République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Yahia Fares Médéa

Faculté des sciences et de la technologie

Département Génie de la matière

Projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme Master

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Mécatronique

Conception et réalisation d'un système d'acquisition des signaux acoustiques et vibratoires

---

Présenté par :

- MAKHLOUF Youcef

- DJEZIRI Soufiane

Proposé par :

Dr.BOUMAHDI Mouloud

Dr. OULDZMIRLI Mohamed

2015/2016



Remerciements

je voudrais d'abord remercier dieu, avant toute autre personne, de m'avoir donné courage, santé, volonté, et surtout force afin de pouvoir réaliser ce modeste travail dans des meilleures conditions.

J'aimerais manifester ma gratitude pour la patience, le soutien et l'aide précieuse à mon promoteur Dr.BOUMAHdI MOULOUD.

Je remercie également Dr OULDZMIRLI Mohamed.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté à me rencontrer et répondre à mes questions durant mes recherches.

Je tenais à remercier vivement toutes personnes ayant contribué à la réalisation de ce précieux travail.

À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

Figure 3.26- Véhicule, 500 Hz 66
Figure 3.27- Véhicule, 1000 Hz 66
Figure 3.28- Véhicule, 10000 Hz 67
Figure 3.29 Evolution de Rms en fonction la gamme de mesure 67
Figure 3.30 Evolution de la valeur crête en fonction la gamme de mesure 68
Figure 3.31 Evolution du facteur crête en fonction la gamme de mesure 68
Figure 3.32 Evolution des kératoses en fonction la gamme de mesure 69

Figure 2.17 .Capteur générant un courant associé à un convertisseur courant-tension à amplificateur opérationnel 41
Figure. 2.18. : Echantillonnages d'un signal de mesure (a) avec une fréquence **43**
Figure .2.19 : Représentations de codages d'un signal sur 2 et 3 bits et avec échantillonnages 43
Figure 3.1. Schéma de la chaîne d'acquisition 44
Figure 3.2- Schéma universel d'une carte son **45**
Figure 3.3- vues de face et arrière de l'accéléromètre 46
Figure 3.4-schéma électronique de l'accéléromètre 46
Figure 3.5-Schéma de principe d'un microphone 47
Figure 3.6- Prise jack **48**
Figure 3.7- Cordon USB 2.0 type A male 48
Figure 3.8- Schéma du système d'acquisition des signaux 48
Figure 3.9- L'interface développée **49**
Figure 3.10- Procédure d'utilisation du système développé 52
Figure 3.11- échantillonnage d'un signal 53
Figure 3.12- Suppression, par le filtre anti-repliement, du risque 55
Figure 3.13- Positionnement de la fréquence de coupure du filtre anti-Repliement **55**
Figure 3.14-Evolution de la résolution 56
Figure 3.15-Evolution du temps d'acquisition 57
Figure 3.16- Résultats issus de l'analyse des signaux sinusoïdaux 58
Figure 3.17- Marteau/acier 500 Hz 59
Figure 3.18- Marteau/acier 1000 Hz 60
Figure 3.19- Comparaison entre les indicateurs statistiques des deux signaux (acier)…… ……..... 60
Figure 3.20- Marteau/acier 10000 Hz 61
Figure 3.21- Evolution de la valeur de RMS en fonction la gamme de mesure 62
Figure 3.22- Marteau/bois 500 Hz 63
Figure 3.23- Marteau/bois 1000 Hz 63
Figure 3.24- Marteau/bois 10000 Hz 6**4**
Figure 3..25- Comparaison entre les indicateurs statistiques des deux signaux (marteau/bois)…… ……..... 65

Liste des figures

Figure 1.1. Classification des siganux déterministes 3
Figure 1.2. Classification des siganux aléatoires 3
Figure 1.3. Exemple du son pur et son contenu fréquentiel 8
Figure 1.4. Exemples des signaux acoustiques……..... 9
Figure 1. 5. Exemple de spectre en bandes fines……..... 13
Figure 1.6. Système masse ressort 14
Figure 1.7. Représentation des amplitudes,…….……..…….. 17
Figure 1.8. schéma de l'analyse vibratoire 17
Figure 1.9. Evolution du facteur de crête FC en fonction du temps……..…….. 20
Figure 1.10. Variation du facteur K en fonction du temps..... 20
Figure 1.11.Exemple de spectre PBC 21
Figure 1.12.deux exemples de spectres FFT 23
Figure 1.13. Cepstre 2**4**
Figure 2.1. Exemple de l'évolution d'un mesurande et de la réponse correspondante 27
Figure 2.2. Corps d'épreuve 27
Figure 2.3. Effet Hall 30
Figure 2.4. Effet induction électromagnétique 31
Figure 2.5. L'unité de l'E.M. est généralement l'unité du mesurande 32
Figure 2.6. Fonction de transfert 32
Figure 2.7. Sensibilité 33
Figure 2.8. Illustration des notions de la fidélité et justesse 34
Figure 2.9. Hystérésis **35**
Figure 2.10.Signal d'entrée x(t)…… 36
Figure 2.11. Temps de réponse d'un dispositif du 1_{er} ordre 36
Figure 2.12.Temps de réponse d'un dispositif du 2_{nd} ordre 37
Figure 2.13. Bande passante…… 37
Figure 2.14.Chaîne d'acquisition 39
Figure.2 .15 . Exemple de chaîne d'acquisition 39
Figure. 2.16 .Emplacement de la chaîne 40

Chapitre 02 : Présentation des capteurs et des chaînes d'acquisition

2.1. Introduction 27
2.2. Capteurs 27
2.2.1. Définition 27
2.2.2. Corps d'épreuve 28
2.2.3. Classification des capteurs 28
2.2.4. Capteur actif 28
2.2.5. Capteur passif 31
2.2.6. Caractéristiques métrologiques 32
2.3. Chaîne d'acquisition 38
2.3.1. Constitution de la chaîne 38
2.4. Conditionnement des signaux 40
2.4.1. 2.4.1. Conversion courant-tension 40
2.4.2. Amplification **41**
2.4.3. Filtrage 41
2.5. Conversion analogique/numérique 42

Chapitre 03 : Conception et réalisation d'une chaîne d'acquisition des signaux

3.1. Introduction 44
3.2. Conception et réalisation du système d'acquisition 4**4**
3.3. Conception d'une interface graphique pour l'analyse des signaux 49
3.4. Procédure d'utilisation de l'interface graphique 51
3.5. Applications 53
3.5.1. Echantillonnage des signaux 53
3.5.2. Analyse de deux signaux sinusoïdaux 58
3.5.3. Analyse des signaux acoustiques et vibratoires réels 59
Conclusion générale 70
Références 71
Annexe : Résultats supplémentaires 72

Table des matières

Résumé ii

Liste des figures iii

Liste des tableaux vi

Introduction générale 1

Chapitre 1 : Acoustique et vibration

1.1. Introduction 2

1.2. Types des signaux 2

1.3. Méthodes d'analyse des signaux acoustiques et vibratoires 3

1.4. Acoustique 6

1.4.1. Définition 7

1.4.2. La propagation des sons 7

1.4.3. La catégorisation des sons 7

1.4.4. Impédance acoustique 9

1.4.5. Pression acoustique 9

1.4.6. Analyse acoustique 12

1.5. Vibration 14

1.5.1. Définition 14

1.5.2. Caractéristiques d'une vibration 14

1.5.2.1. Fréquence 15

1.5.2.2. Relation entre fréquence et période 15

1.5.2.3. Amplitude 15

1.5.3. Analyse des vibrations 17

1.5.3.1. Outils de surveillance 18

1.5.3.1.1. Niveaux globaux(NG) 18

.5.3.1.2. Spectre PBC (pourcentage de bande constant) 21

1.5.3.2. Outils de diagnostic 22

1.5.3.2.1. Spectre RC (résolution constante 22

1.5.3.2.2. Spectres 23

1.5.3.2.3. Analyse d'enveloppe 25

1.5.3.2.4. Spectres des principaux défauts 25

Liste des tableaux

Tableau 1.1. Vitesse du son dans l'air en fonction de la température……07
Tableau 1.2. Les différentes gammes de fréquences……..07
Tableau 1.3. Ordres de grandeurs des niveaux sonores……11
Tableau 1.4. Principaux défauts……..26
Tableau 2.1. Exemples de capteurs actifs……..39
Tableau 2.2. Exemples de capteurs actifs……31
Tableau 3.1 : Effets de la gamme d'analyse et le nombre d'échantillons.....56

ملخص

إنَّ كشف و تحديد عيوب الآلات يعتمد على استخدام تجهيزات تسمح برصد المتغيرات الفيزيائية في الآلة(مثل تغير درجة الحرارة، الضغط، السرعة، القوة...). في هذه الدراسة قمنا بتصميم و تركيب نظام إلكتروني يتكون من جهازاستشعار التسارع و ميكروفون وحاسوبلرصد إشارات الاهتزازات و الأصوات. وقدتم انجاز المشروع وفق ثلاثة خطوات.الخطوة الأولى: تتمثل في تصميم و تركيب جهازرصد الإشارات.الخطوة الثانية: تتمثل في تصميم برنامج لرصد و تحليل الإشارات.الخطوة الثالثة:تتمثل في تجربة الجهاز للتحقق من فعاليته.

أظهرت التجارب المنجزة بهذا الجهاز نتائجمشجعةوكذلك أهمية استعمال جهازي الاستشعار معا. حيث لاحظنا بأن الاهتزازات دائما يرافقها صوت.

الكلمات المفتاحية: جهاز استشعار التسارع، ميكروفون، لوحة الصوت، إشارة صوتية، إشارة اهتزاز.

Résumé

La détection et l'identification des anomalies dans les machines s'appuientsur l'utilisation des équipements qui permettent l'acquisition des variables physiques dans la machine (exemple: changement de la température, la pression, la vitesse, la force, ...). Dans cette étude, nous avons conçu et monté un système électronique se compose d'unaccéléromètre,un microphoneet un PC pour l'acquisition des signaux acoustiques et vibratoires.Le projet a été réalisé en trois étapes.La première étape consiste à concevoir et l'installation du système d'acquisition des signaux. La deuxième étape consiste àconcevoir d'un programme pour l'acquisition et l'analyse des signaux. La troisième étape consiste à tester le système pour vérifier son efficacité.

Les tests effectués par le système d'acquisition ont montré des résultats encourageants et en plus de l'importance d'utilisation des deux capteurs ensemble où nous avons constaté que les vibrationssont toujours accompagnées du son.

Mots clés: accéléromètre, microphone, carte son, signal acoustique, signal vibratoire.

Summary

The detection and identification of anomalies in machines based on the use of equipment that allows the acquisition of physical variables in the machine (eg, change in temperature, pressure, speed, strength,...). In this study, we designed and installed an electronic system consisting of an accelerometer, a microphone and a PC to acquire sound and vibration signals. The project was released in three steps. The first step is to design and installation of the signal acquisition system. The second step is to design a program for the acquisition and analysis of signals. The third step is to test the system to ensure its effectiveness.

Tests conducted by the acquisition system have shown encouraging results in addition, they have shown the importance of using both sensors simultaneously where we found that the vibrations are always accompanied by the sound.

Keywords: accelerometer, microphone, sound card, acoustic signal, vibration signal.

Introduction générale

Les phénomènes dynamiques couramment rencontrés en ingénierie sont généralement mesurés et enregistrés sous forme d'un signal d'une grandeur physique variant en fonction du temps.

Les signaux vibratoires et acoustiques sont parmi les signaux les plus importants et les plus utilisés pour contrôler et surveiller l'état d'un équipement dans de nombreux domaines (industrie, automobile, recherche scientifique, maintenance, …).L'acquisition et l'analyse de ces signaux s'appuie sur l'utilisation d'un matériel qui se compose d'unsystème d'acquisition, des capteurs et des logiciels.

Le présent projet est consacré à la réalisation d'un système pour l'acquisition et l'analyse des signaux vibratoires et acoustiquesprélevés par deux capteurs: un accéléromètre et un microphone. Nous avons deux objectifs: Le premier consiste à concevoir et à réaliserune chaîne d'acquisition des signaux. Le deuxième consiste à développer une interface graphique pour enregistrer, analyser et interpréterles signaux prélevés par les capteurs.

Compte tenu les objectifs que nous avons défini, le mémoirese compose de trois chapitres.

Le chapitre 1, est consacré à exposer les définitions relatives aux grandeurs physiques suivantes: acoustique et vibration, exposer les différents types de signaux et les outils d'analyse de ces signaux.

Le chapitre 2, est consacré à présenter les notions relatives aux chaînes d'acquisition et aux capteurs.

Dans le chapitre 3, nous avons présenté en détail le système d'acquisition réalisé et l'interface graphique développée ainsi les résultats des tests effectués.

Chapitre 1

Acoustique et vibration

1.1. Introduction

Les phénomènes dynamiques couramment rencontrés en ingénierie sont généralement mesurés sous forme d'amplitude d'une grandeur physique variant en fonction du temps. Il y a donc deux échelles à considérer: l'amplitude et le temps.

L'amplitude instantanée du signal peut représenter toute quantité physique :

- Vibrations : accélération, vitesse, déplacement, force,
- Acoustique : pression, vitesse,
- Thermique : pression, température.

Le Temps : l'axe des temps peut être affecté :

- au temps absolu,
- au temps relatif,
- à la position le long d'une trajectoire,
- à une position angulaire.

Pour faire l'analyse et l'interprétation des signaux des phénomènes rencontrés en vibration et acoustique, Il faut connaître avec une certaine précision la physique de ces phénomènes [1].

1.2. Types des signaux

Les grandeurs mesurables en acoustique et en vibration sont des signaux qui dépendent du temps. Ces signaux peuvent être de natures très variables. On distingue les signaux à durée finie des signaux à durée que l'on peut supposer infinie. Un signal peut aussi être d´déterministe, c'est à dire prédictible à chaque instant, ou bien aléatoire si sa valeur ne peut être prédite.

Une classification des signaux déterministes est donnée sur la figure 2.1.

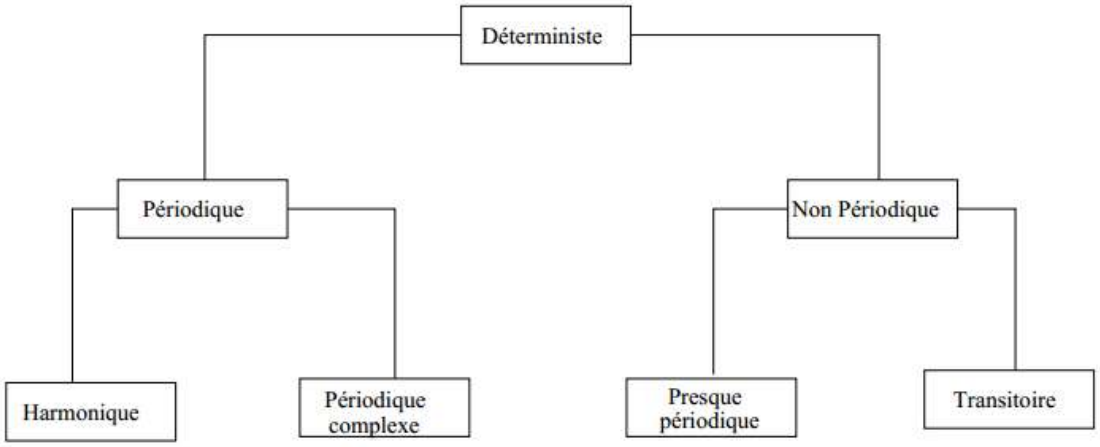


Figure 1.1- Classification des siganux déterministes

Les signaux aléatoires se classifient selon la logique indiquée sur la figure 1.2. Les signaux stationnaires sont ceux dont les propriétés statistiques telles que la moyenne, la variance sont constantes au cours du temps. Les signaux ergodiques sont tels qu'une moyenne statistique peut être remplacée par une moyenne sur le temps.

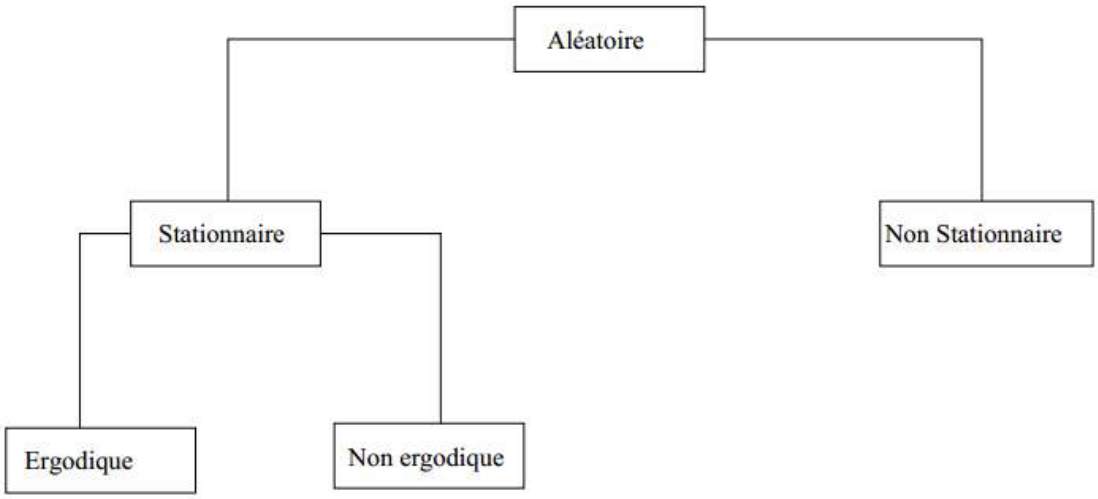


Figure 1.2- Classification des siganux aléatoires

1.3. Méthodes d'analyse des signaux acoustiques et vibratoires

L'utilisation des signaux acoustiques et vibratoires s'avère pertinente car on peut appréhender les phénomènes dynamiques que l'on rencontre dans les systèmes en fonctionnement (machines tournantes, structures,…). Il est ainsi possible de caractériser la plupart des défauts et mauvais fonctionnements à partir de la connaissance ou de la modélisation physique de ces phénomènes.

Ainsi, des méthodes d'analyse des signaux ont été proposées et dont les applications sont rendues possible avec le développement des analyseurs de signaux ou des logiciels sur PC. Dans les sections qui suivent, nous citons les méthodes les plus utilisées. [1].

A/Indicateurs statistiques [1]

Ces méthodes, historiquement les plus anciennes, consistent en une analyse des caractéristiques temporelles du signal enregistré. On y retrouve classiquement la valeur **RMS** (root mean square) qui mesure l'énergie moyenne du signal, la **valeur crête à crête** qui mesure le maximum d'amplitude entre **les valeurs extrêmes** du signal, **le kurtosis** qui mesure le caractère impulsif du signal, etc.

L'idée implicite, lorsque ces indicateurs sont utilisés pour le contrôle et le diagnostic, est que toute apparition d'un défaut entraîne une modification notable des caractéristiques statistiques du signal. Par exemple, la valeur crête à crête et le kurtosis sont utilisés pour détecter des défauts de type choc (contrôle par émission acoustique, par analyse vibratoire et acoustique) et la valeur RMS pour détecter des dissipations d'énergie anormalement élevées (surveillance acoustique). Les avantages des indicateurs statistiques temporels sont leur simplicité, leur facilité d'interprétation et la possibilité de les agrémenter de seuils dont le dépassement déclenche une alarme en situation anormale. Ils sont donc particulièrement bien adaptés pour la surveillance et le contrôle en ligne, voire en temps réel. Néanmoins, ces descripteurs génèrent souvent des « fausses alarmes » lorsque les signaux ne sont pas gaussiens.

