	13,16	15,44	2,29	0,0228
6	12.16	1	6	15,79	16,06	0,27	0,0027
7	14.33	1	7	18,42	16,73	1,68	0,0168
8	18.95	1	8	21,05	19,32	1,73	0,0172
9	20.23	1	9	23,68	20,57	3,11	0,0310
10	23.41	1	10	26,32	22,28	4,03	0,0403
11	30.53	1	11	28,95	26,18	2,76	0,0276
12	34.33	1	12	31,58	28,52	3,06	0,0305
13	54.36	1	13	34,21	33,60	0,60	0,0060
14	57.95	1	14	36,84	47,66	10,82	0,1082
15	64.31	1	15	39,47	47,92	8,46	0,0845
16	73.43	1	16	42,11	51,49	9,39	0,0939
17	192.13	1	17	44,74	52,34	7,61	0,0761
18	194.64	1	18	47,37	59,23	11,86	0,1186
19	218.53	1	19	50,00	62,32	12,32	0,1232
20	240.71	1	20	52,63	64,55	11,93	0,1192
21	380.8	1	21	55,26	64,91	9,65	0,0965
22	421.41	1	22	57,89	66,40	8,51	0,0850
23	466.11	1	23	60,53	66,77	6,25	0,0625
24	466.21	1	24	63,16	66,78	3,63	0,0362
25	520.28	1	25	65,79	69,18	3,39	0,0339
26	538.71	1	26	68,42	69,93	1,52	0,0151
27	540.56	1	27	71,05	70,01	1,04	0,0103
28	650.93	1	28	73,68	72,04	1,64	0,0164
29	668.31	1	29	76,32	73,98	2,33	0,0233
30	726.61	1	30	78,95	76,26	2,68	0,0267
31	745.95	1	31	81,58	76,80	4,78	0,0477
32	839.58	1	32	84,21	79,16	5,04	0,0504
33	971.33	1	33	86,84	81,94	4,89	0,0489
34	979.35	1	34	89,47	82,10	7,37	0,0737
35	1195.48	1	35	92,11	85,61	6,49	0,0648
36	1277.11	1	36	94,74	86,70	8,04	0,0803
37	1467.73	1	37	97,37	88,84	8,53	0,0852

D'après ce dernier tableau, on prend le maximum en valeur absolue de l'écart entre la fonction théorique $F_t(t)$ et la fonction réelle $F_r(t)$;

$$D_{n,\max} = |F_t(t_i) - F_r(t_i)| = 0,123$$

IV.6.2– Comparaison entre les deux valeurs $D_{n,\max}$ et $D_{n,\alpha}$

On compare celle-ci à la valeur $D_{n,\alpha}$ présenté par le **Tab. IV.6**, (Table 7, Annexe), Teste de Kolmogorov-Smirnov, avec $n=37$ et $\alpha = 0,05$ on a:

$$D_{n,\alpha} = D_{37;0,05} = 0,223$$

IV.6.3– Rappel

Si la Différence $D_{n,\max}$ calculée est supérieure à la valeur indiquée d'après le tableau $D_{n,\alpha}$, donc on rejette l'hypothèse au niveau de confiance choisi si non on l'accepte [39].

D'après les résultats obtenus, en comparant à cel du tableau Tab.IV.6 (Table 7, Annexe) on trouve que $D_{n,\max}$ est inférieur à $D_{n,\alpha}$, ($0,123 < 0,223$), Dans ce cas on peut dire que le model choisi est validé.

IV.7–CONCLUSION

Les compresseurs de gaz de régénération sont à un seul étage et du type centrifuge entraîné par moteur; l'un est normalement en service et l'autre en secours. Ils peuvent être commandés soit localement en mode manuel soit à distance en mode manuel ou automatique, ce choix se fait en salle de contrôle à partir de l'écran / clavier.

Au cours de notre étude on a constaté que :

Le paramètre β est de $0,6 < 1$ cela nous montre que le taux de défaillance est décroissant, la machine fonctionne en état normal, suivant la courbe en baignoire la machine se trouve en état de maturité (zone de fonctionnement normal),

La MTBF qui est de 618,32 heures cela montre que la machine peut fonctionner presque un mois sans tomber en panne.

Aussi le choix du modèle pour l'estimation de la fiabilité, il est primordial pour valider une loi de fiabilité, il faut tester les hypothèses pour savoir si la nécessité d'accepter ou de rejeter, cela nous a permis d'utiliser le test de KOLMOGOROV – SMIRNOV qui nous a donné une avance favorable, mène à la validation du modèle choisi, par son théorème de la différence de $D_{n,\max}$ calculée à celle $D_{n,\alpha}$ de la table de Kolmogorov-S.

Le test de KOLMOGOROV – SMIRNOV s'adapte mieux dans ce cas, il apporte une information supplémentaire concernant l'adéquation des fréquences cumulées étudiées au modèle de Waloddi Weibull.

*Conclusion
générale
et
Perspectives*

Conclusion générale

L'analyse des vibrations comme outil privilégié de la maintenance conditionnelle, est riche d'enseignements pour le technicien de la maintenance. Elle est relativement complexe et doit être utilisée avec expertise et pragmatisme, L'usure des machines industrielles trop rapide est coûteuse à nos entreprises. Cela nous a amenés à prendre des précautions adéquates sur ce phénomène, en vue d'améliorer la durée de vie du matériel, prolonger les délais de changement des pièces de rechange et réduire les charges et les coûts des stocks des entreprises.

De ce point de vue, nous savons que l'analyse de la fiabilité constitue une phase indispensable dans toute étude de sûreté de fonctionnement. A l'origine, la fiabilité concernait les systèmes à haute technologie (centrales électrique, cimenterie etc...). Aujourd'hui, la fiabilité est devenue un paramètre clé de la qualité et d'aide à la décision, dans l'étude de la plupart des composants, produits et processus "grand public": Transport, énergie, bâtiments, composants électroniques, composants mécaniques....

De nombreux industriels travaillent à l'évaluation et l'amélioration de la fiabilité de leurs produits au cours de leur cycle de développement, de la conception à la mise en service (conception, fabrication et exploitation) afin de développer leurs connaissances sur le rapport Coût/Fiabilité et maîtriser les sources de défaillance.

L'analyse de la fiabilité dans le domaine de la mécanique est un outil très important pour caractériser le comportement du produit dans les différentes phases de vie, mesurer l'impact des modifications de conception sur l'intégrité du produit, qualifier un nouveau produit et améliorer ses performances tout au long de sa mission.

Notre contribution dans cette recherche est l'intérêt de l'étude de la fiabilité pour permettre de résoudre plusieurs questions (l'âge du produit, la période de garantie peut-on donner au nouveau produit, le délai pour réaliser les tâches de maintenance ou remplacer une pièce).

On a utilisé une loi de probabilité continue, plus largement utilisée, c'est la loi de Waloddi Weibull, afin de savoir à tout moment la fiabilité, l'MTBF et assurer la disponibilité du matériel. Pour cela on a utilisé les TBF du groupe turbine alternateur GTA pour calculer les $F(t)$ en %, après on a utilisé le graphique de Weibull pour quand puisse déterminer les paramètres γ, β, η et l'MTBF.

Dans ce chapitre on a essayé de déterminer les paramètres de Weibull, commençant par γ , paramètre de position, qui indique la date de l'apparition de mode défaillance, pour notre cas $\gamma=0$, cas d'une droite.

η , paramètre d'échelle, caractérisant le choix d'une échelle, il s'exprime dans la même unité de temps que les TBF, pour notre cas $\eta = 410,96$ heures (après transformation).

β , paramètre de forme qui définit l'allure de la distribution, dans notre cas $\beta=0.6$.

Cette valeur nous a montré que la machine fonctionne en état normal.

Après on a déterminé l'MTBF par la formule (4.5) qui nous a donné une valeur de 618,32 heures, cette valeur a permis la machine de fonctionner presque un mois sans tomber en panne.

Concernant la partie graphique des fonctions de la méthode de Weibull, la fonction densité de probabilité $f(t)$, devient presque nulle lorsque l'équipement dépasse la valeur de l'MTBF, ce qui indique que les pannes se minimisent après l'utilisation moyenne, et la probabilité de la défaillance diminue avec le temps pour qu'elle reste presque stable avec le temps.

La fonction du taux de défaillance $\lambda(t)$ a une courbe à une forme décroissante due à la diminution du risque de défaillance avec le temps, cela nous montre que les installations ayant des défauts de jeunesse (état de rodage), après l'allure de la courbe va se stabiliser cela est due au fonctionnement normal (période de maturité).

La méthode que nous avons choisie est-elle appropriée ou non, pour cela on a choisi le test de Kolmogorov – Smirnov, pour savoir si la nécessité d'accepter ou de refuser le modèle choisi.

Après l'application du test K-S, on a trouvé de bons résultats. On peut dire que la méthode choisie s'adapte mieux avec le test ce dernier.

Dans ce cas le test K-S apporte une information supplémentaire concernant l'adéquation des fréquences cumulées étudiées au modèle de Weibull. Ce test nous a donné une avance favorable, mène à la validation du modèle choisi, par son théorème de la différence de $D_{n,max}$ calculée à celle $D_{n,\alpha}$ du tableau de KOLMOGOROV–SMIRNOV.

Perspectives

Une grande fiabilité, entraîne une diminution de défaillances dans les machines tournantes, le traitement de la fiabilité s'est développé un peu plus rapidement depuis les vingt dernières années, surtout à l'occasion de l'intérêt plus vif des industriels qui veulent assurer une plus grande fiabilité de leurs machines tournantes.