B/Analyse de Fourier [1]

L'analyse de Fourier consiste à décomposer l'énergie du signal analysé par bandes de fréquence. Il en résulte une analyse plus fi ne que l'analyse par valeur RMS, avec la possibilité de dissocier dans le domaine fréquentiel des phénomènes indépendants caractérisés par des épanouissements fréquentiels différents. L'analyse dans le domaine fréquentiel est la contrepartie indispensable de l'analyse dans le domaine temporel du signal ; il n'est en effet pas rare que des phénomènes difficilement discernables dans l'un des domaines apparaissent clairement dans l'autre. Enfin, l'analyse de Fourier jouit de propriétés

remarquables qui en font un outil indispensable pour réaliser de nombreux traitements : filtrage, débruitage, démodulation, etc. Son utilisation est aujourd'hui devenue un standard dans l'industrie, grâce à l'algorithme de la transformation de Fourier rapide développé par Cooley et Tukey en 1965.

Outre son importance dans la compréhension des phénomènes physiques en acoustique et vibrations (modes de résonances, fréquences caractéristiques,..), l'analyse de Fourier permet la surveillance et le diagnostic par le suivi des changements du spectre fréquentiel. Il est classique de fi xer un gabarit fréquentiel, caractéristique d'un état sain, et d'y confronter les mesures courantes. L'analyse de Fourier est particulièrement bien adaptée à la surveillance et au diagnostic des machines tournantes dont les signaux répartissent leur énergie sur des harmoniques bien localisés en fréquence. L'amplitude et la position de ces harmoniques constituent une véritable « signature mécanique » de l'état de la machine. Toute déviation anormale indique l'apparition d'un défaut, également susceptible d'être identifié par reconnaissance de sa signature fréquentielle.

C/Analyse cepstrale [1]

L'idée est de faire une analyse de Fourier du spectre du signal exprimé en dB

$$C(t) = F^{-1}\{log(|X(f)|^2)\} \text{ avec } X(f) = F\{X(t)\} \quad (1.1)$$

où l'opérateur F désigne la transformation de Fourier et F-1 son inverse. C(t) est appelé « cepstre », anagramme du mot « spectre ». On montre que cette ération révèle toutes les structures harmoniques d'un signal de manière très concise. Les pics ainsi obtenus s'appellent les « rhamoniques » et leurs positions sur l'axe des « quéfrences » indiquent les périodes fondamentales contenues dans le signal.

L'analyse cepstrale est très utilisée pour la surveillance des engrenages qui exhibe un spectre très riche en harmoniques. Une autre propriété du cepstre est de transformer un produit de convolution en une addition. En ce sens, il permet dans certains cas de dissocier l'effet d'une force d'excitation et l'effet de la fonction de transfert qui caractérise le transfert dans un milieu physique par exemple (déconvolution). Cette propriété, exploitée en géophysique et en contrôle non destructif, permet de remonter à la source des défauts.

D/Analyse d'enveloppe [1]

Malgré ses nombreux avantages, un inconvénient majeur de l'analyse de Fourier est qu'elle suppose les signaux stationnaires ce qui ne permet pas d'associer à une signature fréquentielle l'intervalle temporel où elle se réalise. Afin de concilier les concepts de temps et de fréquence, l'idée plus simple est d'analyser l'évolution temporelle d'un harmonique sur une fréquence donnée. La technique porte le nom d'analyse d'enveloppe, l'enveloppe étant par définition l'amplitude temporelle de l'harmonique. L'analyse d'enveloppe est relativement facile à mettre en œuvre. Elle est beaucoup utilisée pour la surveillance et le diagnostic des machines tournantes (dont les signaux sont typiquement non-stationnaires) ainsi qu'en contrôle non destructif (émission acoustique). Dans certains cas, l'analyse d'enveloppe est suivie d'une analyse de Fourier (spectre d'enveloppe) qui permet de révéler les éventuelles structures périodiques de l'enveloppe. Cette dernière technique est tout à fait préconisée pour la détection et l'identification de chocs anormaux et répétitifs.

E/Analyse temps-fréquence [1]

Il s'agit de caractériser dans le domaine fréquentiel des signaux non stationnaires, par exemple ceux dont les caractéristiques varient dans le temps. On peut par exemple citer, les signaux acoustiques et vibratoires générés par un moteur diesel durant un cycle. De tels signaux seront la résultante de phénomènes (successifs) : la compression, puis l'injection et enfin la combustion qu'il est d'intérêt de caractériser en fréquences (quelles sont les phases les plus bruyantes, existe-t-il des résonances de soupapes, de la chambre, etc. ?), et ce, pour chaque cylindre. C'est ce que peut fournir l'analyse temps-fréquence. Plusieurs méthodes ont ainsi été développé pour améliorer les performances du « spectrogramme » qui voit sa « résolution » fréquentielle diminuer lorsque l'on se concentre sur une région temporelle courte.

1.4. Acoustique

1.4.1. Définition :

L'acoustique est la science qui étudie les propriétés des vibrations des particules d'un milieu susceptible d'engendrer des sons, infrasons ou ultrasons, de les propager et les faire percevoir.

1.4.2. La propagation des sons : [4]

Les sons ne se propagent pas dans le vide. Ils se déplacent dans l'air, les solides et les liquides.

Dans l'air, la vitesse de propagation du son, notée c_0, dépend principalement de la température(voir tableau 1.1) ; on a approximativement :

$$C_0=20.05\sqrt{T} \qquad (1.2)$$

Où T est la température en Celsius

Tableau 1.1. Vitesse du son dans l'air en fonction de la température

Température [^{0}C]	$\boldsymbol{c_0[m.s^{-1}]}$
-10^{0}C	$\boldsymbol{325.2m.s^{-1}}$
0^{0}C	$\boldsymbol{337.4m.s^{-1}}$
10^{0}C	$\boldsymbol{337.3m.s^{-1}}$
20^{0}C	$\boldsymbol{343.2m.s^{-1}}$
30^{0}C	$\boldsymbol{349.0m.s^{-1}}$

1.4.3. La catégorisation des sons.

La fréquence est le nombre de fluctuations par seconde. Elle est exprimée en Hertz (Hz). L'oreille est sensible aux sons entre 20 et 20000 Hz (voir tableau 1.2).

Tableau 1.2. Les différentes gammes de fréquences.

<20Hz	20à 500Hz	500à 2000Hz	2000à20000Hz	>20000Hz
infrasons	Basses	Médiums	Aigus	Ultrasons

On distingue plusieurs classes de sons en fonction de leur contenu fréquentiel :

A/ Les sons purs [4]

On dit qu'un son est pur quand ses variations de pression ou amplitude en fonction du temps sont des fonctions sinusoïdales de type :

$$P=P_{max}\times\cos(wt+\varphi) \qquad (1.3)$$

Où

- la pulsation $w=2\pi/T$ (en radians / secondes) ;
- La période $T= 2\pi/w$ (en secondes) ;
- La fréquence $f=1/T$ (en hertz, Hz) ;
- La longueur d'onde $y=c\,T$;
- La vitesse du son c ;

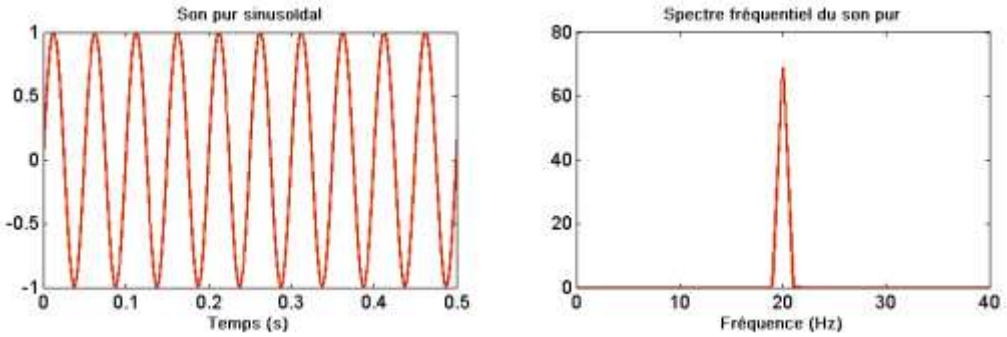


Figure 1.3. Exemple du son pur et son contenu fréquentiel

Un signal pur ne contient qu'une seule fréquence.

B/ Les sons périodiques [4]

Le signal temporel est périodique. En fréquence, on peut d'écrire le signal comme la somme de différentes fréquences (somme de plusieurs sons purs). Les sons d'un violon ou celui d'une voyelle longue sont des exemples de sons périodiques.

C/ Les sons non périodiques [4]

Si le signal n'est pas constitué d'un motif qui se répète, on dit qu'il est non périodique. Cela concerne par exemple les bruits d'impact.

D/Bruits [4]

Le bruit est une variation aléatoire de la pression acoustique : aucune périodicité dans le signal et pas de hauteur (ou fréquence) précise. Les bruits les plus courants sont les bruits blancs (même énergie pour toutes les fréquences) et le bruit rose (même énergie pour toutes les bandes de fréquences).

1.4.4. Impédance acoustique [4]

L'impédance acoustique est la quantité qui relie la pression acoustique et la vitesse particulaire. Cette grandeur peut être un nombre complexe. Elle est caractéristique de la manière dont un matériau réagit une on de acoustique. On a :

$$Z=\frac{p}{u} \tag{1.4}$$

1.4.5. Pression acoustique : [4]

La pression acoustique décrit l'amplitude du son perçu. Elle est mesurée en Pascal (1 Pa =1 N/m^2).

La plus petite valeur de pression acoustique à laquelle l'oreille humaine est sensible P0 est égale à 2.10^{-5} Pa. La valeur de pression acoustique à partir de laquelle une sensation acoustique est douloureuse est Pmax et correspond à 20. Pa.

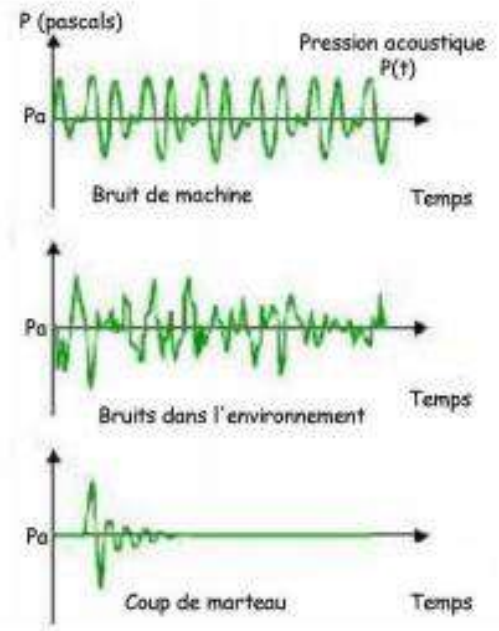


Figure 1.4. Exemples des signaux acoustiques

Le niveau de pression acoustique est exprimé en décibel (dB) et est donné par :

$$Lp=10\log\left(\frac{p_{eff}^2}{p_0^2}\right) \tag{1.5}$$

$p_0$est égale à 20 p_a

La pression efficace Peff est la valeur de p(t) entre les instants t1 et t2 avec :

$$p_{eff}^2 = \frac{1}{t1-t2}\int_{t2}^{t1} p^2(t).dt \quad (1.6)$$

Le décibel (dB, un dixième de Bell) est une mesure du rapport entre deux valeurs. C'est une unité sans dimension. Cette unité est utilisée pour les raisons suivantes :

- Pour des raisons pratiques : le bruit le plus faible audible a une pression de 0.00002 Pa; le seuil de douleur est quant à lui égal à 200 Pa. On utilise donc une échelle logarithmique pour réduire l'étendue des valeurs.
- Pour des raisons physiologiques : l'échelle logarithmique est plus proche du ressenti que l'échelle linéaire : 1dB correspond à la plus petite variation détectable par l'oreille humaine.

De même on peut définir des niveaux d'intensité acoustique (L_I) et des niveaux de puissance acoustique (L_W):

$$L_I = 10\log\left(\frac{I}{I_0}\right) \text{avac } I_0 = \frac{p_0^2}{\rho_0 c_0} = 10^{-12}\text{Wm}^{-2} \quad (1.7)$$

$$L_W = 10\log\left(\frac{W}{W_0}\right) \text{avac} W_0 = I_0.1\text{m}^2 = 10^{-12}\text{W} \quad (1.8)$$

Dans le cas d'une onde sphérique progressive, l'intensité acoustique qui traverse un élément de surface est :

$$I = \frac{P^2}{\rho_0 c} \quad (1.9)$$

L'énergie totale traversant une sphère de rayon r, chaque seconde, est donc :

$$W = 4\pi r^2 I(\text{Watts}) \quad (1.10)$$

W est la puissance acoustique de la source.

On en déduit que :

$$p^2 = w\rho_0 c/4\pi r \quad (1.11)$$

Autrement dit, la puissance du son rayonné varie comme l'inverse de la distance au centre de la sphère.

Tableau 1.3. Ordres de grandeurs des niveaux sonores

Conversation	Impression Subjective	dB	Transport	Intérieur	Extérieur
Impossible	Bruit sup-portables pendant un court instant seulement. Destruction de l'oreille.	140		Turboréacteur au banc d'essais ; sortie de la Tuyère	
		130		Marteau-pilon	
		120	Place du pilote d'avion de combat à 400 Km/h		
		110	Avion combat 350 Km/h	Moteur d'avion Atelier de chaudronnerie (ambiance)	
En criant	Bruits très pénibles à écouter	100	Motocyclette sans silencieux à 2m. Klaxon de route. Wagon train	Scie à bois à 1m. Presse à découper. Atelier de tissage.	Marteau pneumatique à 3 m.
		95	Avion de transport à 400 Km/h	Forges	
Difficile	Supportable mais bruyant	80	Intérieur d'auto à 100 Km/h	Atelier de tournage. Escalier du métro quand il y a influence Radio pleine puissance	Circulation intense à 1m.
A voix forte	Niveau de bruits courants	70	Wagons-lits Pullman modernes		
		65	Automobile.		
		60		Grands magasins. bureau avec dactylographe. Conversation normale	Rue résidentielle tranquille.
A voix normale	Jugé calme si on est actif	55	Bateau à moteur		
		50	Auto silencieuse	Robinet d'eau ouvert à grand débit. Appartement donnant sur rue active fenêtres ouvertes	Rue très tranquille
		45	Transatlantique le classe	Appartement bruyant	Bruit minimum dans la rue le jour.
		40		Bureau tranquille	
A voix chuchotée		30		Appartement tranquille	
		25		Conversation à voix basse à 1.5 m	
		20		Studio de radiodiffusion	Jardin calme.
	Silence inhabituel	10		Studio d'enregistrement	
		0	Seuil d'audibilité.	Laboratoire d'acoustique	

Exemple

Une personne parlant à voix émet une puissance acoustique de 10^{-6} Watt.

La pression efficace P à 1 mètre :

$\rho_0 = 1.18 kg/m^2$,c=345m/s

$p^2 = W\rho_0 c/4\pi r^2$donc $p^2 = 3.2\ 10^{-4}$ d'où p=1.7 $10^{-2} pa$

1.4.6. Analyse acoustique [4]

Le niveau global d'un bruit dans toute la gamme de fréquences audibles est généralement une information insuffisante. Il est important de connaıtre plus précisément la composition spectrale (c'est-à-dire la contribution de chaque fréquence ou bande de fréquence composant le bruit). On utilise deux types d'analyse spectrale.

- l'analyse en bandes larges (par octave ou tiers d'octave) : Δf/f=cte
- l'analyse en bandes fines : Δf=cte

Le choix d'un type d'analyse dépend du phénomène à étudier et surtout de la finalité de la mesure. Par exemple, pour des sons harmoniques, on utilisera une analyse bandes fines, alors que pour des bruits, on se contentera d'une analyse large bande.

A/ Analyse en bandes larges (par octave et tiers d'octave)

On applique au signal de pression acoustique des filtres normalises de bandes d'octave ou de bandes de 1/3 d'octave. Les filtres utilises en analyse acoustique sont alors des filtres analogiques passe-bande en parallèles à largeur de bande relative constante, c'est-à-dire que la bande passante des filtres est proportionnelle à leur fréquence centrale. Le filtre normalisé de référence est centré sur la fréquence 1000 Hz. Ces filtres sont définis par leur fréquence centrale *fc* et leurs fréquences de coupure inférieure f_{inf} et supérieure f_{sup} (coupure à -3dB).

Par octave

$$f_{sup} = 2f_{inf} \tag{1.12}$$

$$\mathrm{f_c} = \sqrt{2}\mathrm{f_{inf}} = \frac{\mathrm{f_{sup}}}{\sqrt{2}} = \sqrt{\mathrm{f_{sup}}.\mathrm{f_{inf}}} \tag{1.13}$$

Exemple

$$f_c = 1000Hz \rightarrow \begin{cases} f_{inf} = 707.1Hz \\ f_{sup} = 1414.2Hz \end{cases}$$

Par tiers d'octave

$$f_{sup} = \sqrt[3]{2}\, f_{inf} \tag{1.14}$$

Exemple

$$f_c = 250Hz \rightarrow \begin{cases} f_{inf} = 222.7Hz \\ f_{sup} = 280.6Hz \end{cases}$$

Calcul d'énergie

$$p^2_{eff,bande} = \int_{f_{inf}}^{f_{sup}} p^2_{eff}(f)df = \sum_{f_{inf}}^{f_{sup}} p^2_{eff}\Delta f \tag{1.15}$$

Calcul du niveau de pression

$$l_p = 10log\left(\frac{p^2_{eff}}{\rho_0}\right) \tag{1.16}$$

Le niveau total en dB est donnée par :

$$L_p = 10log\left(\sum_i 10^{\frac{L_{p,i}}{10}}\right)$$

B/Analyse en bandes fines [4]

A chaque fréquence correspond une énergie.

Calcul du niveau de pression :

$$\mathrm{l_p} = 10\log\left(\int_0^{\mathrm{f_{max}}} 10^{\frac{\mathrm{lp(f)}}{10}}\mathrm{df}\right) \tag{1.18}$$

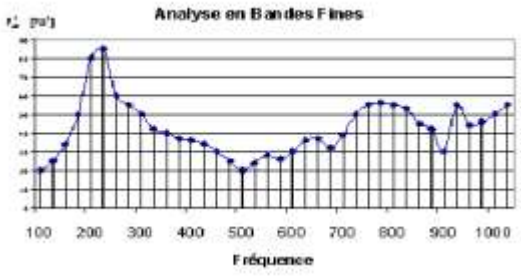


Figure 1.5 . Exemple de spectre en bandes fines

1.5. Vibration

1.5.1. Définition

La norme ISO 2041 « Vibrations et chocs - Vocabulaire (Août 1990) » définit la notion de vibration: Variation avec le temps de l'intensité d'une grandeur caractéristique du mouvement ou de la position d'un système mécanique, lorsque l'intensité est alternativement plus grande et plus petite qu'une certaine valeur moyenne ou de référence.

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

L'exemple le plus simple d'un système en vibration est sans doute donné par le mouvement d'une masse suspendue à un ressort et relâchée après traction.

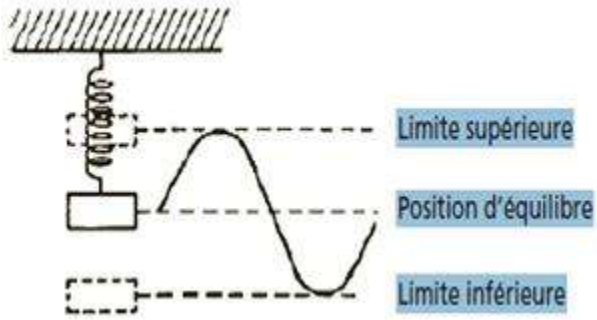


Figure 1.6. Système masse ressort

La figure 1.6. montre que si le mouvement est entretenu par une force d'excitation périodique :

– la masse oscille entre des limites supérieures et inférieures, et l'écart entre chacune de ces limites et la position d'équilibre est appelé « **amplitude** ».