Dans ce document, on a essayé de donner une méthodologie pour le calcul de la fiabilité des machines industrielles dans l'entreprise SONALGAZ, pour l'entretien d'une moto-compresseur 62 CM 101 A.

Nous recommandons d'étendre la portée du travail à d'autres entreprises industrielles de notre pays, afin de pouvoir faire attention à l'étude de la fiabilité qui permettra de résoudre de nombreuses questions (l'âge du produit, la période de garantie peut-on donner au nouveau produit, le délai pour réaliser les tâches de maintenance ou remplacer une pièce etc.).

Bibliographie

- [1] A. BOULENGER: Maintenance conditionnelle par analyse des vibrations, Ancien responsable du département maintenance et diagnostics vibratoires chez AIF puis SKF.
- [2] D. AUGÉIX : Analyse vibratoire des machines tournantes, Ingénieur de l'Institut national des sciences appliquées (INSA Toulouse). Techniques de l'Ingénieur,
- [3] Junsheng Cheng, Yang Yi, Yu Yang. Méthode de diagnostic des pannes des machines tournantes basé sur la décomposition moyenne locale, Digital Signal Processing, Mars 2012.
- [4] Yaguo Lei, Jing Lin, Zhengjia Il, Ming Zuo J. Un examen sur la décomposition de mode empirique dans le diagnostic des pannes des machines tournantes, Systèmes mécaniques et traitement du signal, Février 2013.
- [5] Hongkai Jiang, Chengliang Li, Huaxing Li, Un EEMD améliorée avec paquet multi-ondelettes pour le diagnostic des multi-pannes des machines tournantes, Avril 2013, Systèmes mécaniques et traitement du signal, Volume 36, Numéro 2.
- [6] Dacheng Li, Jinji Gao, Étude et application de la maintenance centrée pour la fiabilité en tenant compte de la maintenance radicale, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Septembre 2010.
- [7] K. Efthymiou, N. Papakostas, D. Mourtzis, G. Chryssolouris, Sur une plate-forme de maintenance prédictive pour les systèmes de production (On a Predictive Maintenance Platform for Production Systems), Procedia CIRP, 2012.
- [8] Marco Lewandowski, Stephan Oelker, Vers un contrôle autonome de la maintenance et de la logistique des pièces de rechange-Défis et opportunités pour anticiper les concepts de maintenance (Towards Autonomous Control in Maintenance and Spare Part Logistics – Challenges and Opportunities for Preacting Maintenance Concepts), Procedia Technology, 2014.
- [9] Bovic Kilundu, Pierre Dehombreux, Xavier Chimentin, la surveillance de l'usure d'outil par les techniques de la machine d'apprentissage et l'analyse du spectre singulier, Systèmes mécaniques et traitement du signal, Janvier 2011.
- [10] T.H. Loutas, D. Roulias, E. Pauly, V. Kostopoulos, l'utilisation combinée de la vibration, l'émission acoustique et les débris de l'huile sur la surveillance en ligne vers une surveillance conditionnelle plus efficace des machines tournantes, Systèmes mécaniques et traitement du signal, mai 2011.

- [11] Jacek Urbanek, Tomasz Barszcz, Jérôme Antoni, distribution intégrée de l'intensité de modulation comme un outil pratique pour la surveillance conditionnelle, l'acoustique appliquée, Mars 2014.
- [12] La maintenance prédictive pour les machines tournantes. Symposium au service de l'entreprise Qualima 01-Tlemcen 2004.
- [13] Chaib rachid La maintenance et la sécurité industrielle dans l'entreprise. Dépôt légal 460-2007 bibliothèque nationale.
- [14] Jean Héng Pratique de la maintenance préventive, mécanique, pneumatique, hydraulique, électricité, froid. Dunod, paris 2002. ISBN 210 00 65610
- [15] Chaib rachid La maintenance industrielle. Editions université de Constantine 2003/2004.
- [16] Philippe Estoq. Thèse doctorat. Une approche méthodologique numérique et expérimentale d'aide à la détection et au suivi vibratoire de défaut d'écaillage de roulement à billes (16 déc. 2004).
- [17] Bruel & Kjaer vibro, Stage de maintenance conditionnelle. 27 au 29 mai 2002.
- [18] Bruel & Kjaer vibro. Analyse vibratoire MC-vibration. Rév. A septembre 2001.
- [19] Bruel & Kjaer vibro. Diagnostic des défauts par analyse vibratoire.
- [20] B. BENNEVAULT, J. DUMAS: Débuter la mesure vibratoire, 01dB-STELL (Groupe MVI technologies) Version Février 2001.
- [21] Document SCHENCK S. A, vibration, 2000.
- [22] Diagnostic des machines tournantes par les techniques de l'intelligence artificielle, Université Badj Mokhtar - ANNABA, Thèse de Doctorat, Ilyes KHELF, 2013/2014
- [23] D. Madjadi, F. Tachi : Diagnostic par analyse vibratoire, Document SONATRACH/ IAP.
- [24] Bruel & Kjaer : Les vibrations, introduction à la détection des défauts, Révision B, Octobre 2002.
- [25] Cours de Génie Electrique, Licence Professionnelle de Génie Industriel. Université Paris VI-Jussieu, CFA Mecavenir, G. CHAGNON, Année 2003-2004.
- [26] Base des Signaux - INP Toulouse
- [27] Les Bases du Traitement des Signaux Numériques. Université Paul Sabatier. Andrei Doncescu.
- [28] Rappels Traitement du Signal, Licence Professionnel Optronique, T.Dumartin, Année 2004 -2005.
- [29] Traitement du Signal, Université Louis Pasteur de Strasbourg, Christophe DOIGNON, 2008-2009.

- [30] Traitement du Signal, INSA CVL, Serge DOS SANTOS, 2013-2014.
- [31] Eléments de base pour le Traitement Numérique du Signal et de l'Image, Maurice Charbit, Gérard Blanchet, 25 Mars 2010
- [32] Ouahiba Tebbi, ESTIMATION DES LOIS DE FIABILITE EN MECANIQUE PAR LES ESSAIS ACCELERES, Thèse de Doctorat, Université d'Angers, 2005.
- [33] Lyes Hadjadj, Le suivi des matériels, cours de Magister, université de SKIKDA, 2005.
- [34] Élie Arama, Variable aléatoire discrète, Cours Loi de probabilité, Espérance, variance et écart-type, février 2018.
- [35] Marc THOMAS. Fiabilité, maintenance prédictive et vibration des machines. Préface de René Archambault, IMS, Président de l'Association canadienne en vibration de machines (ACVM/CMVA).
- [36] LIGERON J.C. La fiabilité en mécanique. Un outil d'aide à la conception, préface de H.-P. LIEURADE, Paris 1979.
- [37] P.CHAPOUILLE et R. de PAZZIS, Fiabilité des systèmes, masson et C^{le}, éditeurs, Paris 1968.
- [38] COTAINA N, Utilisation de la Maintenance Basée sur la Fiabilité (MBF) pour développer et optimiser les politiques de maintenance, Albi – France.
- [39] LYONNET P. La maintenance: mathématiques et méthodes, 3ème édition, Ed. Lavoisier, Paris 1992.
- [40] Patrice DUPUIS. Enseignant en méthodes de maintenance et fiabilité : IUT Saint Nazaire - GIM

Listes des figures et tableaux

- Listes des figures

- Figure II.1** Représentation de la sinusoïde
- Figure II.2** Représentation de vibration périodique
- Figure II.3** Vibrations aléatoires
- Figure II.4** La représentation des différentes amplitudes (vibration sinusoïdale)
Pour un signal de type sinusoïdal
- Figure II.5** Relations des : accélération, vitesse, déplacement pour un signal sinusoïdal
- Figure II.6** Transformation d'une échelle linéaire en logarithmique
- Figure II.7** Les indicateurs d'une amplitude
- Figure III.1** Signal à temps continu
- Figure III.2** Signal à temps discret
- Figure III.3** Signal à valeurs discrètes
- Figure III.1** Courbe en baignoire
- Figure III.2** Densité de probabilité
- Figure III.3** Fonction du taux d'avarie
- Figure III.4** densité de probabilité avec la variation du paramètre γ .
- Figure III.5** densité de probabilité avec la variation du paramètre η .
- Figure III.6** Fonction de densité de la loi normale centrée
- Figure III.7** Courbes de densités correspondantes à différentes valeurs de l'écart type
- Figure III.8** Courbe de densité présentée par les 3 intervalles caractéristiques
- Figure III.9** La correspondance des courbes de densité entre la loi Normale et celle de Weibull pour $\beta = 3$
- Figure III.10** Densité de probabilité $\mu=0$
- Figure III.11** Fonction de Répartition $\mu=0$
- Figure IV.1** Papier de Weibull (graphique d'Allan Plait)
- Figure IV.2** Tracé du nuage des points $M[t, F(i)]$
- Figure IV.3** Tracé de la droite D
- Figure IV.4** Tracé de la parallèle (D') à la droite (D)
- Figure IV.5** La fonction de Fiabilité $R(t)$.
- Figure IV.6** La fonction de Répartition $F(t)$.
- Figure IV.7** La fonction du Taux de défaillance $\lambda(t)$.

Figure IV.8 La fonction de la densité de probabilité $f(t)$.

- Liste des tableaux

Tableau I-1 - Suivi du niveau vibratoire des indicateurs

Tableau I.2 Surveillance des machines «**VIS** »

Tableau II.1 Tableau récapitulatif des signaux Pair et Impair.

Tableau IV.1 Suivi arrêt groupe turbo alternateur Sonelgaz- SKIKDA (**Annexe**),

Tableau IV.2 TBF classées par ordre croissant.

Tableau IV.3 Calcul des $F(t)\%$.

Tableau IV.4 Tables numériques de Waloddi Weibull (**Annexe**),

Tableau IV.5 Détermination de l'écart entre la fonction théorique et la fonction réelle.

Tableau IV.6 Table 7, Teste de Kolmogorov-Smirnov (**Annexe**),

Glossaire

MTBF	Moyenne des temps de bon fonctionnement.....	h
TBF	Temps de Bon Fonctionnement.....	h
T	La période	S
f	La fréquence	Hz
fr	Fréquence de rotation	Hz/min
CPM	Cycles par minute	C/min
RPM	Rotations par minute.....	R/min
V(t)	La vitesse instantanée	mm/s
V max	La vitesse maximale	mm/s
ω	La pulsation	rd/s
ϕ	La phase à l'origine des temps	rd
X(t)	Le déplacement instantané	mm
X_{ma}	Le déplacement maximal	mm
a (t)	L'accélération instantanée	m/s ² , g
A_{max}	L'accélération maximale	m/s ² , g
A_{ref}	Le niveau déplacement en log.....	mm
V_{ref}	L'accélération de référence	m/s ²
X_{ref}	La vitesse de référence	pm
A eff	L'amplitude efficace	
A_c	L'amplitude crête	
A_{cc}	L'amplitude crête à crête	
C	Le cepstre	
TF^{-1}	La transformée de Fourier inverse	
La	Le niveau d'accélération en log	
Lv	Le niveau de vitesse en log	
Ld	Le déplacement de référence	
X_c	La valeur maximale	
X_{cc}	La valeur crête à crête	
X_{moy}	La valeur moyenne absolue	
RMS	La valeur efficace (Root Mean Square)	
Fc	Le facteur de crête	
K	Le kurtosis	

LMD	La décomposition moyenne locale (Local Mean Decomposition),
AM	Amplitude modulée,
FM	Fréquence modulée,
PFs	Fonctions du produit (Product Functions),
AM-FM	Amplitude Modulated-Frequency Modulated
EMD	Décomposition en mode empirique (Empirical Mode Decomposition
EEMD	Ensemble de décomposition en mode empirique (Ensemble Empirical Mode Decomposition),
RCM	La Maintenance centrée sur la fiabilité (Reliability-Centered Maintenance),
RM	La Maintenance Radicale (Radical Maintenance),
RCA	Analyse de cause fondamentale (Root Cause Analysis),
AMDEC	Analyse en mode de défaillances, de leurs effets et de leurs criticités
FMECA	Failure Mode, Effects and Criticality Analysis,
FTA	Analyse d'arbre de défaillances (Fault Tree Analysis),
PM	Maintenance prédictive (Predictive Maintenance),
SSA	Analyse du spectre singulier (Singular Spectrum Analysis),
AE	Emissions acoustiques (Acoustic Emission),
ODM	Surveillance des débris d'huile (Oil Debris Monitoring),
PCA	Analyse des composantes principales (Principal Component Analysis),
ICA	Analyse des composantes indépendantes (Independent Component Analysis),
REB	Roulements à éléments roulants (Rolling Element Bearing),
MID	Distribution d'intensité de modulation (Modulation Intensity Distribution),
E_x	énergie du signal x ,
P_x	Puissance du signal x ,
$TF[x(t)]$	La transformée de Fourier de x notée $X(\nu)$,
ν	La fréquence parfois à la place (f),
$S(\nu)$	Spectre de x ,
$\delta(t)$	Impulsion de Dirac (ou <i>pic de Dirac</i>),
AFNOR	Association Française de Normalisation
β	Paramètre de forme (Indice de fiabilité)
γ	Paramètre de position
η	Paramètre d'échelle
$R(t)$	La fiabilité (Probabilité de bon fonctionnement)
$F(t)$	La fonction de répartition (Probabilité de défaillance)

$\lambda(t)$	Le taux instantané de défaillance
$f(t)$	La densité de probabilité
\ln	Logarithme népérien
i	Indice des rangs
N	Nombre total de TBF
n_i	Le nombre de défaillances.
$\sum n_i$	Le nombre de défaillances cumulé (pour chaque rang).
α	seuil de confiance
$F_r(t)$	La fonction de répartition réelle
$F_t(t)$	La fonction de répartition théorique
$D_{n,\max}$	L'écart entre la fonction théorique $F_t(t)$ et la fonction réelle $F_r(t)$
$D_{n,\alpha}$	Valeur donnée par la table de Kolmogorov-Smirnov

Annexes II , III et IV

Annexe II

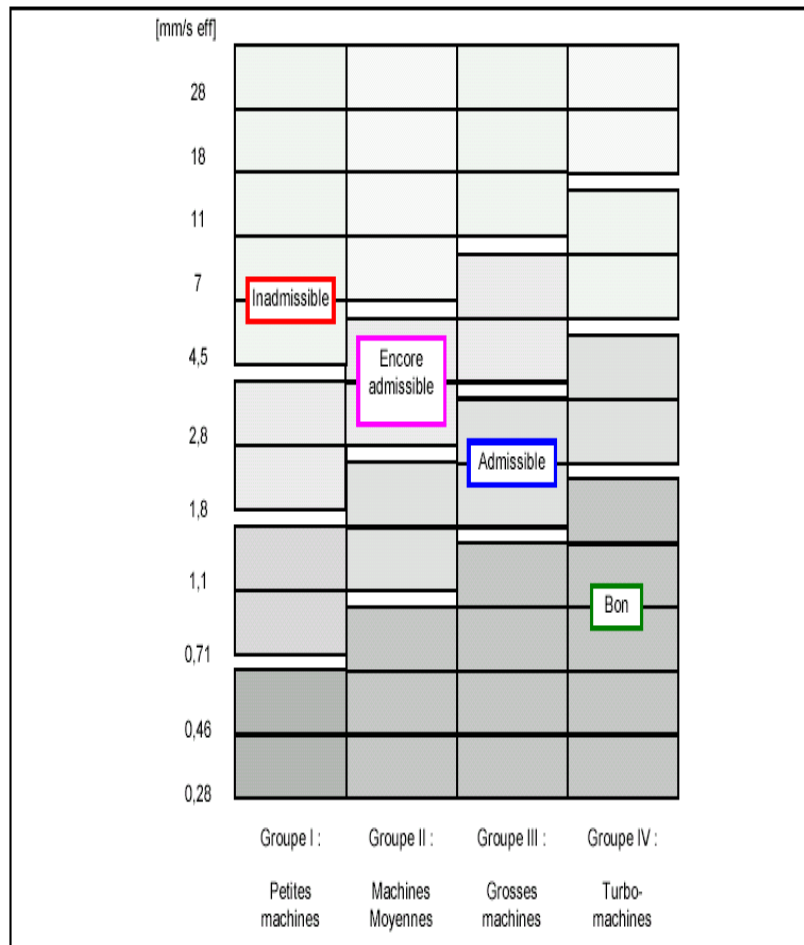


Fig. II.1– Exemples de limites vibratoires proposées par les normes AFNOR E 90-300 ou ISO 2372

Intensité vibratoire		Classification des supports	
V_{eff} [mm/s]		Supports rigides	Supports souples
	0,45	bon	bon
	0,71		
	1,12		
	1,8		
	2,8	satisfaisant	satisfaisant
	4,5		
	7,1	médiocre	médiocre
	11,2		
	18,0	inadmissible	inadmissible
	28,0		
	71,0		

Fig. II.2 – Seuils de jugement selon AFNOR E 90-301

Classe	Vitesse N [tr/mn]	Intensité vibratoire V_{eff} [mm/s] pour une hauteur d'axe H [mm]		
		80 < H 132	132 < H 225	225 < H 315
N (normale)	600 < N 3 600	1,76	2,83	4,45
R (réduite)	600 < N 1 800	0,70	1,13	1,76
	1 800 < N 3 600	1,13	1,76	2,83
S (spéciale)	600 < N 1 800	0,44	0,70	1,13
	1 800 < N 3 600	0,70	1,13	1,76

Fig. II.3 – Seuils de jugement selon AFNOR E 90-310 [mm/s].

Type de machine	Vitesse N [tr/mn]	Valeur max. de la vitesse de vibration [mm/s] pour une hauteur d'axe H [mm]		
		56 < H 132	132 < H 225	H > 225
Moteur seul, mesure effectuée avec un montage souple	$N \leq 1\,800$	0,71	1,12	1,80
	$1\,800 < N \leq 3\,600$	1,12	1,80	2,80
Moteur avec machine entraînée calée sur bout d'arbre	$N \leq 1\,800$	1,12	1,80	2,80
	$1\,800 < N \leq 3\,600$	1,80	2,80	4,50

Fig. II.4 – Valeurs maximales de la vitesse de vibration selon AFNOR F 65-101 [mm/s].