– la masse oscille autour de sa position d'équilibre un certain nombre de fois par seconde ou par minute. Ce nombre de cycles répétés à l'identique pendant une unité de temps s'appelle la « **fréquence** » et, à l'inverse, la durée du cycle s'appelle la « période ».

1.5.2. Caractéristiques d'une vibration

La mesure de vibration implique deux paramètres: L'amplitude et la fréquence (la phase est un 3ième optionnel).

1.5.2.1. Fréquence

La fréquence représente le nombre de répétition d'un phénomène qui se reproduit en un temps donné. Lorsque l'unité de temps choisi est la seconde, la fréquence s'exprime en Hertz (Hz).

Une vibration qui se produit 50 fois par seconde aura donc une fréquence de 50 Hz. 1 Hertz = 1 cycle par seconde

1.5.2.2. Relation entre fréquence et période

Le Hertz est la fréquence d'un phénomène dont la période est d'une seconde (Source : Norme française NF X 02-202). 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 $1/50^{ème}$ de seconde soit 20 ms.

Ainsi dans cet exemple :

f = 50 Hertz (50 Hz)

T = 1/50e de seconde

La fréquence f est donc l'inverse de la période T : $f = \frac{1}{T}$

1.5.2.3. Amplitude

On appelle amplitude d'un mouvement vibratoire la valeur de ses écarts par rapport à sa position d'équilibre. De cette définition générale, la complexité d'un signal vibratoire réel conduit à définir plusieurs grandeurs pour caractériser son amplitude.

L'amplitude (crête Ac). Elle représente l'amplitude maximale du signal par rapport à sa valeur d'équilibre.

L'amplitude (crête à crête Acc). Elle représente l'écart entre les amplitudes extrêmes du signal pour un temps d'observation donné.

L'amplitude (efficace Aeff) ou RMS (Root Mean Square). elle représente l'amplitude corrigée du signal redressé, indiquant ainsi l'énergie donnée par le mouvement vibratoire.

Dans le cas d'une vibration sinusoïdale (induite par exemple par un balourd), les amplitudes crête, crête à crête et efficace sont liées par les relations suivantes :

$$A_{eff} = \frac{\sqrt{2}}{2} A_c = 0.707 A_c \quad (1.21)$$

$$A_{c-c} = 2\sqrt{2} A_{eff} = 2.828 A_{eff} \quad (1.22)$$

Dans le cas d'un signal vibratoire complexe, il n'existe pas de relations mathématiques liant les valeurs crête et efficace. Ces trois grandeurs, dont deux ne peuvent donc se déduire l'une de l'autre, devront donc être mesurées ou calculées simultanément par l'appareil de mesure suivant les formules:

$$A_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T s^2(t)dt} \tag{1.23}$$

$$A_c\sqrt{max[s^2(t)]} \tag{1.24}$$

$$A_{c-c} = max[s(t)] - min[s(t)] \tag{1.25}$$

avec:

max [s(t)] : amplitude instantanée la plus élevée atteinte par le signal pour la période d'observation T.

min [s(t)] : amplitude instantanée la plus faible atteinte par le signal pour la période d'observation T.

s(t) : fonction représentative du signal.

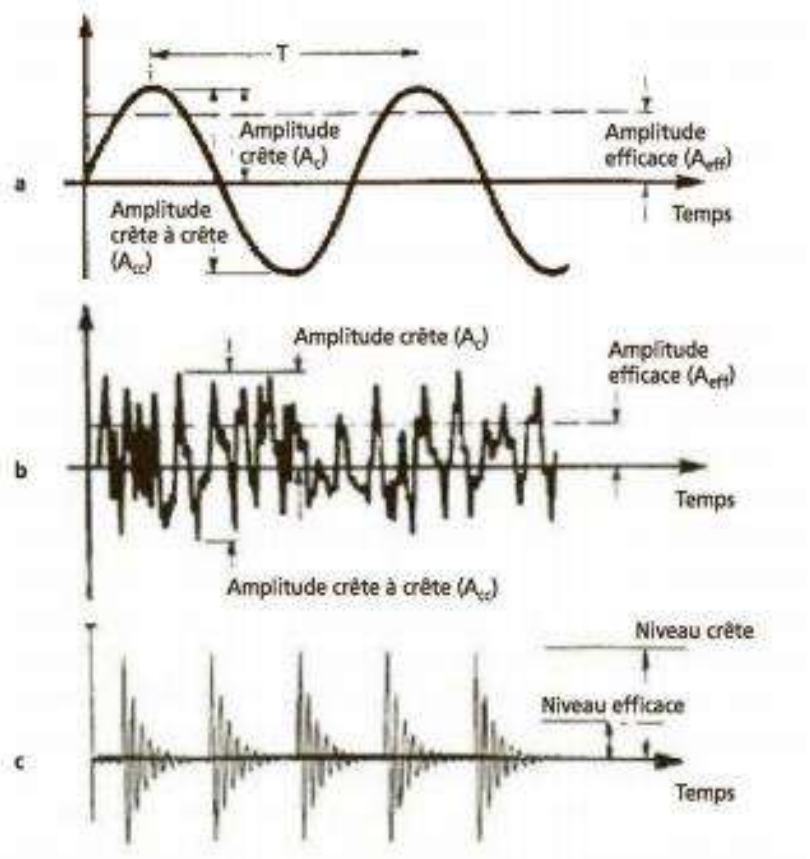


Figure 1.7. Représentation des amplitudes,

a) signal sinusoïdal, b) complexe, c) impulsionnel périodique

1.5.3. Analyse des vibrations [3]

L'analyse vibratoire est un des moyens utilisés pour suivre la santé des machines en fonctionnement. À partir des vibrations régulièrement recueillies sur une machine, l'analyse vibratoire consiste à détecter d'éventuels dysfonctionnements et à suivre leur évolution dans le but de planifier ou reporter une intervention mécanique.

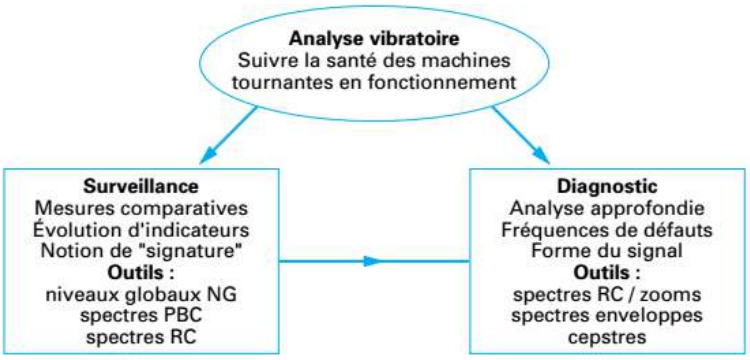


Figure 1. 8.schéma de l'analyse vibratoire

La figure 1.8. présente, de façon simplifiée, l'analyse vibratoire réalisée à partir de mesures effectuées sur les parties fixes des machines surveillées.

On distingue communément deux principales activités :

— la **surveillance** : le but est de suivre l'évolution d'une machine par comparaison des relevés successifs de ses vibrations. Une tendance à la hausse de certains indicateurs par rapport à des valeurs de référence constituant la signature alerte généralement le technicien sur un dysfonctionnement probable. Idéalement, la signature est établie à partir d'une première campagne de mesures sur la machine neuve ou révisée ;

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

1.5.3.1. Outils de surveillance [3]

Ce sont des indicateurs (grandeurs physiques) utilisés régulièrement pour surveiller les installations. Leurs évolutions permettent d'alerter le technicien d'une dégradation du fonctionnement sans pour autant désigner l'élément défectueux.

On distingue :

— les indicateurs scalaires ou niveaux globaux (NG) ;

— les indicateurs de forme ou spectres.

1.5.3.1.1. Niveaux globaux (NG)

La surveillance par niveaux globaux offre des possibilités d'investigations limitées. Les niveaux globaux sont des indicateurs scalaires plus ou moins sensibles à un nombre important de phénomènes. Sur une machine dont le niveau vibratoire normal est relativement haut, le développement d'un défaut mécanique peut être masqué par le « bruit de fond ». Le niveau global mesuré ne réagit alors pas à ce défaut, du moins pas à un stade précoce de son développement.

La surveillance par niveaux globaux ne peut donc convenir que dans le cadre d'une politique de sécurité. Elle permet de détecter un fonctionnement anormal et de déclencher un arrêt avant la panne des installations. En aucun cas on ne pourra identifier la cause de ce fonctionnement anormal ni optimiser la maintenance des machines avec un tel outil.

A/Indicateurs basses fréquences (signal de grande énergie) [3]

● Déplacement crête-crête entre 10 et 1 000 Hz :

C'est l'indicateur préconisé par l'API (American Petroleum Institute).

Il est utilisé par tout industriel intervenant dans la pétrochimie et est sensible aux phénomènes dits « basses fréquences ».

Le niveau acceptable maximal est donné, quelle que soit la machine, par la formule suivante :

$$D_{ccmax} = 25.4\sqrt{\frac{12000}{N}}$$

avec N vitesse de rotation (tr/min),

Dcc déplacement crête-crête (µm).

● Vitesse efficace entre 10 et 1 000 Hz :

Cet indicateur est, lui aussi, révélateur des phénomènes dits « basses fréquences » (BF). Ces phénomènes sont les plus énergétiques, donc les plus destructeurs. Ils peuvent aussi être à l'origine de desserrages ou de fissures.

Une augmentation du balourd, un défaut de lignage, se traduiront par une augmentation anormale de cet indicateur.

B/ Indicateur hautes fréquences (signal de faible énergie) [3]

● Accélération efficace entre 1 et 10 kHz :

Acceff[1 000-10 000 Hz] (en g ou mg)

C'est un indicateur révélateur des phénomènes dits « hautes fréquences » (HF) tels que les défauts de roulement, de denture...

Une élévation anormale de l'accélération sera en général, sur une machine simple, révélatrice d'une dégradation avancée des roulements.

g accélération due à la pesanteur (9,81 m · s–2) pris comme unité d'accélération avec son sous-multiple mg (10–3 g).

C/ Indicateurs spécifiques aux roulements [3]

● Facteur de crête entre 1 et 10 kHz :

FC [1 000-10 000 Hz] (sans unité)

Le défaut majeur de cet indicateur est de présenter environ les mêmes valeurs dans les deux cas extrêmes (état neuf et fin de vie du roulement, figure **2.9.**) Seule son évolution est significative. C'est, en revanche, un indicateur stable.

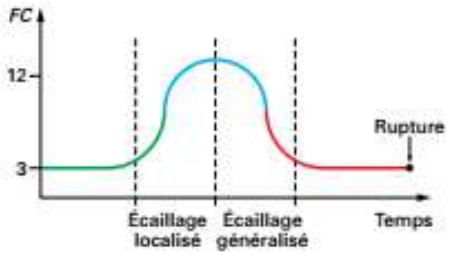


Figure 1.9. Evolution du facteur de crête FC en fonction du temps

● **Facteur K entre 1 et 10 kHz :**

K [1 000-10 000 Hz] (en g^2 ou mg^2)

K = Acccrête · Acc eff

Le facteur K est plus sûr pour effectuer une analyse ponctuelle des roulements. Sa valeur est directement liée à l'état du ou des roulements (figure **2.10.**). Du fait de son mode de calcul (g^2) et contrairement au facteur de crête, le facteur K est un indicateur instable. 1 g^2 = 100$(m \cdot s^{-2})^2$.

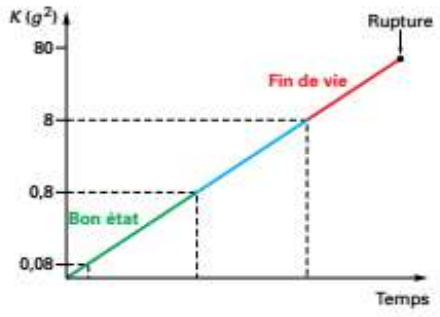


Figure 1.10. Variation du facteur K en fonction du temps

1.5.3.1.2. Spectre PBC (pourcentage de bande constant) [3]

La technique de surveillance des installations à chaîne cinématique simple (une seule ligne d'arbre) par comparaison de spectres PBC est une technique fiable et rapide. Par contre, contrairement à la surveillance par spectres RC (résolution constante), elle ne donne que rarement des informations précises sur l'origine des évolutions.

Le spectre PBC se présente sous forme de « bandes » juxtaposées selon une échelle logarithmique de la fréquence.

Le rapport « largeur de bande /valeur de fréquence centrale » reste constant. Il est normalement égal à 6, 23 ou 70 %. On représente le PBC sur des échelles logarithmiques en abscisses et ordonnées (figure 2.11.).

Le résultat est une image haute résolution aux basses fréquences (BF) afin de bien distinguer les composantes caractéristiques des défauts tels que le Balourd, le désalignement, les instabilités des rotors.

Dans les hautes fréquences (HF), la résolution est faible mais suffisante pour détecter les défauts de roulements, l'usure des dentures d'engrenage, les problèmes de lubrification.

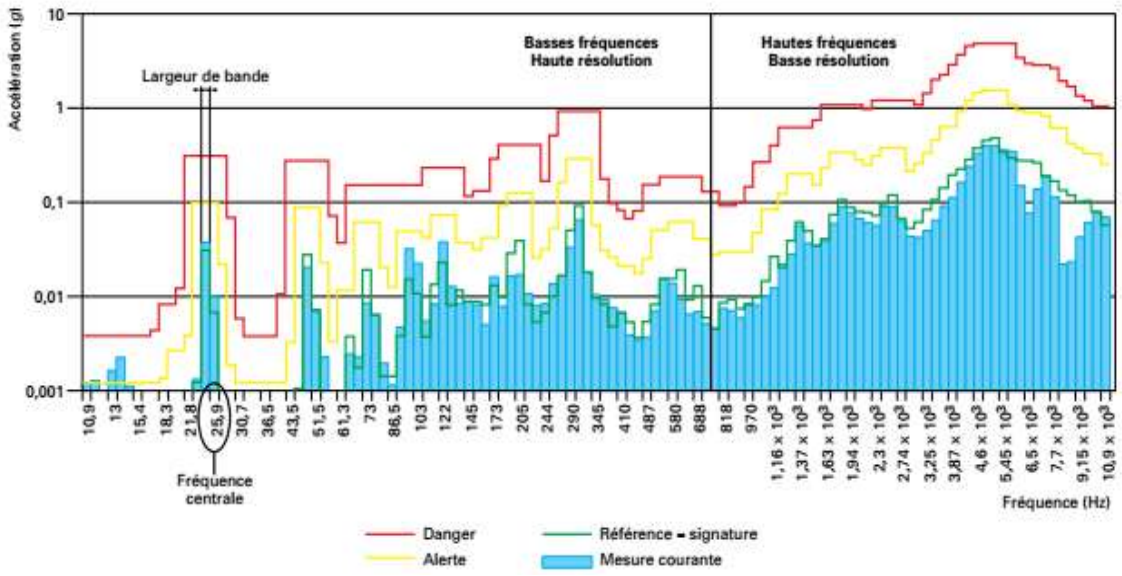


Figure 1.11. Exemple de spectre PBC

1.5.3.2. Outils de diagnostic [3]

Ils sont utilisés lorsque l'on détecte une anomalie à l'aide des indicateurs de surveillance. Cette anomalie est souvent une évolution jugée importante par rapport à la signature.

Le diagnostic du défaut détecté demande souvent une précision que ne peuvent donner les indicateurs de surveillance. Le technicien dispose pour cela des outils suivants :

— les indicateurs généraux (spectres) ;

— les indicateurs spécifiques.

1.5.3.2.1. Spectre RC (résolution constante) ou FFT (fast Fourier transform) et le zoom

C'est une représentation de l'amplitude vibratoire en accélération sur un axe linéaire des fréquences.

La bande de fréquences se définit avant de procéder aux mesures sur site. On distingue :

— les spectres BF (basses fréquences [0-50 Hz]) ;

— les spectres MF (moyennes fréquences [0-500 Hz]) ;

— les spectres HF (hautes fréquences [0-10 000 Hz]) ;

— les zoom haute résolution [f1-f2], f1 et f2 définissant la gamme de fréquences analysée.

La figure 1.12. Montre deux exemples de spectres RC

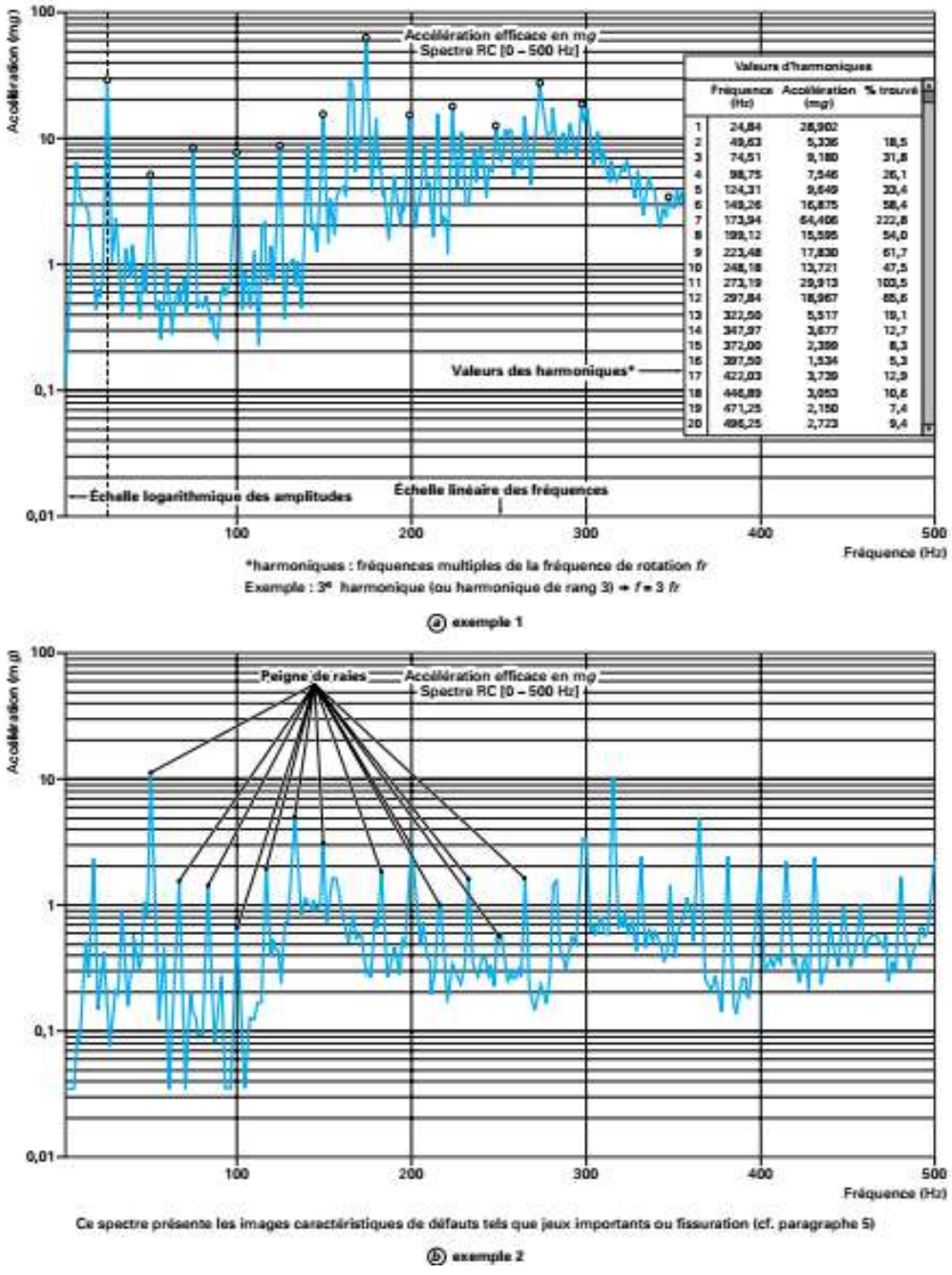


Figure 1.12.deux exemples de spectres FFT

1.5.3.2.2. Spectre

C'est la représentation de la transformée de Fourier du spectre ; soit deux fois la transformée de Fourier du signal temporel de base. L'image obtenue est une courbe fonction du temps (quéfrence) mesuré en secondes.