Seuils d'alarme en accélération pour les paramètres hautes fréquences								
Vitesse	300 RPM		1000 RPM		2000 RPM		4000 RPM	
Diamètre de l'arbre en [mm]	Alerte	Alarme	Alerte	alarme	alerte	alarme	alerte	alarme
	S_1	S_2	S_1	S_2	S_1	S_2	S_1	S_2
Ø25	0.06	0.21	0.35	1.1	0.77	2.5	2.1	6.6
Ø100	0.17	0.5	0.9	2.8	2.1	6.4	5.6	17
Ø200	0.3	0.9	1.6	5	3.4	10.0	/	/
Ø400	0.45	1.4	2.4	7.6	/	/	/	/

Fig. II.5 – Seuils d'accélération

Seuils des vitesses verticales						
Seuils des vitesses verticales selon NFE90-300	28	D	D	D	D	
	18				C	
	11.2		C	B	B	B
	7.1					A
	4.5	B	A	A	A	
	2.8					
	1.8	A	A	A	A	
	1.12					
	0.71	A	A	A	A	
	0.45					
	0.28	A	A	A	A	
	Vitesse verticale [mm/s]	Groupe I	Groupe II	Groupe III	Groupe IV	

Fig. II.6 – Seuils de jugement des vitesses verticales

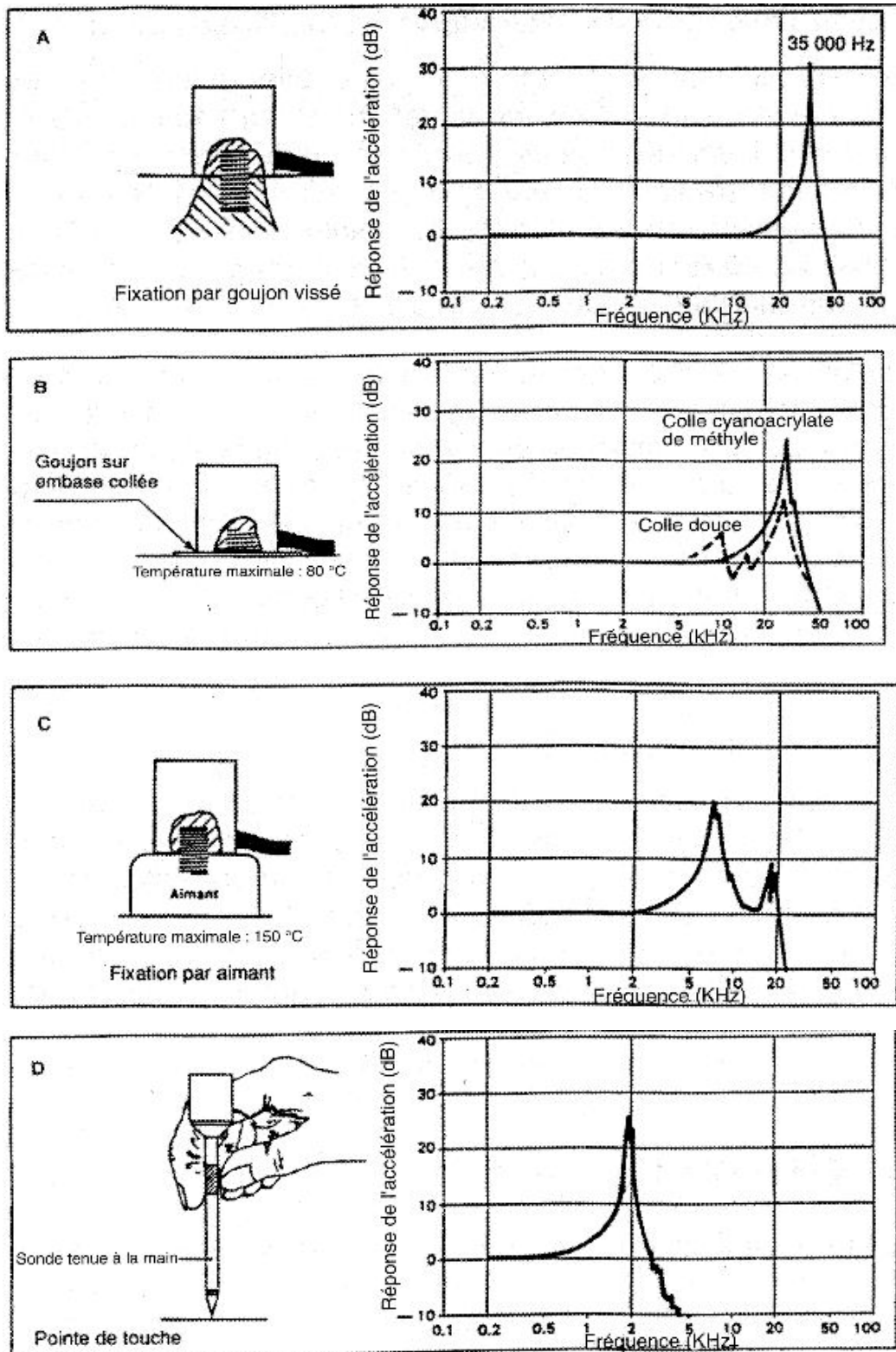


Fig. II.7 – Incidences de la pose d'un accéléromètre

Le mode de pose D limite considérablement la bande passante et le domaine de linéarité du capteur. La répétabilité des mesures qui est un des fondements de la surveillance est très mal assurée avec ce mode de pose.

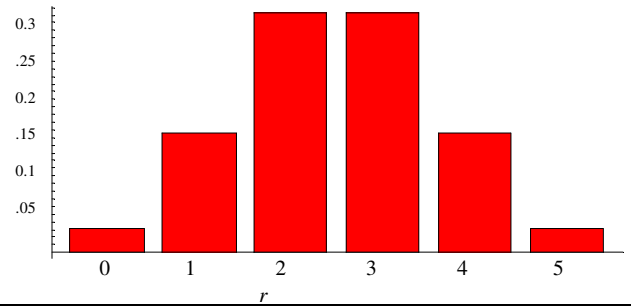
Annexe III

Table 1: Loi Binomiale

$$X \sim \mathcal{B}(n, p)$$

$$f_X(r) = \binom{n}{r} p^r (1-p)^{n-r}$$

Cette table donne la probabilité d'obtenir r succès en N tirages étant donné une probabilité p de succès sur un tirage. Par exemple, la probabilité d'obtenir 1 succès sur 5 tirages à pile ou face est de 0.1563.



N	r	p									
		0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5
1	0	0.9500	0.9000	0.8500	0.8000	0.7500	0.7000	0.6500	0.6000	0.5500	0.5000
	1	0.0500	0.1000	0.1500	0.2000	0.2500	0.3000	0.3500	0.4000	0.4500	0.5000
2	0	0.9025	0.8100	0.7225	0.6400	0.5625	0.4900	0.4225	0.3600	0.3025	0.2500
	1	0.0950	0.1800	0.2550	0.3200	0.3750	0.4200	0.4550	0.4800	0.4950	0.5000
	2	0.0025	0.0100	0.0225	0.0400	0.0625	0.0900	0.1225	0.1600	0.2025	0.2500
3	0	0.8574	0.7290	0.6141	0.5120	0.4219	0.3430	0.2746	0.2160	0.1664	0.1250
	1	0.1354	0.2430	0.3251	0.3840	0.4219	0.4410	0.4436	0.4320	0.4084	0.3750
	2	0.0071	0.0270	0.0574	0.0960	0.1406	0.1890	0.2389	0.2880	0.3341	0.3750
	3	0.0001	0.0010	0.0034	0.0080	0.0156	0.0270	0.0429	0.0640	0.0911	0.1250
4	0	0.8145	0.6561	0.5220	0.4096	0.3164	0.2401	0.1785	0.1296	0.0915	0.0625
	1	0.1715	0.2916	0.3685	0.4096	0.4219	0.4116	0.3845	0.3456	0.2995	0.2500
	2	0.0135	0.0486	0.0975	0.1536	0.2109	0.2646	0.3105	0.3456	0.3675	0.3750
	3	0.0005	0.0036	0.0115	0.0256	0.0469	0.0756	0.1115	0.1536	0.2005	0.2500
	4	0.0000	0.0001	0.0005	0.0016	0.0039	0.0081	0.0150	0.0256	0.0410	0.0625
5	0	0.7738	0.5905	0.4437	0.3277	0.2373	0.1681	0.1160	0.0778	0.0503	0.0313
	1	0.2036	0.3281	0.3915	0.4096	0.3955	0.3602	0.3124	0.2592	0.2059	0.1563
	2	0.0214	0.0729	0.1382	0.2048	0.2637	0.3087	0.3364	0.3456	0.3369	0.3125
	3	0.0011	0.0081	0.0244	0.0512	0.0879	0.1323	0.1811	0.2304	0.2757	0.3125
	4	0.0000	0.0005	0.0022	0.0064	0.0146	0.0284	0.0488	0.0768	0.1128	0.1563
	5	0.0000	0.0000	0.0001	0.0003	0.0010	0.0024	0.0053	0.0102	0.0185	0.0313
6	0	0.7351	0.5314	0.3771	0.2621	0.1780	0.1176	0.0754	0.0467	0.0277	0.0156
	1	0.2321	0.3543	0.3993	0.3932	0.3560	0.3025	0.2437	0.1866	0.1359	0.0938
	2	0.0305	0.0984	0.1762	0.2458	0.2966	0.3241	0.3280	0.3110	0.2780	0.2344
	3	0.0021	0.0146	0.0415	0.0819	0.1318	0.1852	0.2355	0.2765	0.3032	0.3125
	4	0.0001	0.0012	0.0055	0.0154	0.0330	0.0595	0.0951	0.1382	0.1861	0.2344
	5	0.0000	0.0001	0.0004	0.0015	0.0044	0.0102	0.0205	0.0369	0.0609	0.0938
	6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0002	0.0007	0.0018	0.0041	0.0083	0.0156
7	0	0.6983	0.4783	0.3206	0.2097	0.1335	0.0824	0.0490	0.0280	0.0152	0.0078
	1	0.2573	0.3720	0.3960	0.3670	0.3115	0.2471	0.1848	0.1306	0.0872	0.0547
	2	0.0406	0.1240	0.2097	0.2753	0.3115	0.3177	0.2985	0.2613	0.2140	0.1641
	3	0.0036	0.0230	0.0617	0.1147	0.1730	0.2269	0.2679	0.2903	0.2918	0.2734
	4	0.0002	0.0026	0.0109	0.0287	0.0577	0.0972	0.1442	0.1935	0.2388	0.2734
	5	0.0000	0.0002	0.0012	0.0043	0.0115	0.0250	0.0466	0.0774	0.1172	0.1641
	6	0.0000	0.0000	0.0001	0.0004	0.0013	0.0036	0.0084	0.0172	0.0320	0.0547
	7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0002	0.0006	0.0016	0.0037	0.0078
8	0	0.6634	0.4305	0.2725	0.1678	0.1001	0.0576	0.0319	0.0168	0.0084	0.0039
	1	0.2793	0.3826	0.3847	0.3355	0.2670	0.1977	0.1373	0.0896	0.0548	0.0313
	2	0.0515	0.1488	0.2376	0.2936	0.3115	0.2965	0.2587	0.2090	0.1569	0.1094
	3	0.0054	0.0331	0.0839	0.1468	0.2076	0.2541	0.2786	0.2787	0.2568	0.2188
	4	0.0004	0.0046	0.0185	0.0459	0.0865	0.1361	0.1875	0.2322	0.2627	0.2734
	5	0.0000	0.0004	0.0026	0.0092	0.0231	0.0467	0.0808	0.1239	0.1719	0.2188
	6	0.0000	0.0000	0.0002	0.0011	0.0038	0.0100	0.0217	0.0413	0.0703	0.1094
	7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0004	0.0012	0.0033	0.0079	0.0164	0.0313
	8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0002	0.0007	0.0017	0.0039

N	r	p									
		0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5
9	0	0.6302	0.3874	0.2316	0.1342	0.0751	0.0404	0.0207	0.0101	0.0046	0.0020
	1	0.2985	0.3874	0.3679	0.3020	0.2253	0.1556	0.1004	0.0605	0.0339	0.0176
	2	0.0629	0.1722	0.2597	0.3020	0.3003	0.2668	0.2162	0.1612	0.1110	0.0703
	3	0.0077	0.0446	0.1069	0.1762	0.2336	0.2668	0.2716	0.2508	0.2119	0.1641
	4	0.0006	0.0074	0.0283	0.0661	0.1168	0.1715	0.2194	0.2508	0.2600	0.2461
	5	0.0000	0.0008	0.0050	0.0165	0.0389	0.0735	0.1181	0.1672	0.2128	0.2461
	6	0.0000	0.0001	0.0006	0.0028	0.0087	0.0210	0.0424	0.0743	0.1160	0.1641
	7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0003	0.0012	0.0039	0.0098	0.0212	0.0407	0.0703
	8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0004	0.0013	0.0035	0.0083	0.0176
	9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0003	0.0008	0.0020
10	0	0.5987	0.3487	0.1969	0.1074	0.0563	0.0282	0.0135	0.0060	0.0025	0.0010
	1	0.3151	0.3874	0.3474	0.2684	0.1877	0.1211	0.0725	0.0403	0.0207	0.0098
	2	0.0746	0.1937	0.2759	0.3020	0.2816	0.2335	0.1757	0.1209	0.0763	0.0439
	3	0.0105	0.0574	0.1298	0.2013	0.2503	0.2668	0.2522	0.2150	0.1665	0.1172
	4	0.0010	0.0112	0.0401	0.0881	0.1460	0.2001	0.2377	0.2508	0.2384	0.2051
	5	0.0001	0.0015	0.0085	0.0264	0.0584	0.1029	0.1536	0.2007	0.2340	0.2461
	6	0.0000	0.0001	0.0012	0.0055	0.0162	0.0368	0.0689	0.1115	0.1596	0.2051
	7	0.0000	0.0000	0.0001	0.0008	0.0031	0.0090	0.0212	0.0425	0.0746	0.1172
	8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0004	0.0014	0.0043	0.0106	0.0229	0.0439
	9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0005	0.0016	0.0042	0.0098
	10	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0003	0.0010
11	0	0.5688	0.3138	0.1673	0.0859	0.0422	0.0198	0.0088	0.0036	0.0014	0.0005
	1	0.3293	0.3835	0.3248	0.2362	0.1549	0.0932	0.0518	0.0266	0.0125	0.0054
	2	0.0867	0.2131	0.2866	0.2953	0.2581	0.1998	0.1395	0.0887	0.0513	0.0269
	3	0.0137	0.0710	0.1517	0.2215	0.2581	0.2568	0.2254	0.1774	0.1259	0.0806
	4	0.0014	0.0158	0.0536	0.1107	0.1721	0.2201	0.2428	0.2365	0.2060	0.1611
	5	0.0001	0.0025	0.0132	0.0388	0.0803	0.1321	0.1830	0.2207	0.2360	0.2256
	6	0.0000	0.0003	0.0023	0.0097	0.0268	0.0566	0.0985	0.1471	0.1931	0.2256
	7	0.0000	0.0000	0.0003	0.0017	0.0064	0.0173	0.0379	0.0701	0.1128	0.1611
	8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0002	0.0011	0.0037	0.0102	0.0234	0.0462	0.0806
	9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0005	0.0018	0.0052	0.0126	0.0269
	10	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0002	0.0007	0.0021	0.0054
	11	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0002	0.0005
12	0	0.5404	0.2824	0.1422	0.0687	0.0317	0.0138	0.0057	0.0022	0.0008	0.0002
	1	0.3413	0.3766	0.3012	0.2062	0.1267	0.0712	0.0368	0.0174	0.0075	0.0029
	2	0.0988	0.2301	0.2924	0.2835	0.2323	0.1678	0.1088	0.0639	0.0339	0.0161
	3	0.0173	0.0852	0.1720	0.2362	0.2581	0.2397	0.1954	0.1419	0.0923	0.0537
	4	0.0021	0.0213	0.0683	0.1329	0.1936	0.2311	0.2367	0.2128	0.1700	0.1208
	5	0.0002	0.0038	0.0193	0.0532	0.1032	0.1585	0.2039	0.2270	0.2225	0.1934
	6	0.0000	0.0005	0.0040	0.0155	0.0401	0.0792	0.1281	0.1766	0.2124	0.2256
	7	0.0000	0.0000	0.0006	0.0033	0.0115	0.0291	0.0591	0.1009	0.1489	0.1934
	8	0.0000	0.0000	0.0001	0.0005	0.0024	0.0078	0.0199	0.0420	0.0762	0.1208
	9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0004	0.0015	0.0048	0.0125	0.0277	0.0537
	10	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0002	0.0008	0.0025	0.0068	0.0161
	11	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0003	0.0010	0.0029
	12	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0002
13	0	0.5133	0.2542	0.1209	0.0550	0.0238	0.0097	0.0037	0.0013	0.0004	0.0001
	1	0.3512	0.3672	0.2774	0.1787	0.1029	0.0540	0.0259	0.0113	0.0045	0.0016
	2	0.1109	0.2448	0.2937	0.2680	0.2059	0.1388	0.0836	0.0453	0.0220	0.0095
	3	0.0214	0.0997	0.1900	0.2457	0.2517	0.2181	0.1651	0.1107	0.0660	0.0349
	4	0.0028	0.0277	0.0838	0.1535	0.2097	0.2337	0.2222	0.1845	0.1350	0.0873
	5	0.0003	0.0055	0.0266	0.0691	0.1258	0.1803	0.2154	0.2214	0.1989	0.1571
	6	0.0000	0.0008	0.0063	0.0230	0.0559	0.1030	0.1546	0.1968	0.2169	0.2095
	7	0.0000	0.0001	0.0011	0.0058	0.0186	0.0442	0.0833	0.1312	0.1775	0.2095
	8	0.0000	0.0000	0.0001	0.0011	0.0047	0.0142	0.0336	0.0656	0.1089	0.1571
	9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0009	0.0034	0.0101	0.0243	0.0495	0.0873
	10	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0006	0.0022	0.0065	0.0162	0.0349
	11	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0003	0.0012	0.0036	0.0095
	12	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0005	0.0016
	13	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001