Le spectre est au spectre ce que le spectre est à la représentation emporelle du signal. Un phénomène périodique dans le temps n'est représenté que par un seul pic sur un spectre (figure 1.13.a**)**. De la même façon, un phénomène représenté par un spectre périodique (modulation) ne donne qu'un seul pic sur un spectre (figure 1.13.b**)**.

C'est un outil de diagnostic utilisé pour distinguer des défauts qui donnent des images spectrales complexes dues à plusieurs modulations d'amplitude concomitantes. Les engrenages peuvent nécessiter ce type d'analyse. En effet, la fréquence d'engrènement est souvent modulée par les fréquences de rotation des roues menante et menée.

Le spectre permet de séparer et d'identifier sur une seule image toutes les fréquences de modulation (fréquences de rotation des arbres d'entrée, intermédiaire et de sortie dans un réducteur).

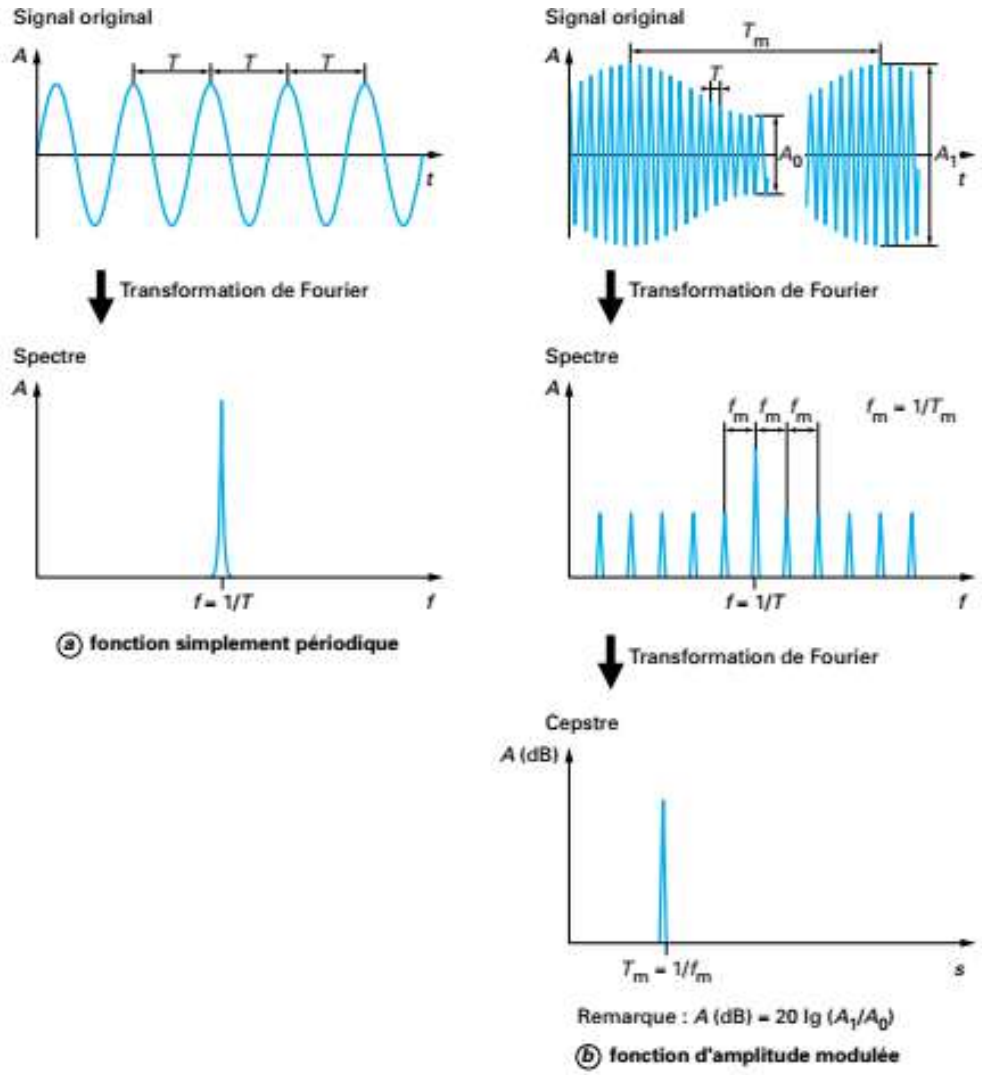


Figure 1.13 spectre

1.5.3.2.3. Analyse d'enveloppe [3]

Cette technique est très utilisée pour la détection des défauts se manifestant dans les hautes fréquences. Ces défauts sont forcément de faible énergie. Ils n'émergent en général pas du bruit de fond sur un spectre RC dans les hautes fréquences. Ils peuvent s'apparenter à de petits chocs qui excitent la structure de la machine qui répond généralement entre 1 et 10 kHz.

Un spectre enveloppe (SE) doit se paramétrer de façon précise sur deux gammes de fréquences différentes :

— la gamme HF ; c'est la gamme de fréquences excitée par les défauts sur laquelle réagit la structure. Elle est généralement comprise entre 1 et 10 kHz.

— la gamme de fréquences des défauts « excitateurs » possibles. Ces défauts sont ceux des roulements. L'élément fautif peut être :

• la piste interne (sur l'arbre),

• la piste externe (sur l'alésage) ;

• une bille ou un rouleau.

Des logiciels édités par les constructeurs de roulements permettent de déterminer, en fonction du type de roulement et de la vitesse de rotation de l'arbre, toutes les fréquences des défauts possibles dans un roulement.

1.5.3.2.4. Spectres des principaux défauts [3]

L'identification d'anomalies à un stade précoce, le suivi de leurs évolution et le diagnostic de l'état d'une machine sont possibles si les spectres (ou les images vibratoires) induits par les défauts sont connus. Le tableau 1.4 présente une liste des défauts et leurs spectres.

Convenons que :

frot : fréquence de rotation.

Fe : fréquence d'engrènement.

Fp : fréquence de passage de la courroie.

z : nombre de dents de l'engrenage

Tableau 1.4. Principaux défauts

Type d'anomalie	Vibration Composante prépondérante		
	Fréquence	Direction	Remarque
Tourbillon d'huile	de 0,45 à 0,49 × frot	Radiale	Uniquement dans le cas de paliers hydrodynamiques à grande vitesse
Balourd	1 × frot	Radiale	Déphasage voisin de 90° entre deux mesures effectuées synchrones sur le même palier selon deux directions radiales orthogonales
Défaut de fixation	1, 2, 3, 4 × frot	Radiale	Déphasage quasi nul entre deux mesures ou sur deux mesures effectuées synchrones sur le même palier selon 2 directions radiales orthogonales
Défaut d'alignement	2 × frot	Axiale et radiale	Vibration axiale en général plus importante si le défaut d'alignement comporte un écart angulaire
Électro-magnétique	1, 2, 3, 4 × 50 Hz	Axiale et radiale	Vibration disparaissant dès la coupure de l'alimentation électrique
Vitesse critique de rotation	Fréquence critique du rotor	Radiale	Vibration apparaissant en régime transitoire et s'atténuant ensuite
Courroie en mauvais état	1, 2, 3, 4 × Fc	Radiale	Peigne de raies dont le pas correspond à la fréquence de passage de courroies avec forte émergence des composantes dont les fréquences sont voisines d'une fréquence propre de structure
Engrenage endommagé	Fréquence d'engrènement : Feng = Z × frot arbre	Radiale et axiale	Présence de nombreuses bandes latérales autour de la fréquence d'engrènement avec distribution d'amplitude en forme de « râteau » dont l'espacement correspond à la fréquence de rotation de l'engrenage endommagé
Faux rond d'un pignon	Feng ± k × frot pignon	Radiale et axiale	Présence de bandes latérales autour de la fréquence d'engrènement avec distribution d'amplitude en forme « d'arbre de Noël » dont l'espacement correspond à la fréquence de rotation de l'engrenage excentré. Techniques particulières à mettre en œuvre : Le cepstre La démodulation d'amplitude et de fréquence des composantes d'engrènement
Excitation hydro-dynamique	Fréquence de passage des aubes, pales, augets, ailettes…	Radiale et axiale	Présence de bandes latérales de modulation espacées de la fréquence de rotation dans le cas où l'entrefer pales volute n'est pas constant
Détérioration de roulement	Selon la nature du défaut et le stade de dégradation : Excitation de modes propres des éléments constitutifs du roulement. Peigne de raies en basses et moyennes fréquences dont le pas correspond à une fréquence cinématique du roulement. Peigne de raies en basses et moyennes fréquences dont le pas correspond à la fréquence de rotation avec forte élévation du fond de spectre	Radiale et axiale	Techniques particulières d'analyse à mettre en œuvre : La détection d'enveloppe HFRT Le cepstre

Chapitre 2

Capteurs et chaînes d'acquisition des signaux

2.1. Introduction

Dans de nombreux domaines (industrie, automobile, contrôle de la production, recherche scientifique, sécurité, médical, électroménager, maintenance, …), on a besoin de contrôler de nombreux paramètres physiques (température, force, position, vitesse,…). Les capteurs et les chaînes d'acquisition sont des éléments indispensables à la mesure de ces grandeurs physiques.

3.2. Capteurs

2.2.1. Définition : Un capteur est un dispositif qui transforme une grandeur physique d'entrée, appelée mesurande [m], en une grandeur de nature électrique (en général) appelée réponse [s].

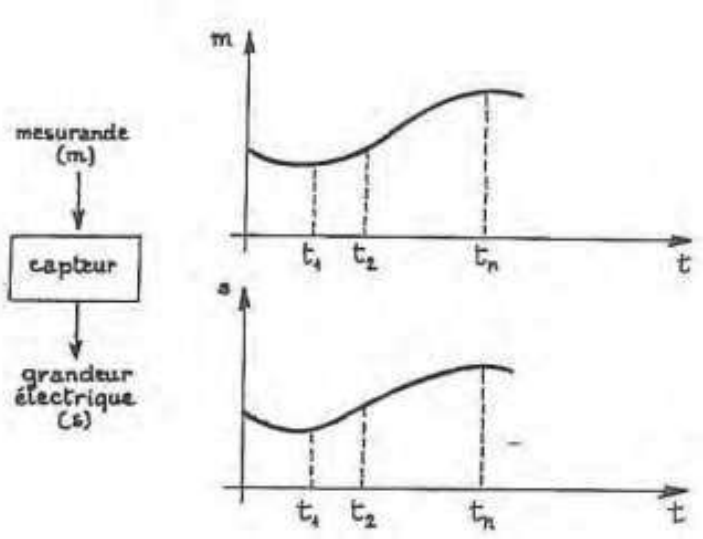


Figure 2.1. Exemple de l'évolution d'un mesurande et de la réponse correspondante.

2.2.2.Corps d'épreuve :

Le Corps d'épreuve est un dispositif qui traduit le mesurandeétudiéeune autre grandeur physique non électrique appelée mesurandesecondaire.

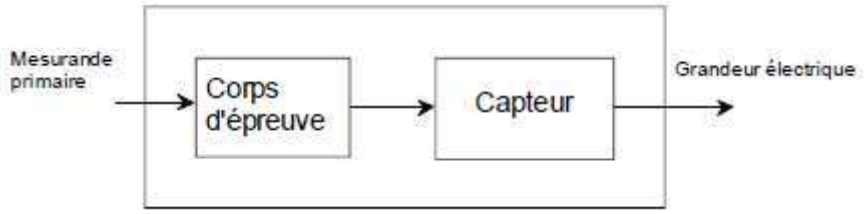


Figure 2.2. Corps d'épreuve

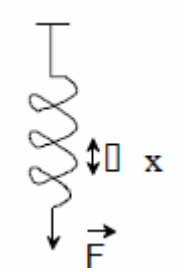
Exemples

1.Mesure d'une force à partir d'un capteur de déplacement

Corps d'épreuve : ressort

Force : Mesurande primaire

Elongation : Mesurande secondaire

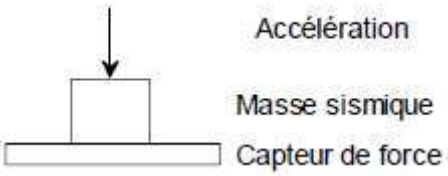


2.Mesure d'une accélération à partir d'un capteur de force

Corps d'épreuve : masse sismique

Accélération : Mesurande primaire

Force : Mesurande secondaire



2.2.3.Classification des capteurs

D'une manière générale, on distingue deux types de capteurs:

- Capteurs actifs,
- Capteurs passifs.
-

2.2.4.Capteurs actifs

Les capteurs actifs fournissent un signal électrique. Ils fonctionnent en générateurs en convertissant la forme d'énergie propre au mesurande en énergie électrique.

Tableau 2.1. Exemples de capteurs actifs

Mesurande	Effet utilisé	Grandeur de sortie
Température	Thermoélectricité Pyroélectricité	Tension Tension
Flux lumineux	Photoémission Effet photovoltaïque Effet photoélectromagnétique	Courant Tension Tension
Force Pression Accélération	Piézoélectricité	Charge
Vitesse	Induction magnétique	Tension
Position	Effet Hall	Tension

- effet thermoélectrique :

Un circuit formé de deux conducteurs de nature chimique différente, dont les jonctions sont à des températures T1et T2, est le siège d'une force électromotrice e(T1,T2).Application : détermination à partir de la mesure de 'e' d'une température inconnue T1 lorsque T2 est connue.

- effet pyroélectrique :

Certain cristaux ont une polarisation spontanée qui dépend de la température.

- effet photoémissif :

Les électrons libérés sont émis hors de la cible éclairée et forment un courant électrique.

- effet photoémissif :

Tension aux bornes d'une jonction PN créée par électrons et des trous libérés par un flux lumineux.

- effet photoélectromagnétique :

Libération de charges électriques dans la matière sous l'influence d'un rayonnement lumineux ou plus généralement d'une onde électromagnétique dont la longueur d'onde est inférieure à un seuil caractéristique du matériau.

- effet piézo-électrique :

L'application d'une contrainte mécanique à certains matériaux dits piézo-électrique (le quartz par exemple) entraîne l'apparition d'une déformation et d'une même charge électrique de signe différent sur les faces opposées.

Application : mesure de forces ou de grandeurs s'y ramenant (pression, accélération) à partir de la tension que provoquent aux bornes du condensateur associé à l'élément piézo-éléctrique les variations de sa charge.

- effet Hall :

Un matériau parcouru par un courant I et soumis à une induction B faisant un angle Θ avec le courant fait apparaître une tension v_H

$v_H = K_H .I .B . \sin \Theta$

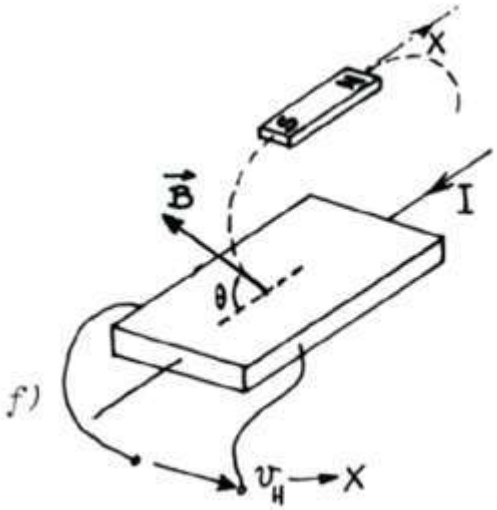


Figure 2.3. Effet Hall

- effet induction électromagnétique :

La variation du flux d'induction magnétique dans uncircuit électrique induit une tension électrique.

***Application :** la mesure de la fem d'induction permetde connaître la vitesse du déplacement qui est à sonorigine.

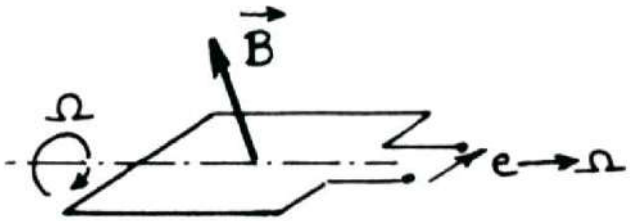


Figure 2.4. Effet induction électromagnétique

2.2.5.Capteurs passifs

Les capteurs actifs qui font varier un élément passif qui ne fournit un signal électrique que s'il est alimenté par une source d'énergie extérieure. Il s'agit d'impédances (souvent des résistances) dont l'un des paramètre déterminants est sensible au mesurande.

Tableau 2.2. Exemples de capteurs actifs

Mesurande	Caractéristique électrique sensible	Type de matériaux Utilisés
Température Très basse T	Résistivité [ρ] Constante diélectrique [ε]	Métaux : Pt, Ni, Cu Semi-conducteur Verre
Flux lumineux	Résistivité [ρ]	Semi-conducteur
Déformation	Résistivité [ρ] Perméabilité magnétique [μ]	Alliage de Ni, Si dopé Alliage ferromagnétique
Position (aimant)	Résistivité [ρ]	Matériaux Magnétorésistant
Humidité	Résistivité [ρ] Constante diélectrique [ε]	Chlorure de lithium Alumine ; polymère
Niveau	Constante diélectrique [ε]	Liquides isolants

2.2.6. Caractéristiquesmétrologiques

On choisi un capteur en fonction de ses attributs ou caractéristiques métrologiques. Ces caractéristiques font référence à des étalonnages réalisés en laboratoire. Elles sont définies quand le régime statique est atteint.

a. Etendue de mesure :

Elle est la plage de valeurs du mesurande pour lesquelles le capteur répond aux spécifications du constructeur.

E.M. = $m_{max} - m_{min}$

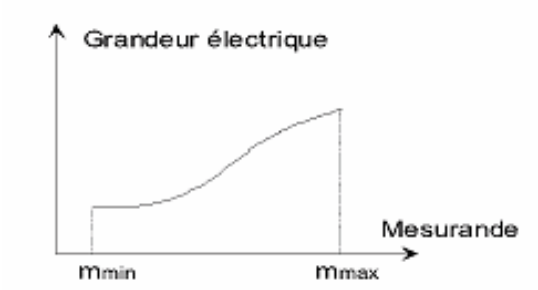


Figure 2.5. L'unité de l'E.M. est généralement l'unité du mesurande.

Exemple : Capteur de force à jauges piezorésistives N556-1

$Domaine$	$Mesurande$	$Température$
$Nominal$	$0 - 10\ N\ (E.M)$	$0°C$ à $60°C$

b. Fonction de transfert

C'est la relation fonctionnelle qui relie le mesurande en entrée et la grandeur électrique en sortie du capteur.Elle est définie soit pargraphe, soit par une relation formelle (linéaire, exponentielle, logarithmique…).