N	r	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5
14	0	0.4877	0.2288	0.1028	0.0440	0.0178	0.0068	0.0024	0.0008	0.0002	0.0001
	1	0.3593	0.3559	0.2539	0.1539	0.0832	0.0407	0.0181	0.0073	0.0027	0.0009
	2	0.1229	0.2570	0.2912	0.2501	0.1802	0.1134	0.0634	0.0317	0.0141	0.0056
	3	0.0259	0.1142	0.2056	0.2501	0.2402	0.1943	0.1366	0.0845	0.0462	0.0222
	4	0.0037	0.0349	0.0998	0.1720	0.2202	0.2290	0.2022	0.1549	0.1040	0.0611
	5	0.0004	0.0078	0.0352	0.0860	0.1468	0.1963	0.2178	0.2066	0.1701	0.1222
	6	0.0000	0.0013	0.0093	0.0322	0.0734	0.1262	0.1759	0.2066	0.2088	0.1833
	7	0.0000	0.0002	0.0019	0.0092	0.0280	0.0618	0.1082	0.1574	0.1952	0.2095
	8	0.0000	0.0000	0.0003	0.0020	0.0082	0.0232	0.0510	0.0918	0.1398	0.1833
	9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0003	0.0018	0.0066	0.0183	0.0408	0.0762	0.1222
	10	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0003	0.0014	0.0049	0.0136	0.0312	0.0611
	11	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0002	0.0010	0.0033	0.0093	0.0222
	12	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0005	0.0019	0.0056
	13	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0002	0.0009
	14	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001
15	0	0.4633	0.2059	0.0874	0.0352	0.0134	0.0047	0.0016	0.0005	0.0001	0.0000
	1	0.3658	0.3432	0.2312	0.1319	0.0668	0.0305	0.0126	0.0047	0.0016	0.0005
	2	0.1348	0.2669	0.2856	0.2309	0.1559	0.0916	0.0476	0.0219	0.0090	0.0032
	3	0.0307	0.1285	0.2184	0.2501	0.2252	0.1700	0.1110	0.0634	0.0318	0.0139
	4	0.0049	0.0428	0.1156	0.1876	0.2252	0.2186	0.1792	0.1268	0.0780	0.0417
	5	0.0006	0.0105	0.0449	0.1032	0.1651	0.2061	0.2123	0.1859	0.1404	0.0916
	6	0.0000	0.0019	0.0132	0.0430	0.0917	0.1472	0.1906	0.2066	0.1914	0.1527
	7	0.0000	0.0003	0.0030	0.0138	0.0393	0.0811	0.1319	0.1771	0.2013	0.1964
	8	0.0000	0.0000	0.0005	0.0035	0.0131	0.0348	0.0710	0.1181	0.1647	0.1964
	9	0.0000	0.0000	0.0001	0.0007	0.0034	0.0116	0.0298	0.0612	0.1048	0.1527
	10	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0007	0.0030	0.0096	0.0245	0.0515	0.0916
	11	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0006	0.0024	0.0074	0.0191	0.0417
	12	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0004	0.0016	0.0052	0.0139
	13	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0003	0.0010	0.0032
	14	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0005
	15	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
16	0	0.4401	0.1853	0.0743	0.0281	0.0100	0.0033	0.0010	0.0003	0.0001	0.0000
	1	0.3706	0.3294	0.2097	0.1126	0.0535	0.0228	0.0087	0.0030	0.0009	0.0002
	2	0.1463	0.2745	0.2775	0.2111	0.1336	0.0732	0.0353	0.0150	0.0056	0.0018
	3	0.0359	0.1423	0.2285	0.2463	0.2079	0.1465	0.0888	0.0468	0.0215	0.0085
	4	0.0061	0.0514	0.1311	0.2001	0.2252	0.2040	0.1553	0.1014	0.0572	0.0278
	5	0.0008	0.0137	0.0555	0.1201	0.1802	0.2099	0.2008	0.1623	0.1123	0.0667
	6	0.0001	0.0028	0.0180	0.0550	0.1101	0.1649	0.1982	0.1983	0.1684	0.1222
	7	0.0000	0.0004	0.0045	0.0197	0.0524	0.1010	0.1524	0.1889	0.1969	0.1746
	8	0.0000	0.0001	0.0009	0.0055	0.0197	0.0487	0.0923	0.1417	0.1812	0.1964
	9	0.0000	0.0000	0.0001	0.0012	0.0058	0.0185	0.0442	0.0840	0.1318	0.1746
	10	0.0000	0.0000	0.0000	0.0002	0.0014	0.0056	0.0167	0.0392	0.0755	0.1222
	11	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0002	0.0013	0.0049	0.0142	0.0337	0.0667
	12	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0002	0.0011	0.0040	0.0115	0.0278
	13	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0002	0.0008	0.0029	0.0085
	14	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0005	0.0018
	15	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0002
	16	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
17	0	0.4181	0.1668	0.0631	0.0225	0.0075	0.0023	0.0007	0.0002	0.0000	0.0000
	1	0.3741	0.3150	0.1893	0.0957	0.0426	0.0169	0.0060	0.0019	0.0005	0.0001
	2	0.1575	0.2800	0.2673	0.1914	0.1136	0.0581	0.0260	0.0102	0.0035	0.0010
	3	0.0415	0.1556	0.2359	0.2393	0.1893	0.1245	0.0701	0.0341	0.0144	0.0052
	4	0.0076	0.0605	0.1457	0.2093	0.2209	0.1868	0.1320	0.0796	0.0411	0.0182
	5	0.0010	0.0175	0.0668	0.1361	0.1914	0.2081	0.1849	0.1379	0.0875	0.0472
	6	0.0001	0.0039	0.0236	0.0680	0.1276	0.1784	0.1991	0.1839	0.1432	0.0944
	7	0.0000	0.0007	0.0065	0.0267	0.0668	0.1201	0.1685	0.1927	0.1841	0.1484
	8	0.0000	0.0001	0.0014	0.0084	0.0279	0.0644	0.1134	0.1606	0.1883	0.1855
	9	0.0000	0.0000	0.0003	0.0021	0.0093	0.0276	0.0611	0.1070	0.1540	0.1855
	10	0.0000	0.0000	0.0000	0.0004	0.0025	0.0095	0.0263	0.0571	0.1008	0.1484
	11	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0005	0.0026	0.0090	0.0242	0.0525	0.0944
	12	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0006	0.0024	0.0081	0.0215	0.0472
	13	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0005	0.0021	0.0068	0.0182
	14	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0004	0.0016	0.0052

N	r	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5
17	15	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0003	0.0010
	16	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001
	17	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
18	0	0.3972	0.1501	0.0536	0.0180	0.0056	0.0016	0.0004	0.0001	0.0000	0.0000
	1	0.3763	0.3002	0.1704	0.0811	0.0338	0.0126	0.0042	0.0012	0.0003	0.0001
	2	0.1683	0.2835	0.2556	0.1723	0.0958	0.0458	0.0190	0.0069	0.0022	0.0006
	3	0.0473	0.1680	0.2406	0.2297	0.1704	0.1046	0.0547	0.0246	0.0095	0.0031
	4	0.0093	0.0700	0.1592	0.2153	0.2130	0.1681	0.1104	0.0614	0.0291	0.0117
	5	0.0014	0.0218	0.0787	0.1507	0.1988	0.2017	0.1664	0.1146	0.0666	0.0327
	6	0.0002	0.0052	0.0301	0.0816	0.1436	0.1873	0.1941	0.1655	0.1181	0.0708
	7	0.0000	0.0010	0.0091	0.0350	0.0820	0.1376	0.1792	0.1892	0.1657	0.1214
	8	0.0000	0.0002	0.0022	0.0120	0.0376	0.0811	0.1327	0.1734	0.1864	0.1669
	9	0.0000	0.0000	0.0004	0.0033	0.0139	0.0386	0.0794	0.1284	0.1694	0.1855
	10	0.0000	0.0000	0.0001	0.0008	0.0042	0.0149	0.0385	0.0771	0.1248	0.1669
	11	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0010	0.0046	0.0151	0.0374	0.0742	0.1214
	12	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0002	0.0012	0.0047	0.0145	0.0354	0.0708
	13	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0002	0.0012	0.0045	0.0134	0.0327
	14	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0002	0.0011	0.0039	0.0117
	15	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0002	0.0009	0.0031
	16	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0006
	17	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001
	18	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
19	0	0.3774	0.1351	0.0456	0.0144	0.0042	0.0011	0.0003	0.0001	0.0000	0.0000
	1	0.3774	0.2852	0.1529	0.0685	0.0268	0.0093	0.0029	0.0008	0.0002	0.0000
	2	0.1787	0.2852	0.2428	0.1540	0.0803	0.0358	0.0138	0.0046	0.0013	0.0003
	3	0.0533	0.1796	0.2428	0.2182	0.1517	0.0869	0.0422	0.0175	0.0062	0.0018
	4	0.0112	0.0798	0.1714	0.2182	0.2023	0.1491	0.0909	0.0467	0.0203	0.0074
	5	0.0018	0.0266	0.0907	0.1636	0.2023	0.1916	0.1468	0.0933	0.0497	0.0222
	6	0.0002	0.0069	0.0374	0.0955	0.1574	0.1916	0.1844	0.1451	0.0949	0.0518
	7	0.0000	0.0014	0.0122	0.0443	0.0974	0.1525	0.1844	0.1797	0.1443	0.0961
	8	0.0000	0.0002	0.0032	0.0166	0.0487	0.0981	0.1489	0.1797	0.1771	0.1442
	9	0.0000	0.0000	0.0007	0.0051	0.0198	0.0514	0.0980	0.1464	0.1771	0.1762
	10	0.0000	0.0000	0.0001	0.0013	0.0066	0.0220	0.0528	0.0976	0.1449	0.1762
	11	0.0000	0.0000	0.0000	0.0003	0.0018	0.0077	0.0233	0.0532	0.0970	0.1442
	12	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0004	0.0022	0.0083	0.0237	0.0529	0.0961
	13	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0005	0.0024	0.0085	0.0233	0.0518
	14	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0006	0.0024	0.0082	0.0222
	15	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0005	0.0022	0.0074
	16	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0005	0.0018
	17	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0003
	18	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	19	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
20	0	0.3585	0.1216	0.0388	0.0115	0.0032	0.0008	0.0002	0.0000	0.0000	0.0000
	1	0.3774	0.2702	0.1368	0.0576	0.0211	0.0068	0.0020	0.0005	0.0001	0.0000
	2	0.1887	0.2852	0.2293	0.1369	0.0669	0.0278	0.0100	0.0031	0.0008	0.0002
	3	0.0596	0.1901	0.2428	0.2054	0.1339	0.0716	0.0323	0.0123	0.0040	0.0011
	4	0.0133	0.0898	0.1821	0.2182	0.1897	0.1304	0.0738	0.0350	0.0139	0.0046
	5	0.0022	0.0319	0.1028	0.1746	0.2023	0.1789	0.1272	0.0746	0.0365	0.0148
	6	0.0003	0.0089	0.0454	0.1091	0.1686	0.1916	0.1712	0.1244	0.0746	0.0370
	7	0.0000	0.0020	0.0160	0.0545	0.1124	0.1643	0.1844	0.1659	0.1221	0.0739
	8	0.0000	0.0004	0.0046	0.0222	0.0609	0.1144	0.1614	0.1797	0.1623	0.1201
	9	0.0000	0.0001	0.0011	0.0074	0.0271	0.0654	0.1158	0.1597	0.1771	0.1602
	10	0.0000	0.0000	0.0002	0.0020	0.0099	0.0308	0.0686	0.1171	0.1593	0.1762
	11	0.0000	0.0000	0.0000	0.0005	0.0030	0.0120	0.0336	0.0710	0.1185	0.1602
	12	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0008	0.0039	0.0136	0.0355	0.0727	0.1201
	13	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0002	0.0010	0.0045	0.0146	0.0366	0.0739
	14	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0002	0.0012	0.0049	0.0150	0.0370
	15	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0003	0.0013	0.0049	0.0148
	16	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0003	0.0013	0.0046
	17	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0002	0.0011
	18	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Annexe IV :

Tab. IV.1 : suivi arrêt groupe turbo alternateur Sonelgaz- SKIKDA

2010							
Moi	Poste n°	Début	Fin		Nombre heures	Equipement	Les opérations
JANVIER	2	01/01/2010 00:00	07/01/2010 15:01	131	159,02	Chaudière	RP + remplacement bagues d'excitation alternateur
FÉVRIER	2	26/02/2010 10:30	26/02/2010 14:26	131	3,93	Poste d'eau	Dt groupe par NTTB ballon chaudière suite aux déclenchements de 02 pompes alimentaires
MARS	2	06/03/2010 17:05	11/03/2010 01:30	131	104,42	Poste d'eau	Arrêt volontaire suite à percement chaudière + éclatement tresses vanne d'isolement soupape petit débit
	2	11/03/2010 21:44	13/03/2010 02:58	131	29,24	Poste d'eau	Arrêt volontaire suite à fuite importante d'eau alimentaire à proximité de la caisse à huile turbine et du bloc électrique
	2	15/03/2010 12:55	15/03/2010 20:04	131	7,15	Poste d'eau	Dt groupe par protection manque vide au condenseur suite au déclenchement de la PCP N° 22 et non fermeture de la vanne papillon
	2	18/03/2010 21:30	19/03/2010 01:54	131	4,4	Sces Auxi	Dt groupe par protection manque vide au condenseur suite au déclenchement de la PCP N° 22 et non
AVRIL	2	05/04/2010 22:13	09/04/2010 10:15	131	84,03	Chaudière	Arrêt volontaire pour réparation chaudière
MAI	2	19/05/2010 21:35	23/05/2010 22:04	131	96,49	Chaudière	Arrêt volontaire pour réparation percement chaudière
JUIN	2	02/06/2010 22:47	07/06/2010 14:58	131	112,19	Chaudière	Arrêt volontaire pour réparation percement chaudière
JUILLET	2	08/07/2010 16:55	08/07/2010 18:20	131	1,41	Poste d'eau	Dt groupe par protection NTTB ballon chaudière suite au Dt de la PA N° 21 (PA N°22 consignée)
	2	17/07/2010 20:52	18/07/2010 02:02	131	5,16	Poste d'eau	Dt groupe suite au Dt de PA 22 par température palier moteur très élevé et non reprise de la PA 21
AOÛT	2	22/08/2010 01:37	22/08/2010 22:03	131	20,43	Alternateur	Dt de la turbine et ouverture du disjoncteur machine par protection « Perte d'excitation » Suite à un défaut sur système d'excitation
	2	22/08/2010 23:25	23/08/2010 01:10	131	1,75	Alternateur	Arrêt volontaire pour recherche défaut sur système d'excitation
SEPTEMBRE	2	05/09/2010 20:07	05/09/2010 23:44	131	3,62	Alternateur	Dt de la turbine et ouverture du disjoncteur machine par protection « Perte d'excitation » Suite à un défaut sur système d'excitation
	2	06/09/2010 23:09	07/09/2010 01:38	131	2,48	Eau de Mer	Arrêt volontaire par protection « coupure des feux » Suite à la dégradation du vide au condenseur causé par le Dt de la PCP N°22 et non fermeture de la vanne papillon
	2	08/09/2010 11:58	08/09/2010 12:45	131	0,78	Alternateur	Arrêt volontaire pour élimination point chaud sur connexion thyristor sur armoire système d'excitation
	2	10/09/2010 19:07	10/09/2010 21:59	131	2,87	Mat.Elec	Dt chaudière par manque détection flamme (manque 127V onduleur)
	2	18/09/2010 22:07	20/09/2010 18:00	131	43,88	MC	Arrêt volontaire suite à vibration élevée au ventilateur de recyclage N° 21
	2	20/09/2010 18:00	24/09/2010 06:33	131	84,55	MC	Travaux sur ventilateur de recyclage N° 21 en cours
	2	24/09/2010 09:55	25/09/2010 21:51	131	35,93	Ext. Réseau	Arrêt volontaire à la demande de l'OS pour un transfert de ligne
	2	28/09/2010 14:10	28/09/2010 15:10	131	1,00	Chaudière	Dt groupe par protection « vide au condenseur supérieur à 500g/cm² "suite à un essai amorçage ballon 107
OCTOBRE	2	28/10/2010 21:47	01/11/2010 00:00	131	74,22	Chaudière	Arrêt programmé suite à consommation importante d'eau (percement chaudière + diverses fuites)
NOVEMBRE	2	01/11/2010 00:00	01/11/2010 18:18	131	18,30	Chaudière	A L'arrêt (consommation importante d'eau ; percement chaudière + diverses fuites)
DÉCEMBRE		NEANT					
2011							
JANVIER	2	01/01/2011 22:02	05/01/2011 18:00	131	91,97	Chaudière	Arrêt volontaire pour réparation percement chaudière + diverses fuites
	2	05/01/2011 18:00	08/01/2011 18:00	131	72,00	Chaudière	Prolongation arrêt (travaux non terminés)
	2	08/01/2011 18:00	10/01/2011 14:26	131	44,43	Chaudière	Prolongation arrêt (travaux non terminés)

FÉVRIER	2	02/02/2011 03h00	02/02/2011 08h36	131	5,60	Chaudière	Dt par NTTB ballon chaudière suite au Dt du VS 21 et non fermeture du registre de refoulement
MARS	2	27/03/2011 13:43	27/03/2011 15:58	131	2,25	Chaudière	Dt chaudière par protection NTTB ballon suite au Dt de la PA N° 21 (PA N° 22 consignée)
	2	28/03/2011 22:30	29/03/2011 10:00	131	11,50	Ext. Réseau	Arrêt volontaire à la demande de DN pour transfert de ligne 220kv pour des travaux
	2	29/03/2011 10:00	31/03/2011 10:35	131	48,58	Chaudière	Prolongation arrêt pour réparation percement chaudière + diverses fuites
	2	31/03/2011 22:45	01/04/2011 00:00	131	1,25	Chaudière	Dt groupe par protection NTTB ballon suite au Dt de la PA N° 22 par protection niveau bas coupleur et non reprise de la PA N° 21
AVRIL	2	01/04/2011 00:00	01/04/2011 03:41	131	3,68	Chaudière	A l'arrêt (Dt groupe par protection NTTB ballon suite au Dt de la PA N° 22 par protection niveau bas coupleur et non reprise de la PA N° 21)
	2	20/04/2011 13:48	24/04/2011 03:25	131	85,62	MC	Arrêt volontaire suite à vibration élevé sur ventilateur de recyclage N° 22 et indisponibilité ventilateur de recyclage N°21
MAI		NEANT					
JUIN	2	03/06/2011 22:46	07/06/2011 18:00	131	91,23	MC	Arrêt volontaire pour épreuve hydraulique au condenseur et réparation diverses fuites
	2	07/06/2011 18:00	08/06/2011 18:00	131	24,00	Alternateur	Prolongation arrêt suite à défaut système d'excitation
	2	08/06/2011 18:00	09/06/2011 19:49	131	25,82	Alternateur	Intervention sur défaut système d'excitation en cours
JUILLET	2	06/07/2011 22:45	09/07/2011 13:27	131	62,70	Poste d'eau	Arrêt volontaire suite à rupture des tresses vanne d'isolement soupape alimentaire petit débit
	2	28/07/2011 23:40	01/08/2011 00:00	131	72,33	Chaudière	Arrêt volontaire suite à percement chaudière et détérioration vide au condenseur (risque rupture des tubes condenseur)
AOÛT	2	01/08/2011 00:00	01/08/2011 10:50	131	10,83	Chaudière	A l'arrêt (suite à percement chaudière et détérioration vide au condenseur risque rupture des tubes condenseur)
	2	02/08/2011 01:10	02/08/2011 16:27	131	15,28	Ext. Réseau	Déclenchement groupe par protection distance suite à un défaut sur la ligne 220kv
	2	20/08/2011 05:52	20/08/2011 12:47	131	6,92	Ext. Réseau	Déclenchement groupe par protection distance suite défaut sur ligne 220 KV
SEPTEMBRE	2	11/09/2011 23:30	13/09/2010 08:57	131	33,45	Turbine	Arrêt volontaire suite à vibrations élevées paliers rotor BP
	2	13/09/2010 08:57	15-09-2010 14h46	131	53,82	Turbine	Inspection coussinets paliers turbine rotor BP suite aux vibrations élevées
	2	15-09-2010 14h46	01-10-2011 00h00	131	369,23	EPG	RP + réfection bardage chaudière et nettoyage galerie eau de mer
OCTOBRE	2	01/10/2011 00:00	15/10/2011 18:00	131	354,00		RP + réfection bardage chaudière et nettoyage galerie eau de mer
	2	15/10/2011 18:00	25/10/2011 18:00	131	240,00		Travaux de réparation des coussinets en cours
	2	25/10/2011 18:00	31/10/2011 18:00	131	144,00		Travaux non terminés
	2	31/10/2011 18:00	01/11/2011 00:00	131	6,00		Inspection et mesure d'isolement gaines à barres
NOVEMBRE	2	01/11/2011 00:00	01/11/2011 16:00	131	16,00		Inspection et mesure d'isolement gaines à barres
	2	01/11/2011 16:00	03/11/2011 21:06	131	53,10		Travaux non terminés
	2	03/11/2011 22:05	04/11/2011 22:01	131	23,93		Arrêt volontaire suite à fuite d'huile importante palier arrière HP turbine
	2	04/11/2011 23:43	05/11/2011 20:32	131	20,82		Arrêt volontaire pour réparation fuite d'huile palier arrière HP turbine
	2	24/11/2011 22:43	26/11/2011 09:31	131	34,80		Arrêt volontaire suite à présence étincelles importantes sur bague d'excitation
DÉCEMBRE	2	18/12/2011 01:48	18/12/2011 18:00	131	16,20	Chaudière	
	2	18/12/2011 18:00	19/12/2011 00:00	131	6,00	Mod. Essais	
	2	19/12/2011 00:00	19/12/2011 10:00	131	10,00	Turbine	
	2	19/12/2011 10:00	19/12/2011 18:00	131	8,00	Turbine	
	2	19/12/2011 18:00	20/12/2011 18:00	131	24,00	Turbine	
	2	20/12/2011 18:00	22/12/2011 01:02	131	31,03	Turbine	