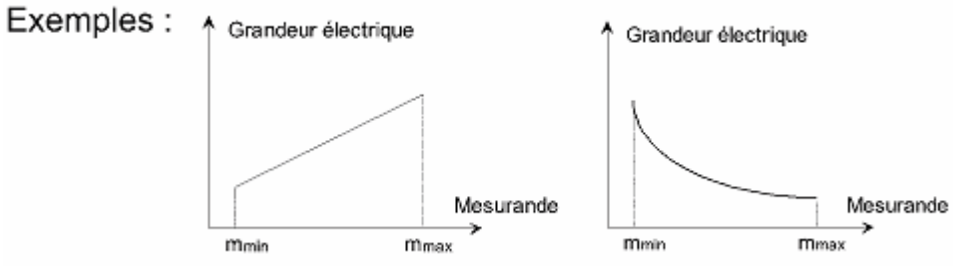


Figure 2.6. Fonction de transfert

c. Sensibilité :

La sensibilité S(m) d'un capteur, pour une valeur donnée du mesurande, est égale au rapport de la variation du signal électrique sur la variation du signal physique.

$$S(m) = (\frac{\Delta s}{\Delta m})$$

$$\text{unité de } S = \frac{\Delta unité grandeur électriques}{unité mesurande}$$

la sensibilité d'un capteur linéaire est constante

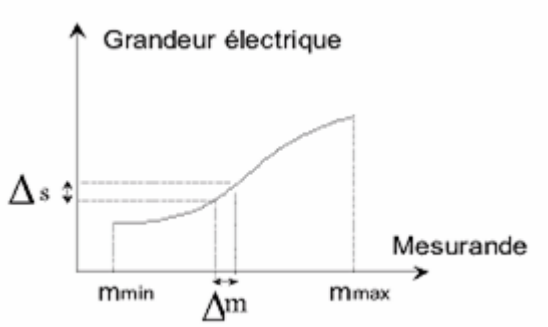


Figure 2.7.sensibilité d'un capteur

d. Précision :

Elle caractérise l'aptitude d'un capteur à donner une mesure M proche de la valeur vrai m de la grandeur mesuréeL'incertitude de mesure δ M est telle que : m = M ± δ M

L'erreur relative de précision =$\frac{\delta M}{Mmax-Mmin}$

Erreur de précision = erreur de justesse + erreur de fidélité

e. Fidélité :

Elle caractérise l'aptitude d'un capteur à donner, pour une même valeur de la grandeur mesurée, des mesures concordant entre elles.

Le capteur donne desrésultats peu dispersés autour de la valeur moyenne (Vmoy).Les résultats de mesures répétées d'une même valeur de mesurande restent groupés autour d'une valeur moyenne.

La fidélité est souvent caractérisée par l'écart type

f. Justesse :

Elle caractérise l'aptitude d'un capteur à donner des mesures proches de la valeur vraie de la grandeur mesurée, les erreurs de fidélité n'étant pas prise en compte

 La valeur la plus probable du mesurande est très proche de la valeur vraie

g. Illustrations de la fidélité et de la justesse

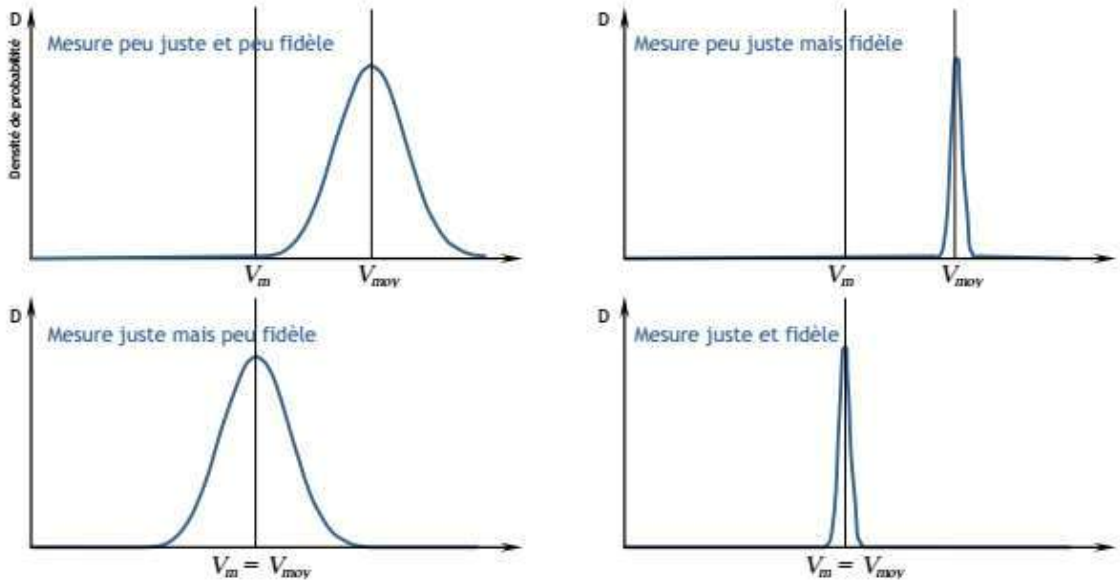


Figure.2.8.Illustration des notions de la fidélité et justesse

h. Hystérésis :

Certains capteurs ne retournent pas la même valeur de sortie, pour une même valeur du mesurande, selon la façon où cette valeur est obtenue (cycle croissant ou décroissant).

L'hystéresis est la différence maximale entre ces deux valeurs de sortie.

Unité : Unité du mesurande ou % de l'E.M.

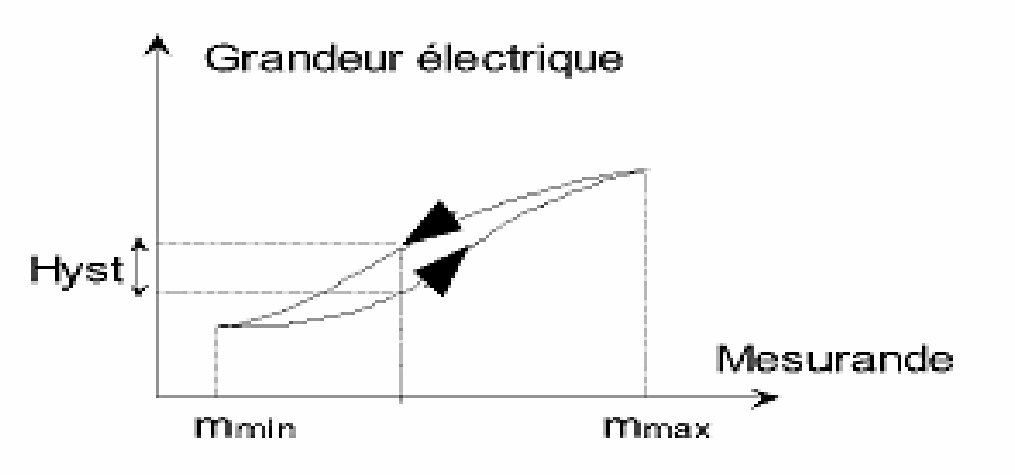


Figure .2.9.Hystérésis

i. Bruit :

Les capteurs délivrant une tension électrique génèrent, en plus de l'information sur le mesurande, du bruit.

Si ce bruit n'est pas négligeable, alors il limite les performances du capteur.

Dans ce cas, le constructeur spécifiera la densité spectrale du bruit, en supposant que le bruit est blanc.

Unité typique :$\frac{V}{\sqrt{HZ}}$

j. Résolution :

La résolution est le plus petit incrément du mesurande détectable.

Si le capteur génère du bruit, la résolution devient dépendante du niveau de bruit. Dans ce cas, elle s'obtient par le rapport de la densité spectrale du bruit sur la sensibilité.

Unité :$\frac{unitédumesurande}{\sqrt{HZ}}$

k. Rapidité :

Elle caractérise l'aptitude d'un dispositif à répondre aux variations temporelles du mesurande.

Elle est spécifiée soit par la bande passante, soit par le temps de réponse

Les dispositifs de la chaîne doivent avoir des bandes passantescompatibles avec le signal de mesure.

l. Temps de réponse :

Le temps de réponse tr(ε) ou d'établissement à ε près est défini comme la durée minimale d'attente après l'application d'un échelon à l'entrée, pour que l'écart relatif de la sortie par rapport à sa valeur finale demeure toujoursinférieur à ε.

La grandeur d'entrée : $x(t) = X_1.U(T)$ avec

$U(t)=0$ pour $t<0$ et $U(t)=1$ pour $t \geq 0$

La grandeur de sortie y(t) tend vers Y_1 quand t ⍰ ∞

g$\frac{Y1-y(t)}{Y1} \leq \varepsilon$ pour $t \leq t_r(\varepsilon)$

Exemples de temps de réponse :

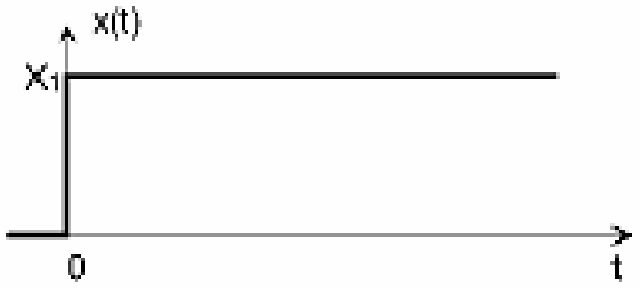


Figure 2.10.Signal d'entrée x(t)

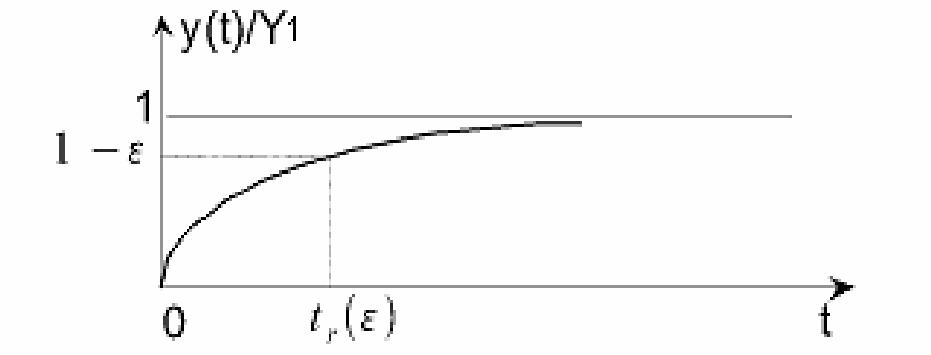


Figure 2.11. Temps de réponse d'un dispositif du 1_{er} ordre

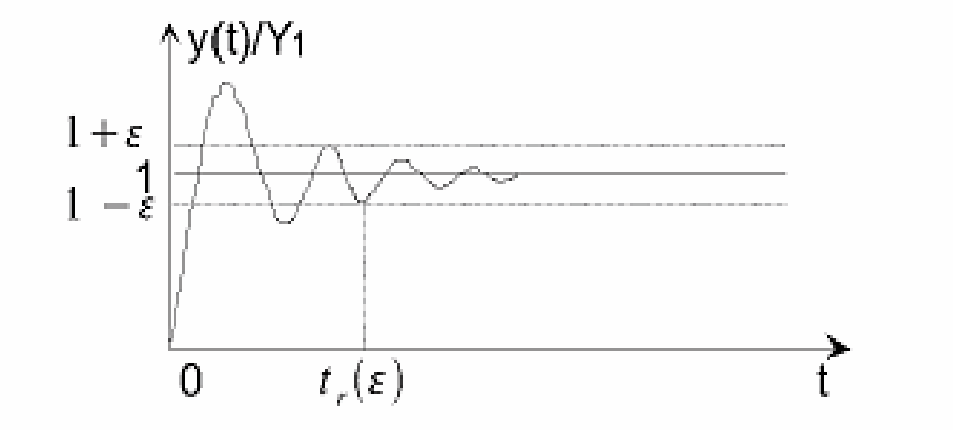


Figure 2.12.Temps de réponse d'un dispositif du 2_{nd} ordre

m. Bande passante :

Elle est définie comme étant la plage de fréquence devariation du mesurande où les caractéristiques du capteur spécifiées par le constructeur sont respectées.

Si la fréquence du mesurande est comprise entre fréquence basse et fréquence haute, l'amplitude du signal de sortie sera conforme aux spécifications du constructeur.

$$B.P = [f_{basse}, f_{haute}]$$

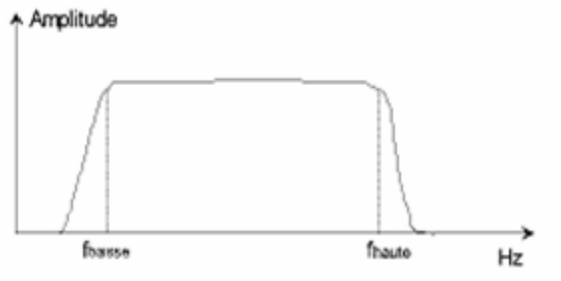


Figure 2.13.Bande passante

n. Incertitude apportée par un dispositif :

G_n et y_{on}Gain nominal et décalage**$y_n = G_n \times x + y_{on}$**

Relation réelle entre Entrée x et Sortie y :Gety_o Gain réel et décalage réel de zéro

$y = G \times x + y_o$

Incertitude δy sur la grandeur de sortie du dispositif :

δy dépend de δG et δy_o

$\delta y = y - y_n \delta y = \delta G * x + \delta yo$

Un capteur idéal est celui pour lequel :

- on dispose d'une relation linéaire connue entre la Grandeur à mesurer et le signal de sortie du capteur

- les conditions d'emploi sont telles qu'aucune grandeur D'influence ne perturbe son fonctionnement

- aucun bruit parasite ne se superpose au signal utile

2.3. Chaîne d'acquisition

La chaîne d'acquisition a pour fonction de:

- Recueillir les informations nécessaires à la connaissance de l'état d'un système, Sachant que l'état d'un système est caractérisé par des grandeurs physiques ou chimiques appelées mesurandes.
- Délivrer ces informations sous une forme appropriée à leur exploitation.
- Assigner une valeur (un nombre) à un mesurande.

2.3.1. Constitution de la chaîne

Généralement, elle est constituée de trois parties :

Partie 1 :Acquisition des données (analogique) : capteurs, conditionneurs,amplificateurs, multiplexage.

Partie 2 :Transformation des données CAN (Convertisseur Analogique Numérique).

Partie 3 : Traitement des données

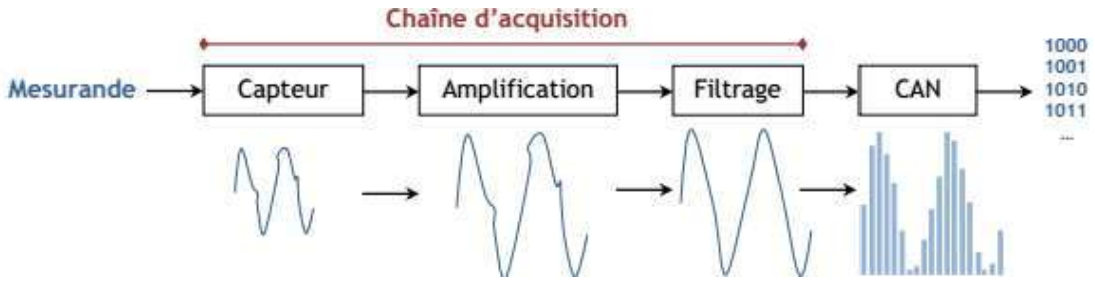


Figure 2.14. Chaîne d'acquisition [5]

La figure 2.15. et2.16.montrent un exemple de chaine d'acquisition et Emplacement de la chaîne, respectivement.

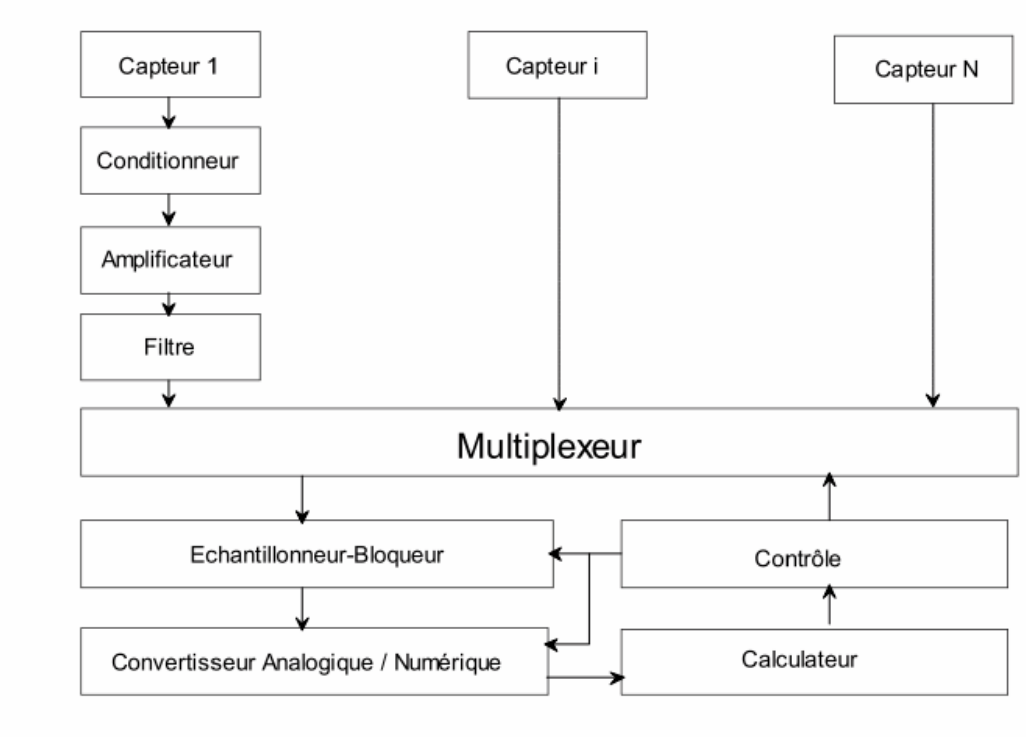


Figure .2.15 . Exemple de chaîne d'acquisition

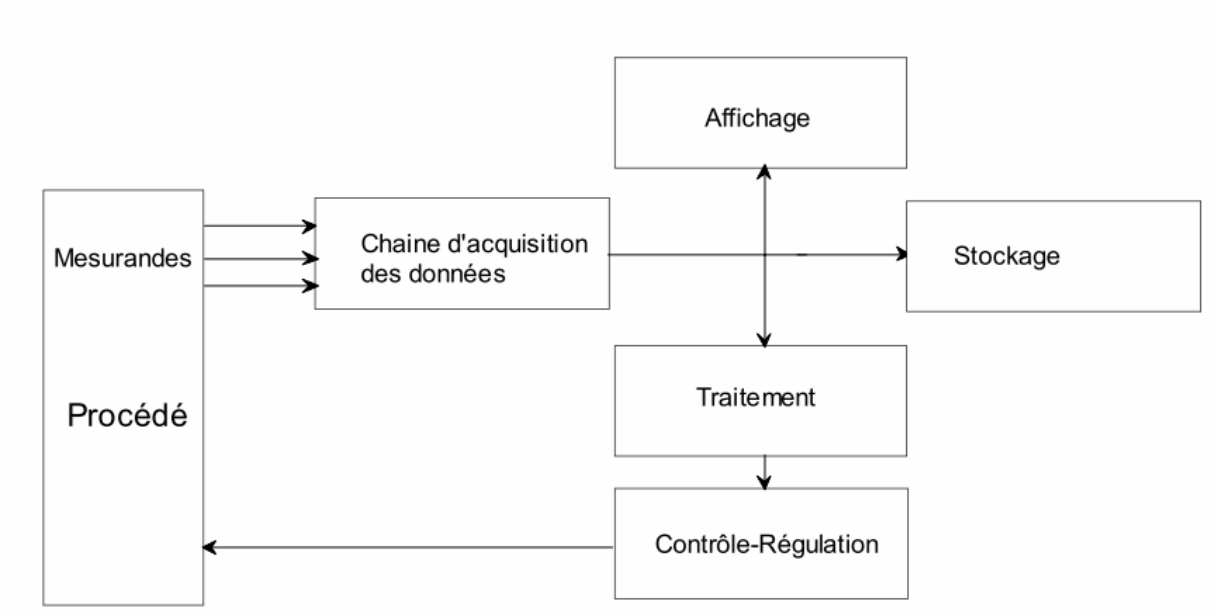


Figure. 2.16 .Emplacement de la chaîne

2.4. Conditionnement des signaux

Le conditionnement permet de mettre en forme le signal mesuré en vue 'un traitement et d'unetransmission éventuelle. Il ne s'agit pas ici de faire un bilanexhaustif des conditionnementsassociés aux capteurs mais d'en donner quelques exemples [5].

2.4.1. Conversion courant-tension[5].

Lorsque le signal de sortie du capteur est un courant, le rôle duconvertisseur courant-tension estde transformer celui-ci en une tension. Le montage (figure 2.17) est réalisé de telle sorte qu'aucuncourant ne parcoure Rc, et que tout le courant fourni par la source i(m) représentant le courant à convertir traverse R et détermine la tension de sortie : vout = - R.i(m)

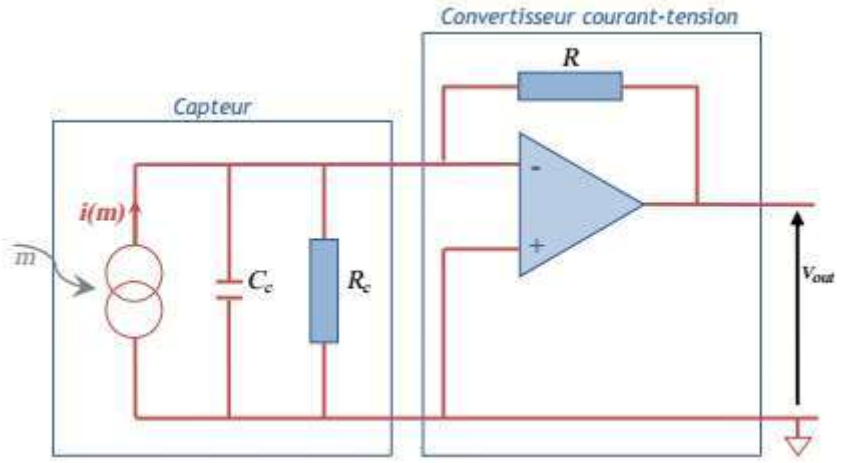


Figure.2.17 : Capteur générant un courant associé à un convertisseur courant-tension à amplificateur opérationnel

2.4.2. Amplification[5].

Lorsque les signaux électriques issus des capteurs sont de faible amplitude,il peut êtrenécessaire de les amplifier pour les adapter à la chaîne de transmission. Il faut savoir quel'amplification (en tension ou en puissance) du signal électrique issu du capteur est unphénomène bruyant : elle s'accompagne d'une dégradation du rapport signal sur bruit. Celasignifie que si l'amplitude du signal utile issue du capteur se trouve augmentée, les parasites(bruit) le sont également mais dans des proportions plus grandes encore.Les amplificateurs d'instrumentation sont conçus de manière à optimiser le rapport signal surbruit, c'est à dire à « peu » le dégrader. Ils sont caractérisés par un gain d'amplification (entension ou en puissance) ratio du signal électrique de sortie de l'amplificateur sur le signald'entrée, ainsi que par un facteur fruit F>1 qui quantifie la dégradation du rapportsignal surbruit entre l'entrée et la sortie.

2.4.3. Filtrage[5].

Le filtrage peut avoir différentes applications. Il peut en particulier être pratiquéafin de réduirele bruit (signal parasite « large bande » ou haute fréquence) entachant le signal utile. Ainsi unfiltrage passe-bas éliminera le bruit haute fréquence et produira un effet de lissage utile.

Placé avant l'échantillonnage de la conversion analogique/numérique le filtred'entrée appelé filtre anti-repliement,contraint le signal à avoir un spectre limité tel quefmax<fe/2. Placé en sortie de la conversion analogique/numérique,le filtrage lisse le signal desortie pour restituer le signal utile.

2.5. Conversion analogique/numérique[5]

La conversion analogique/numérique consiste à transformer la tension analogique (issue du capteur) en un code binaire (numérique) adapté à son exploitation dans un processus de régulation, de contrôle, de calculs ou encore de stockage. La conversion analogique/numérique n'est pas systématique, un stockage ou une régulation pouvant également être réalisés à partir de données analogiques.

Le Convertisseur Analogique Numérique (CAN) transforme le signal analogique, signal continûment variable pouvant prendre une infinité de valeurs, en un signal numérique, signal discontinu pouvant être représenté aux moyens de données binaires (0 et 1). La conversion analogique/numérique comporte deux étapes, l'échantillonnage et la conversion proprement dite. L'échantillonnage est une opération qui doit satisfaire un juste équilibre entre précision et rapidité.

La rapidité à laquelle sont prélevés les échantillons doit permettre une reconstruction fidèle dusignal, elle est représentée par la fréquenced'échantillonnage fe qui doit être suffisammentgrande pour retranscrire les variations rapides du signal (figure 2.18). Le théorèmed'échantillonnage aussi dénommé théorème de Shannon-Nyquist, permet de déterminer lafréquenced'échantillonnage d'un signal donné. Il énonce que la reconstruction d'un signal desortie fidèle au signal d'entrée, requiert de choisir une fréquence d'échantillonnage qui soit aumoins deux fois supérieure à la fréquence maximale contenue dans lesignal d'entrée, soit :

$fe \geq 2.fmax$.

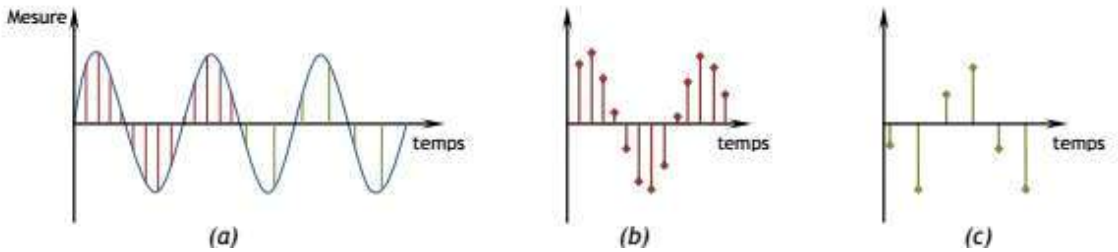


Figure .2.18. : Echantillonnages d'un signal de mesure (a) avec une fréquence d'échantillonnage plus élevée dans le cas (b) que le cas (c), feb>fec

La précision du codage du signal numérique dépend du nombre de bits sur lequel s'effectue cecodage. Chaque peut prendre 2 valeurs (0 ou 1), un codage sur 2 bits peut prendre 4 valeurs, uncodage sur n bits peut prendre 2^n valeurs (figure 2.19).

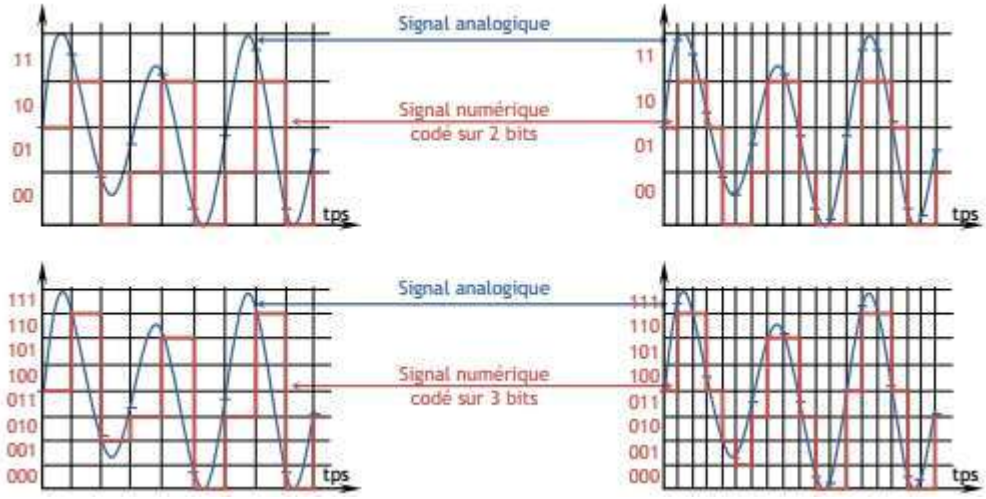


Figure 2.19. : Représentations de codages d'un signal sur 2 et 3 bits et avec 2 échantillonnages

Chapitre 3

Conception et réalisation de la chaîne d'acquisition des signaux

3.1. Introduction

Les phénomènes physiques couramment rencontrés en ingénierie sont généralement mesurés sous forme d'amplitude d'une grandeur physique variant en fonction du temps. Pour certains phénomènes physiques, on peut prédire avec une certaine précision l'évolution temporelle des signaux mesurés. On parle alors de signaux déterministes. Mais les ingénieurs sont le plus souvent confrontés à des signaux dont chaque nouvel enregistrement est différent du précédent. On parle alors de signaux aléatoires.

Ce chapitre concerne la conception et la réalisation d'une chaîne d'acquisition et d'une interface graphique pour l'enregistrer, l'analyser et l'interprétation des signaux aléatoires rencontrés en vibration et acoustique.

3.2. Conception et réalisation du système d'acquisition

Le système d'acquisition développé comporte les éléments constitutifs suivants:

1. Carte d'acquisition du PC;
2. Accéléromètre;
3. Microphone;
4. Prise jack;
5. Cordon USB 2.0 type A male.

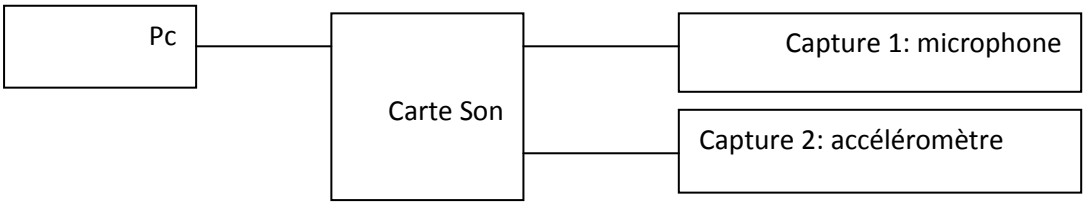


Figure 3.1. Schéma de la chaîne d'acquisition

a/ Carte son

Une carte son est une carte d'extension d'ordinateur. La principale fonction de cette carte est de gérer tous les sons émis pour les envoyer vers les haut-parleurs ou reçus par l'ordinateur. Elle se présente sous la forme d'un périphérique que l'on peut connecter à l'ordinateur sur un bus PCI, PCI Express, PCMCIA (pour ordinateur portable), USB ou Firewire.

Figure 3.2- Schéma universel d'une carte son

Fréquence d'échantillonnage

On retrouve notamment les valeurs suivantes : 44 100 Hz, 48 000 Hz, 96 000 Hz, 192 000 Hz. Plus la fréquence d'échantillonnage est grande, plus le son sera affiné et donc naturel. Il ne faut pas confondre une fréquence d'échantillonnage avec le couvrement du spectre. Par exemple, la fréquence d'échantillonnage 44 100 Hz permet de couvrir le spectre jusqu'à 22 050 Hz.

Les cartes son ont été conçu selon la capacité de l'oreille humaine qui peut en général entendre sur le spectre suivant : 20 Hz - 20 000 Hz.

B/ Accéléromètre

L'accéléromètre utilisé est sous forme d'une carte électronique de marque ACCEL BOARD. Il estutilisé pour mesurer la force de la gravité, l'accélération et pour détecter la rotation, etc.

Principales caractéristiques:

- Détection en 3 axes;
- Tension d'alimentation 5V DC;
- Consommation basse de l'énergétique.



Figure 3.3- vues de face et arrière de l'accéléromètre

Connexion de l'accéléromètre

la figure 3.2- montre le schéma électronique de l'accéléromètre.

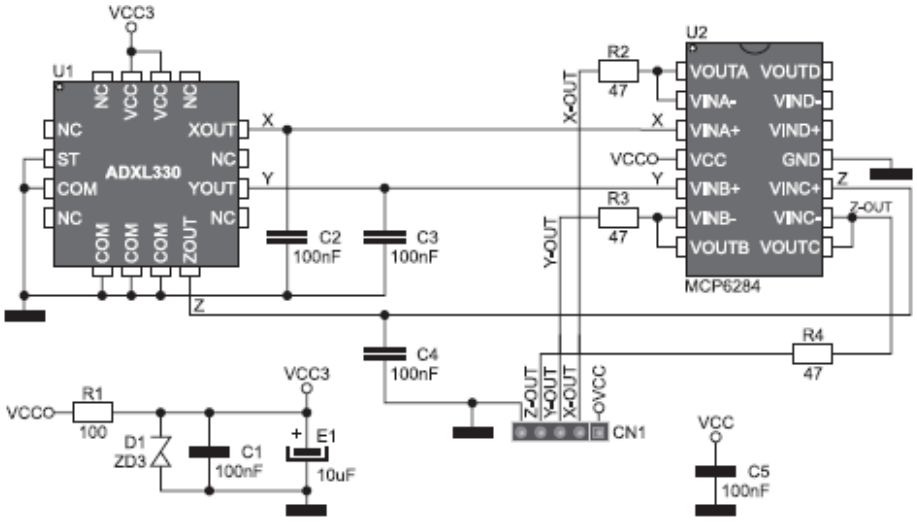


Figure 3.4-schéma électronique de l'accéléromètre

La fonction des broches supplémentaires:

X :X axe de sortie

Y : sortie de l'axe Y

Z : Sortie d'axe Z

VCC : 5V DC tension d'alimentation

GND :Masse

C/Microphone

Un microphone est un transducteur électroacoustique, c'est-à-dire un appareil capable de convertir un signal acoustique en signal électrique.

L'usage de microphones est aujourd'hui largement répandu et concourt à de nombreuses applications pratiques :

- Télécommunications (téléphone, radiotéléphonie, Interphone, systèmes d'intercommunication) ;
- Sonorisation ;
- Radiodiffusion et télévision ;
- Enregistrement sonore notamment musical ;
- Mesure acoustique.

Dans notre étude, nous avons utilisé un Microphone à électret. Ce dernier, il est parfaitement adapté aux cartes son intégrées et aux cartes son multimédia,

Les Microphones à électret sont des microphones à condensateur n'ayant pas besoin d'une polarisation aussi élevée pour fonctionner.

Ces microphones ont permis la miniaturisation ainsi que l'obtention de microphones de très grandes qualités tout en étant transportable. Seule une alimentation d'une pile suffit. De plus, la miniaturisation des circuits électroniques a permis d'inséré et la pile et un circuit amplificateur dans le boîtier conventionnel d'un microphone. Ils sont parmi les plus répandus actuellement.

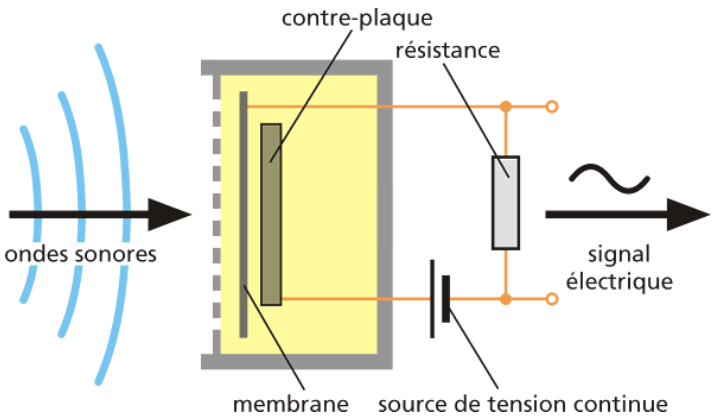


Figure 3.5-Schéma de principe d'un microphone

D/Prise jack

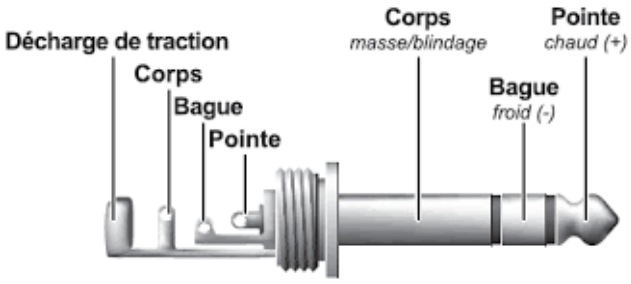


Figure 3.6- Prise jack

E/Cordon USB 2.0 type A male.



Figure 3.7- Cordon USB 2.0 type A male.

F/Systèmed'acquisitiondéveloppé

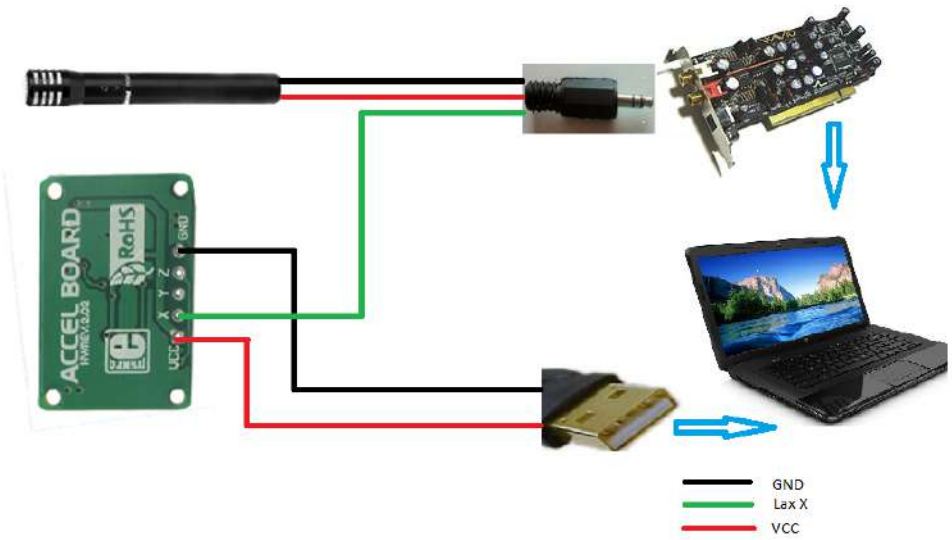


Figure 3.8- Schéma du système d'acquisition des signaux

3.3.Conception d'une interface graphique pour l'analyse des signaux

Après la réalisation du système d'acquisition des signaux, nous avons effectué des tests aléatoires pour vérifier le bon fonctionnement du système. Ensuite, nous avons conçu une interface graphique pour gérer l'acquisition et l'analyse des signaux.

L'interface développée offre un ensemble d'outils nécessaires pour simplifier le déroulement du système. Elle permet de faire les tâches suivantes:

-Choisir la gamme d'analyse et le nombre des échantillons;

- Acquérir et enregistrer les signaux dans des fichiers;

- Tracer les signaux temporels;

- Tracer les spectres fréquentiels,

- Calculer les indicateurs statistiques liés aux signaux.