2012

JANVIER	2	06/01/2012 21:50	09/01/2012 16:00	131	66,17	Chaudière
	2	09/01/2012 16:00	11/01/2012 00:53	131	32,88	Turbine

Tab. IV.4 – Des tables numériques adaptées permettent de déterminer la valeur A. [15]

β	A	B	β	A	B	β	A	B	β	A	B
0,05	2,43290E+18	9,03280E+23	1,75	0,89062	0,52523	3,45	0,89907	0,28822	5,15	0,91974	0,20505
0,1	3,62880E+06	1,55977E+09	1,8	0,88929	0,51123	3,5	0,89975	0,28473	5,2	0,92025	0,20336
0,15	2,59357E+03	1,21993E+05	1,85	0,88821	0,49811	3,55	0,90043	0,28133	5,25	0,92075	0,20170
0,2	1,20000E+02	1,90116E+03	1,9	0,88736	0,48579	3,6	0,90111	0,27802	5,3	0,92125	0,20006
0,25	2,40000E+01	1,99359E+02	1,95	0,88671	0,47419	3,65	0,90178	0,27479	5,35	0,92175	0,19846
0,3	9,26053E+00	5,00780E+01	2	0,88623	0,46325	3,7	0,90245	0,27164	5,4	0,92224	0,19688
0,35	5,02914E+00	1,99761E+01	2,05	0,88589	0,45291	3,75	0,90312	0,26857	5,45	0,92272	0,19532
0,4	3,32335E+00	1,04382E+01	2,1	0,88569	0,44310	3,8	0,90379	0,26558	5,5	0,92320	0,19379
0,45	2,47859E+00	6,46009E+00	2,15	0,88561	0,43380	3,85	0,90445	0,26266	5,55	0,92368	0,19229
0,5	2,00000E+00	4,47214E+00	2,2	0,88562	0,42495	3,9	0,90510	0,25980	5,6	0,92414	0,19081
0,55	1,70243E+00	3,34530E+00	2,25	0,88573	0,41652	3,95	0,90576	0,25701	5,65	0,92461	0,18935
0,6	1,50458E+00	2,64514E+00	2,3	0,88591	0,40848	4	0,90640	0,25429	5,7	0,92507	0,18792
0,65	1,36627E+00	2,17887E+00	2,35	0,88617	0,40080	4,05	0,90704	0,25162	5,75	0,92552	0,18651
0,7	1,26582E+00	1,85117E+00	2,4	0,88648	0,39345	4,1	0,90768	0,24902	5,8	0,92597	0,18512
0,75	1,19064	1,61077	2,45	0,88685	0,38642	4,15	0,90831	0,24647	5,85	0,92641	0,18375
0,8	1,13300	1,42816	2,5	0,88726	0,37967	4,2	0,90894	0,24398	5,9	0,92685	0,18240
0,85	1,08796	1,28542	2,55	0,88772	0,37319	4,25	0,90956	0,24154	5,95	0,92729	0,18107
0,9	1,05218	1,17111	2,6	0,88821	0,36696	4,3	0,91017	0,23915	6	0,92772	0,17977
0,95	1,02341	1,07769	2,65	0,88873	0,36097	4,35	0,91078	0,23682	6,05	0,92815	0,17848
1	1,00000	1,00000	2,7	0,88928	0,35520	4,4	0,91138	0,23453	6,1	0,92857	0,17721
1,05	0,98079	0,93440	2,75	0,88986	0,34963	4,45	0,91198	0,23229	6,15	0,92898	0,17596
1,1	0,96491	0,87828	2,8	0,89045	0,34427	4,5	0,91257	0,23009	6,2	0,92940	0,17473
1,15	0,95170	0,82971	2,85	0,89106	0,33909	4,55	0,91316	0,22793	6,25	0,92980	0,17351
1,2	0,94066	0,78724	2,9	0,89169	0,33408	4,6	0,91374	0,22582	6,3	0,93021	0,17232
1,25	0,93138	0,74977	2,95	0,89233	0,32924	4,65	0,91431	0,22375	6,35	0,93061	0,17113
1,3	0,92358	0,71644	3	0,89298	0,32455	4,7	0,91488	0,22172	6,4	0,93100	0,16997
1,35	0,91699	0,68657	3,05	0,89364	0,32001	4,75	0,91544	0,21973	6,45	0,93139	0,16882
1,4	0,91142	0,65964	3,1	0,89431	0,31561	4,8	0,91600	0,21778	6,5	0,93178	0,16769
1,45	0,90672	0,63522	3,15	0,89498	0,31135	4,85	0,91655	0,21586	6,55	0,93216	0,16657
1,5	0,90275	0,61294	3,2	0,89565	0,30721	4,9	0,91710	0,21397	6,6	0,93254	0,16547
1,55	0,89939	0,59252	3,25	0,89633	0,30319	4,95	0,91764	0,21212	6,65	0,93292	0,16439
1,6	0,89657	0,57372	3,3	0,89702	0,29929	5	0,91817	0,21031	6,7	0,93329	0,16332
1,65	0,89421	0,55635	3,35	0,89770	0,29550	5,05	0,91870	0,20853	6,75	0,93366	0,16226
1,7	0,89224	0,54024	3,4	0,89838	0,29181	5,1	0,91922	0,20677	6,8	0,93402	0,16121

Tab. IV.6 – (Table 7, Teste de Kolmogorov-Smirnov)**Table 7: Kolmogorov-Smirnov Test**

*(If calculated ratio is greater than value shown,
then reject the null hypothesis at the chosen
level of confidence.)*

SAMPLE SIZE (N)	LEVEL OF SIGNIFICANCE FOR D = MAXIMUM [$F_0(X) - S_n(X)$]				
	.20	.15	.10	.05	.01
1	.900	.925	.950	.975	.995
2	.684	.726	.776	.842	.929
3	.565	.597	.642	.708	.828
4	.494	.525	.564	.624	.733
5	.446	.474	.510	.565	.669
6	.410	.436	.470	.521	.618
7	.381	.405	.438	.486	.577
8	.358	.381	.411	.457	.543
9	.339	.360	.388	.432	.514
10	.322	.342	.368	.410	.490
11	.307	.326	.352	.391	.468
12	.295	.313	.338	.375	.450
13	.284	.302	.325	.361	.433
14	.274	.292	.314	.349	.418
15	.266	.283	.304	.338	.404
16	.258	.274	.295	.328	.392
17	.250	.266	.286	.318	.381
18	.244	.259	.278	.309	.371
19	.237	.252	.272	.301	.363
20	.231	.246	.264	.294	.356
25	.210	.220	.240	.270	.320
30	.190	.200	.220	.240	.290
35	.180	.190	.210	.230	.270
OVER 35	<u>1.07</u>	<u>1.14</u>	<u>1.22</u>	<u>1.36</u>	<u>1.63</u>
	\sqrt{N}	\sqrt{N}	\sqrt{N}	\sqrt{N}	\sqrt{N}