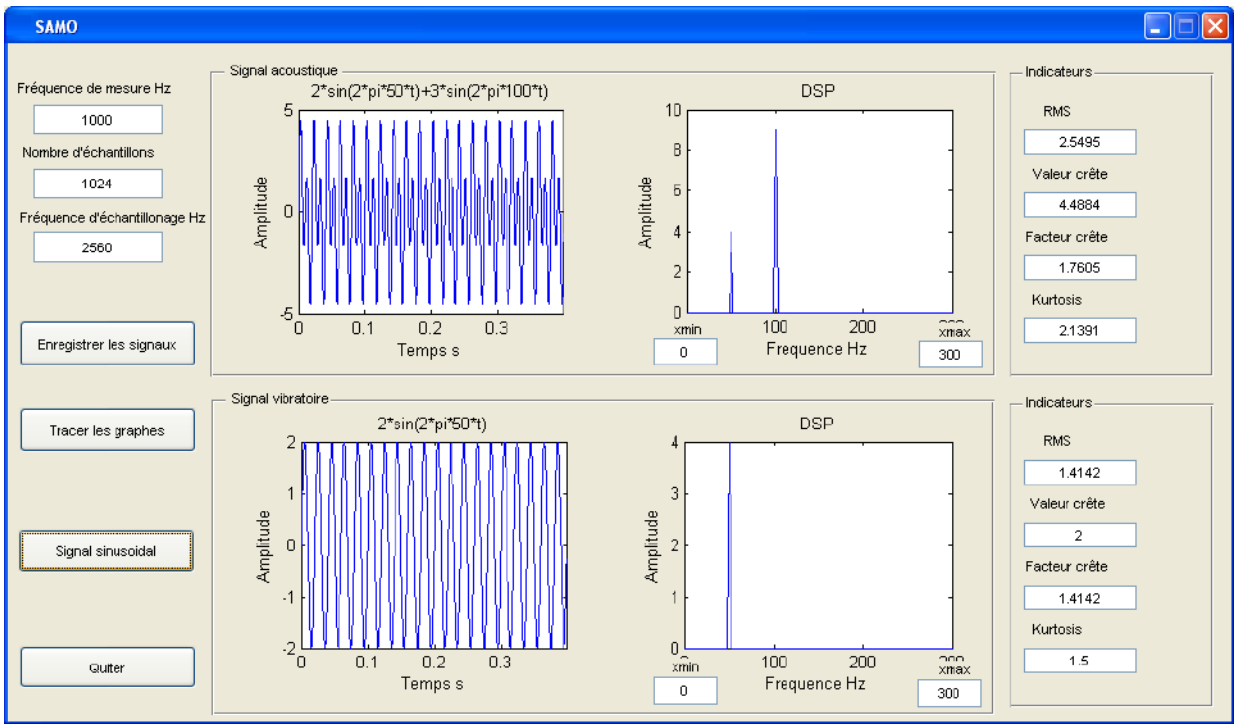


Figure 3.9- L'interface développée

Indicateurs statistiques

Dans le domaine temporel, les indicateurs statistiques peuvent être utilisés sont : RMS, Valeurs crête, facteur crête, Kurtosis, Skewness.

La valeur efficace du signal *(*ou RMS RootMean Square*)*

C'est un indicateur qui mesure le contenu énergétique dans un signal temporel. Sa valeur correspond à la racine carrée de la moyenne du carrée du signal *x(t)* calculée sur une période T.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T}.\int_{t}^{t+T} x^2(t).dt} \tag{3.1}$$

Et pour une variable discrète$\{x_i\}$

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i^2} \tag{3.2}$$

Où n et x_i sont le nombre d'échantillons prélevés dans le signal et l'amplitude du niveau vibratoire mesuré filtré ou non, respectivement.

Les indicateurs crêtes

Les indicateurs crêtes sont issus des valeurs crêtes(supérieures, inférieures ou crêtes à crêtes) du signal temporel mesuré. Les plus utilisés sont le facteur crête et le facteur K.

Le facteur de crête (FC) défini comme étant le rapport entre la valeur crête (VC) d'un signal (en valeur absolue) et sa valeur efficace.

$$FC = \frac{Vcc_{crête}}{\mathrm{V}_{efficace}} = \frac{\sup|x_i|}{RMS} \tag{3.3}$$

Le facteur K défini comme étant le produit entre la valeur crête et la valeur efficace.

$$K = Vcc_{crête}.\mathrm{V}_{efficace} \tag{3.4}$$

Le Kurtosis

Le Kurtosisou coefficient d'aplatissement, est le moment centré d'ordre 4.Le Kurtosis est un indicateur statistique permettant de détecter l'apparition des chocs et de suivre l'évolution des défauts induisant des forces impulsionnelles périodiques.Il permet de détection précoce d'un défaut de roulement. Il correspond au moment d'ordre 4 normé de la distribution statistique du signal. Il est défini comme suit :

$$Kurtosis = \frac{M_4}{M_2^2} = \frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^4}{\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2\right)^2} \quad (3.5)$$

oùM_4 et M_2 sont les moments statistiques d'ordre 4 et d'ordre 2, respectivement.

$\bar{x}$ est la valeur moyenne de$\{x_i\}$,

$$\overline{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \quad (3.6)$$

Le skewness

Le Skewnessou Le coefficient d'asymétrie correspond à une mesure de l'asymétrie de la distribution d'une variable aléatoire réelle.

$$Skewness = \frac{M_3}{M_2^{3/2}} = \frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^3}{\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2\right)^{3/2}} \quad (3.7)$$

3.4. Procédure d'utilisation de l'interface graphique

La procédured'exploitation du système développé, consiste à suivre les étapes suivantes (voir figure 3.10):

1. Lancer l'application
2. Entrer les valeurs suivantes : la fréquence de mesure Fm et le nombre des points d'échantillonnage Ne.
3. Lancer l'acquisition des signaux en appuyant sur le bouton enregistrer les signaux.
4. Donner un nom au fichier de données. Exemple: f_N°_Ne_fmHz.txt

5. Appuyer sur le bouton Tracer les graphes pour visualiser les signaux temporels et les spectres de fréquence correspondants ainsi les valeurs des indicateurs statistiques.
6. Pour analyser les signaux sinusoïdaux, exécuter les étapes 1 et 2 ensuite appuyer sur le bouton Tracer les graphes pour visualiser les résultats.
   L'amplitude des signaux vibrations représente l'accélération en g et l'amplitude des signaux acoustiques représente la pression acoustique.
7. Appuyer sur le bouton quitter pour quitter l'application.

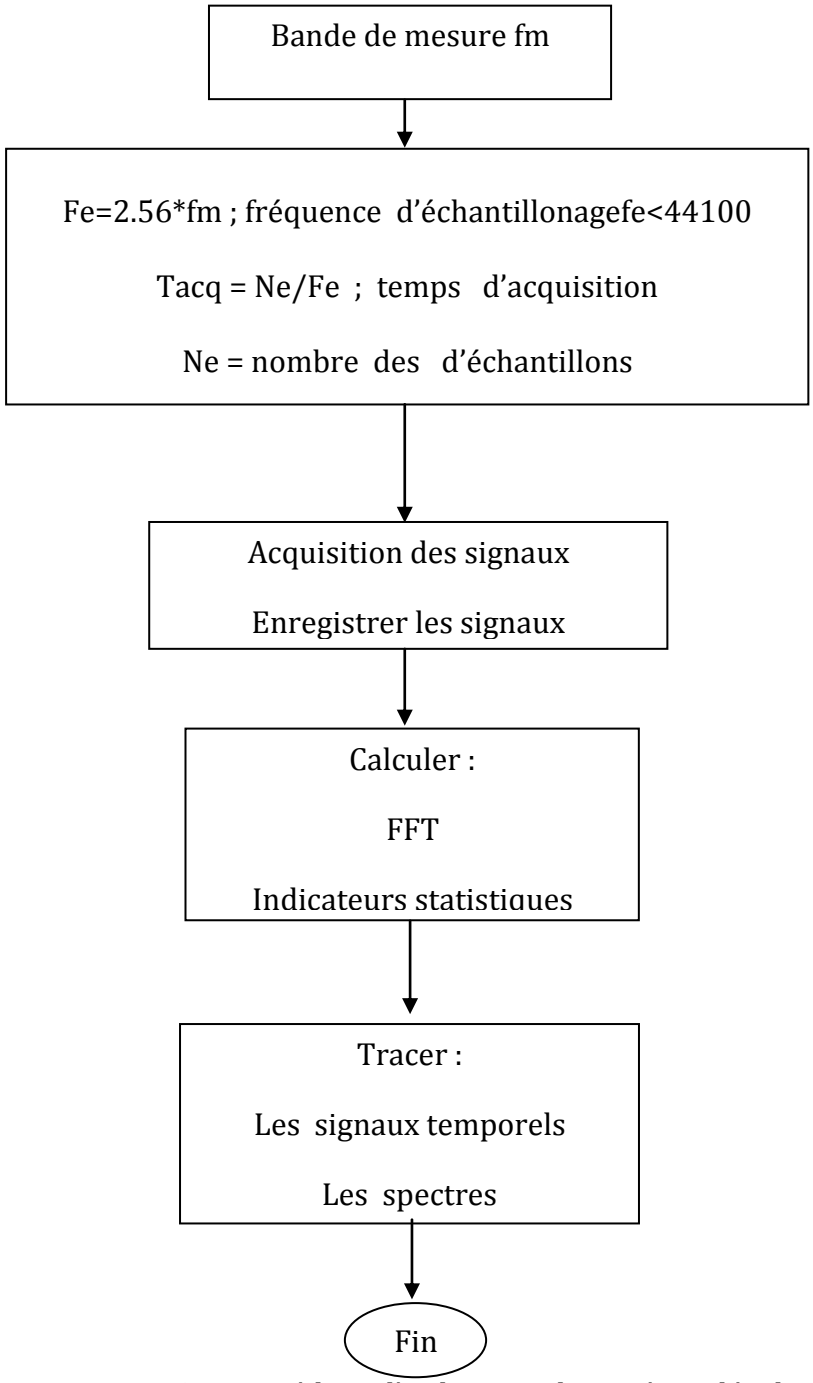


Figure 3.10- Procédure d'utilisation du système développé

3.5. Applications

3.5.1. Echantillonnage des signaux

L'utilisation d'un algorithme de calcul nécessite une numérisation du signal. Cette numérisation est effectuée à l'aide d'un convertisseur analogique /numérique, à la fréquence d'échantillonnage F_e. Le calcul du spectre s'effectue sur un nombre N_e d'échantillons. Ce nombre est toujours une puissance de 2.

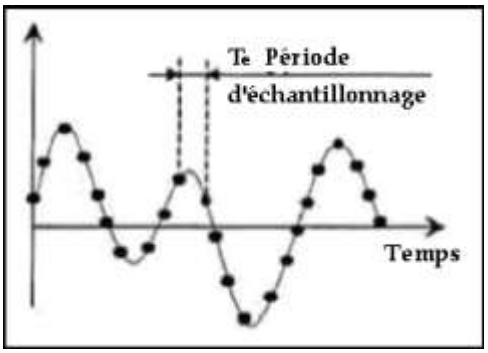


Figure 3.11- échantillonnage d'un signal

a/ Temps d'acquisition

Le temps d'acquisition T_{acq} correspond à la durée d'observation du signal

$$\text{Tacq} = \text{N e} \,.\, \text{Te} = \frac{Ne}{Fe} = \frac{N\text{e}}{2.56 \,.\, F\text{max}}$$

Avec :

Ne : Nombre d'échantillons (ou Nombre de points enregistrés)

Nombre d'échantillons : $Ne = 2^n$

Pour n=13 $Ne = 2^{13} = 8192$ points

T_e : Période d'échantillonnage / F_e : Fréquence d'échantillonnage

F_{max} : Bande de mesure par exemple [0 20 000] Hz

Exemple :

F_{max} = 20 000 Hz et Ne = 8192 points

$$\text{Tacq} = \frac{Ne}{2.56 \,.\, F\text{max}} = \frac{8192}{2.56.20000} = 0.16 \text{ second}$$

b/Résolution

La résolution des mesures est considérée comme un facteur important à prendre en compte. Elle dépend à la fois de la largeur de la plage de fréquence dans laquelle le spectre est calculé et du nombre: d'échantillons Ne :

Δf= fonction (Largeur de la plage de fréquence, N_e)

$$\Delta f = \frac{\text{Fréquence pleine échelle}}{\text{Nombre de ligne}}$$

Avec :

$$\text{Nombre de ligne} = \frac{Ne}{2056}$$

Donc on a :

$$\Delta f = \frac{Fe}{Ne} = \frac{1}{Ne\,.\,Te} = \frac{1}{Tacq}$$

Exemple :

pour analyser un signal sur une plage de fréquence [0 - 1 000] Hz, la résolution de base d'un analyseur de 400 lignes sera donc de :

$$R = \Delta f = \frac{1000}{400} = 2.5\ HZ$$

Remarque : Une résolution mal adaptée ne permettra pas de dissocier deux composantes de fréquences très proches.

c/ Effet de repliement et filtre anti-repliement

L'échantillonnage du signal a pour effet de créer artificiellement, de part et d'autre de la fréquence d'échantillonnage et de ses harmoniques, des spectres fictifs identiques au spectre réel. Ce phénomène qui doit être corrigé sous peine d'un risquede chevauchement et d'interprétation erronée est appelé effet de repliement (voir figure 3.12).

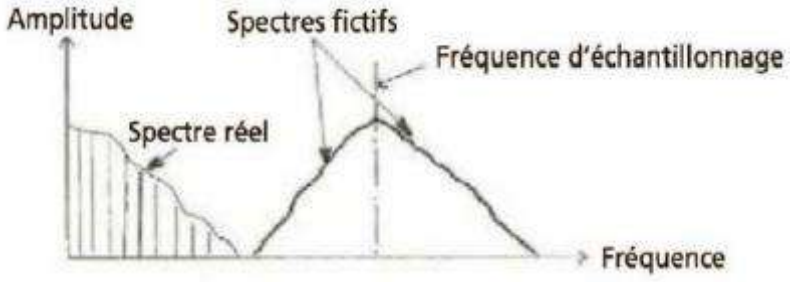


Figure 3.12- Suppression, par le filtre anti-repliement, du risque

Afin d'éviter l'effet de repliement,la fréquence d'échantillonnage Fe , est au moins égale au double de la fréquence la plus élevée des composantes élémentaires constituant le signal F max (théorème de Shannon).

Si [0-F] est la gamme d'analyse, la fréquence d'échantillonnage Fe , (voir figure 3.13)est égale à :

$$F_e = 2{,}56 \cdot F_{max}$$

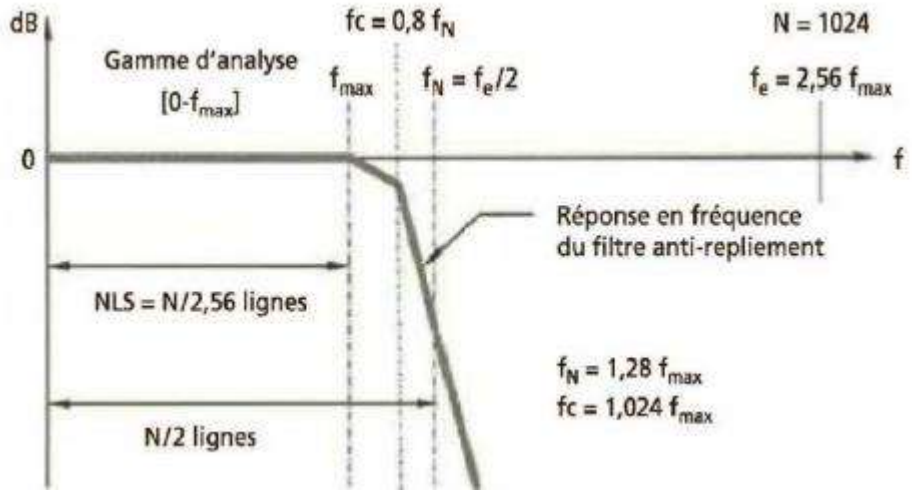


Figure 3.13- Positionnement de la fréquence de coupure du filtre anti repliement

Le tableau 3.1 Effets de la gamme d'analyse et le nombre d'échantillons sur la résolution.

Tableau 3-1 : Effetsde la gamme d'analyse et le nombre d'échantillons

N	Ne=2^n	F_{max}= 500 Hz Fe=1280 Hz	F_{max} = 1000 Hz Fe=2560 Hz	F_{max}=10000Hz Fe=25600 Hz	F_{max}=20000 Hz Fe=51200 Hz
		R(Hz)	R(Hz)	R(Hz)	R(Hz)
10	1024	1.25	2.50	25.00	50.00
11	2048	0.63	1.25	12.50	25.00
12	4096	0.31	0.63	6.25	12.50
13	8192	0.16	0.31	3.13	6.25
14	16384	0.08	0.16	1.56	3.13
15	32768	0.04	0.08	0.78	1.56
16	65536	0.02	0.04	0.39	0.78

Dans le cas d'une carte son, la fréquence d'échantillonnage maximale : Fe=44800 Hz. Donc nous allons utiliser des gammes de fréquence suivantes: 500 Hz, 1000 Hz et 10 000 Hz. La Figure 3.14. Montre l'évolution de la résolution en fonction la gamme d'analyse et le nombre d'échantillon. on constate que la résolution augmente avec l'augmentation de la gamme d'analyse et le nombre des échantillons. La Figure 3.15Montre l'évolution du temps d'acquisition en fonction la gamme d'analyse et le nombre d'échantillon.On constate que temps d'acquisition diminue avec l'augmentation de la gamme d'analyse et le nombre des échantillons.

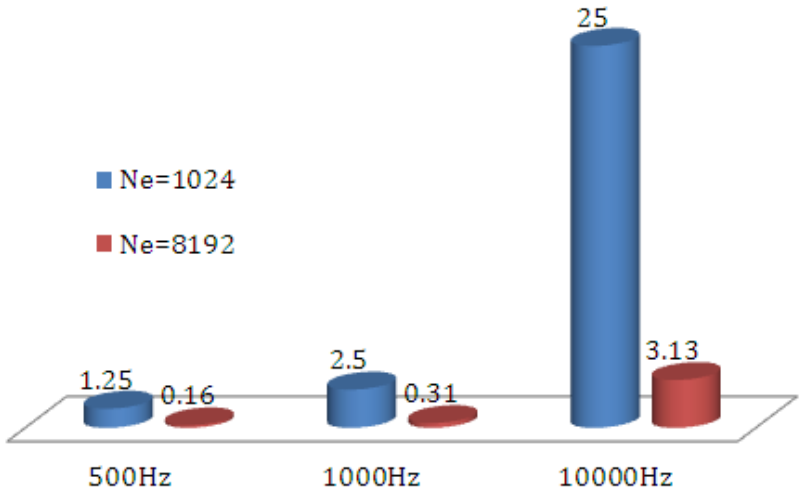


Figure 3.14-Evolution de la résolution

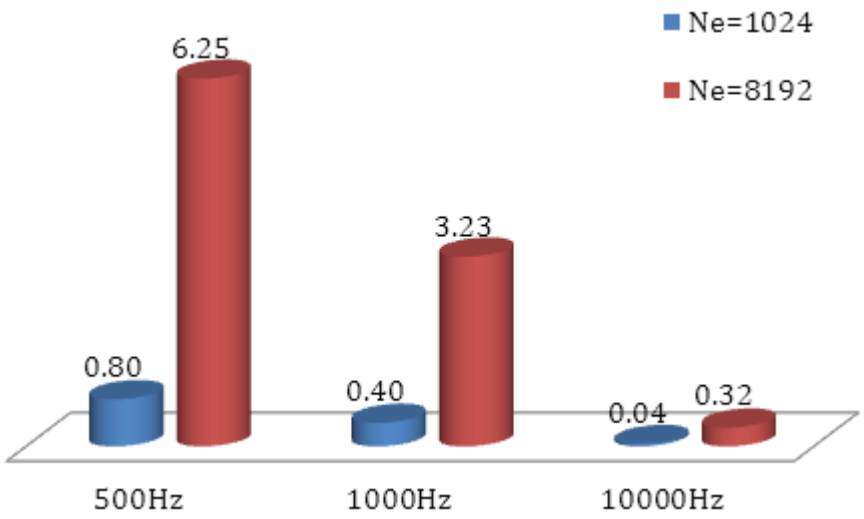


Figure 3.15-Evolution du temps d'acquisition

3.5.2.Analyse de deux signaux sinusoïdaux

Afin de valider l'utilisation de l'application qui a été conçue, nous avons introduire dans l'application un sous-programme qui permet de calculer le contenu fréquentiel spectre) et les indicateurs statistiques relatifs aux deux signaux sinusoïdaux.

Les deux signaux considérés sont définis comme suit :

Signal n°1: x1=2*sin(2*pi*50*t)+3*sin(2*pi*100*t);

Signal n°2: x2=2*sin(2*pi*50*t);

Pour chaque signal, (voir figure 4.16),l'application illustre le signal temporel et leur contenu fréquentiel correspondant. L'amplitude du contenu fréquentiel représente la valeur de DSP (densité spectrale de puissance).

Pour le premier signal n° 01, le spectre montre la présence des pics aux fréquences 50 et 100 Hz. Ces deux fréquences sont identiques avec les fréquences définis par la fonction du signal.

Pour le premier signal n° 02, le spectre montre la présence un pic à la fréquence 50 Hz. Cette fréquence est identique à la fréquence.

Ces résultats confirment l'exactitude de calcul du spectre par l'application.

L'application a permet aussi de calculer les indicateurs statistiques(rms, valeur crête, facteur crête et kurtosis) relatifs aux deux signaux.

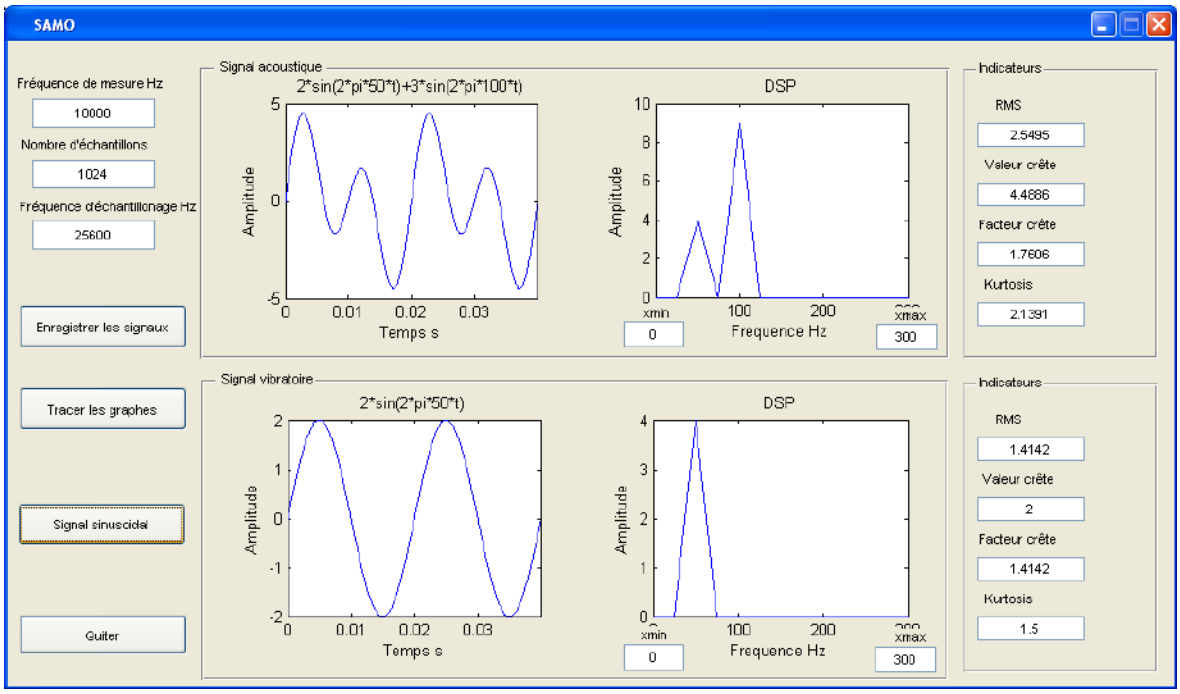


Figure 3.16- Résultats issus de l'analyse des signaux sinusoïdaux

3.5.3. Analyse des signaux acoustiques et vibratoires réels

Dans ce qui suit, nous allons utiliser le système d'acquisition et l'interface graphique pour l'acquisition et le traitement des signaux prélevé par capteurs. Un microphone et un accéléromètre.

A/ Frappe une pièce en acier avec un marteau

Cas n° 01 :

Dans cet essai, les mesures ont été effectuées dans les conditions suivantes :

1- Bande de fréquence [0 500] Hz.

2- Nombre de points d'échantillonnage égal à 1024 point.

La figure 3.17montreles résultats obtenus à partir de l'acquisition signaux et des calculs. On constate sur les deux signaux temporels (signal acoustique et signal vibratoire), la présence des impulsions périodiques qui représentent des chocs produits par la frappe du marteau. Sur les spectres fréquentiels des deux signaux, on constate la présence de plusieurs pics.

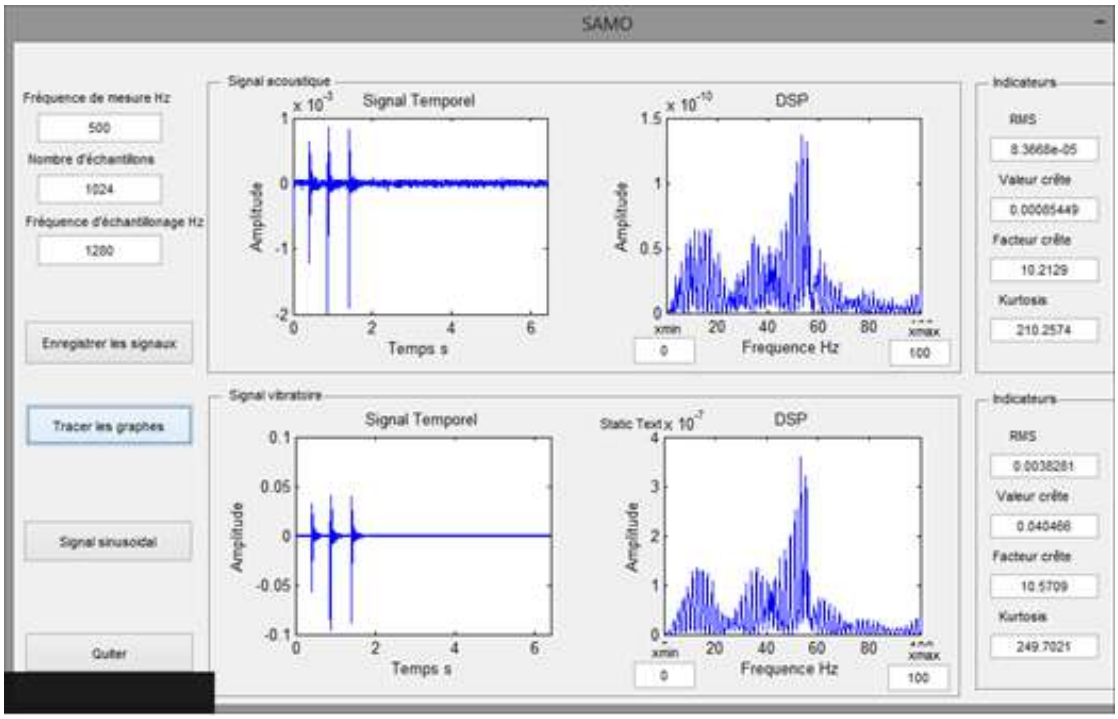


Figure 3.17- Marteau/acier 500 Hz

Cas n° 02 :

Dans cet essai, les mesures ont été effectuées dans les conditions suivantes :

3- Bande de fréquence [0 1000] Hz.

4- Nombre de points d'échantillonnage égal à 1024 point.

La figure 3.18montre les résultats obtenus à partir de l'acquisition signaux et des calculs. On constate sur les deux signaux temporels (signal acoustique et signal vibratoire), la présence des impulsions périodiques qui représentent des chocs produits par la frappe du marteau. Sur les spectres fréquentiels des deux signaux, on constate la présence d'un pic à la même fréquence : 58 Hz.

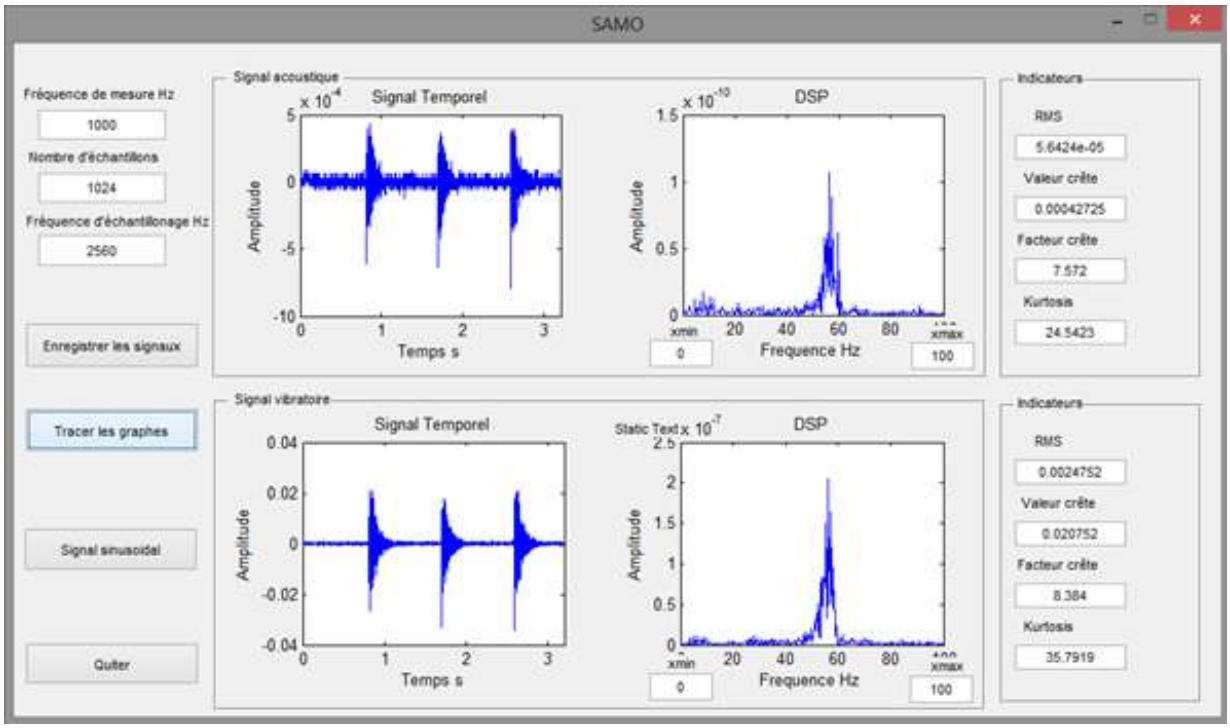


Figure 3.18- Marteau/acier 1000 Hz

La figure 3.19 montre que les valeurs de FC et kurtosis sont plus importantes par rapport les indicateurs rms et vc.

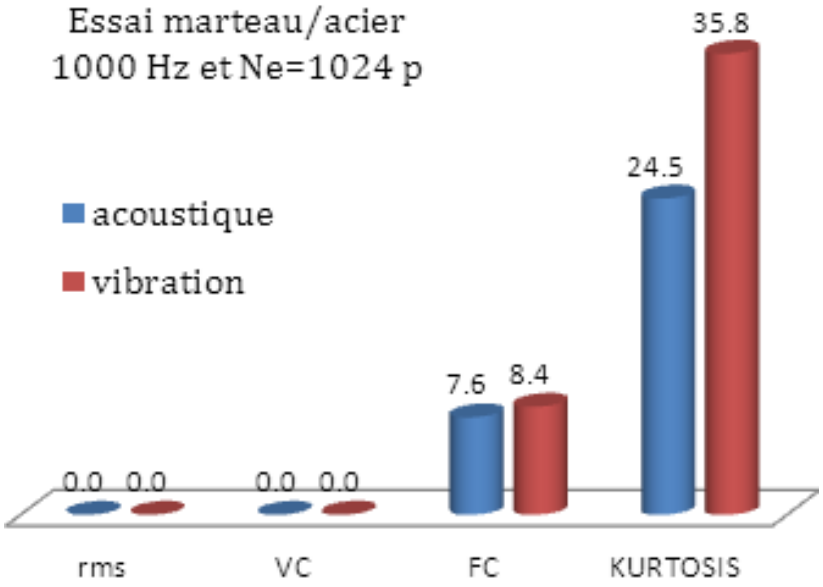


Figure 3.19- Comparaison entre les indicateurs statistiques des deux signaux (acier)

Cas n° 03 :

Dans cet essai, les mesures ont été effectuées dans les conditions suivantes :

1- Bande de fréquence [0 10 000] Hz.

2- Nombre de points d'échantillonnage égal à 1024 point.

La figure 3.20 montre les résultats obtenus à partir de l'acquisition signaux et des calculs. On constate sur les deux signaux temporels (signal acoustique et signal vibratoire), la présence des impulsions non périodiques qui représentent les chocs produits par la frappe du marteau. D'après les spectres fréquentiels des deux signaux, on constate la présence d'un pic à la même fréquence : 58 Hz.

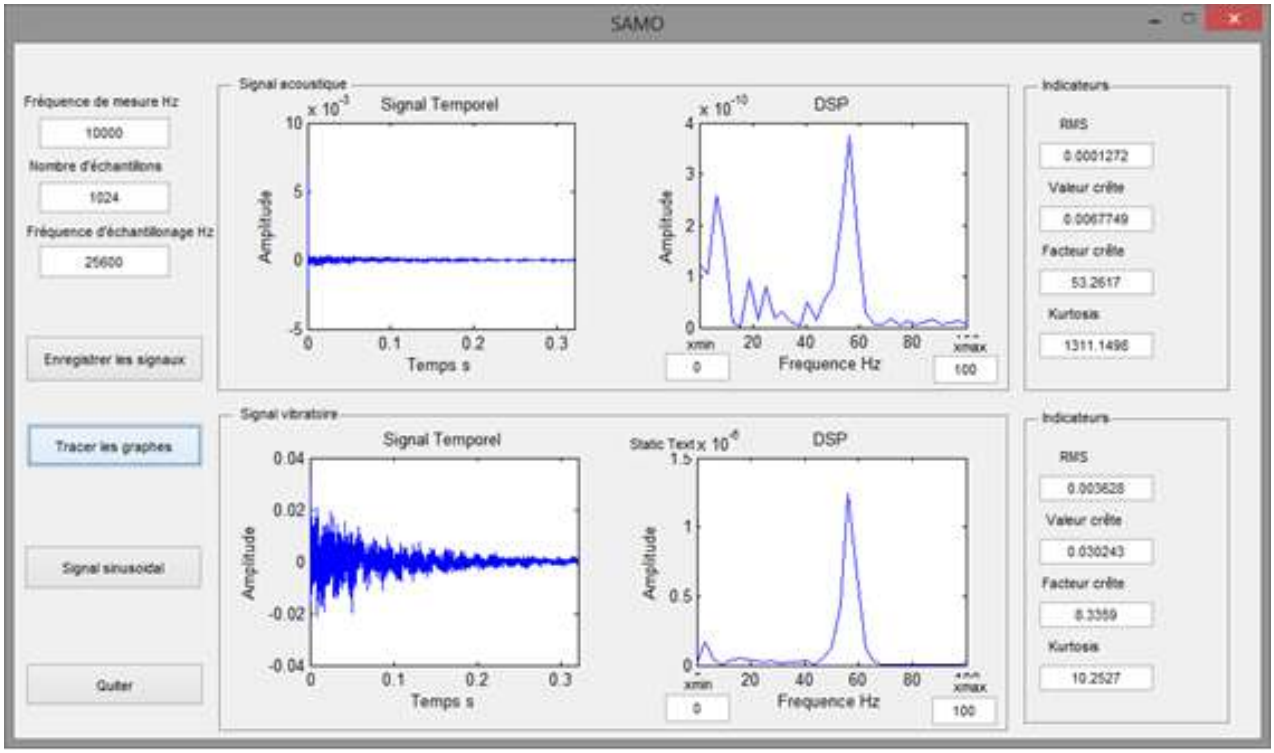


Figure 3.20- Marteau/acier 10000 Hz

D'après les figures 3.17, 3.18correspondants aux cas n°01 et n°02, on constate l'apparition des impulsions périodique. Par contre, dans la figure 3.19 qui correspond au cas n°03, on constate des impulsions non périodiques. La différence entre ces résultats revient au choix de la gamme de mesure et le nombre

d'échantillons Ne. Dans le cas des impulsions non périodiques, on constate que le temps d'acquisition est insuffisant pour capter les chocs périodiques.

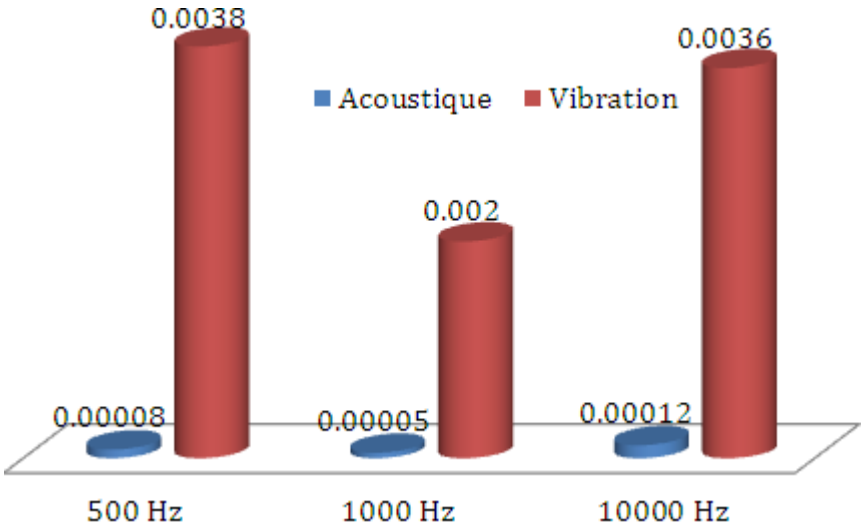


Figure 3.21- Evolution de la valeur de RMS en fonction la gamme de mesure

La figure 3.21, montre l'évolution de l'indicateurs statistiques rms en fonctionla gamme de mesure. Il montre aussi que les amplitudes des signaux vibratoires sont plus élevées par rapport à ceux des signaux acoustiques.

B/Frappe une pièce en bois avec un marteau

Cas n° 01 :

Dans cet essai, les mesures ont été effectuées dans les conditions suivantes :

1- Bande de fréquence [0 500] Hz.
2- Nombre de points d'échantillonnage égal à 1024 point.

La figure 3.22 montreles résultats obtenus à partir de l'acquisition signaux et des calculs. On constate sur les deux signaux temporels (signal acoustique et signal vibratoire), la présence des impulsions périodiques qui représentent des chocs produits par la frappe du marteau. Sur les spectres fréquentiels des deux signaux, on constate la présence de plusieurs pics.

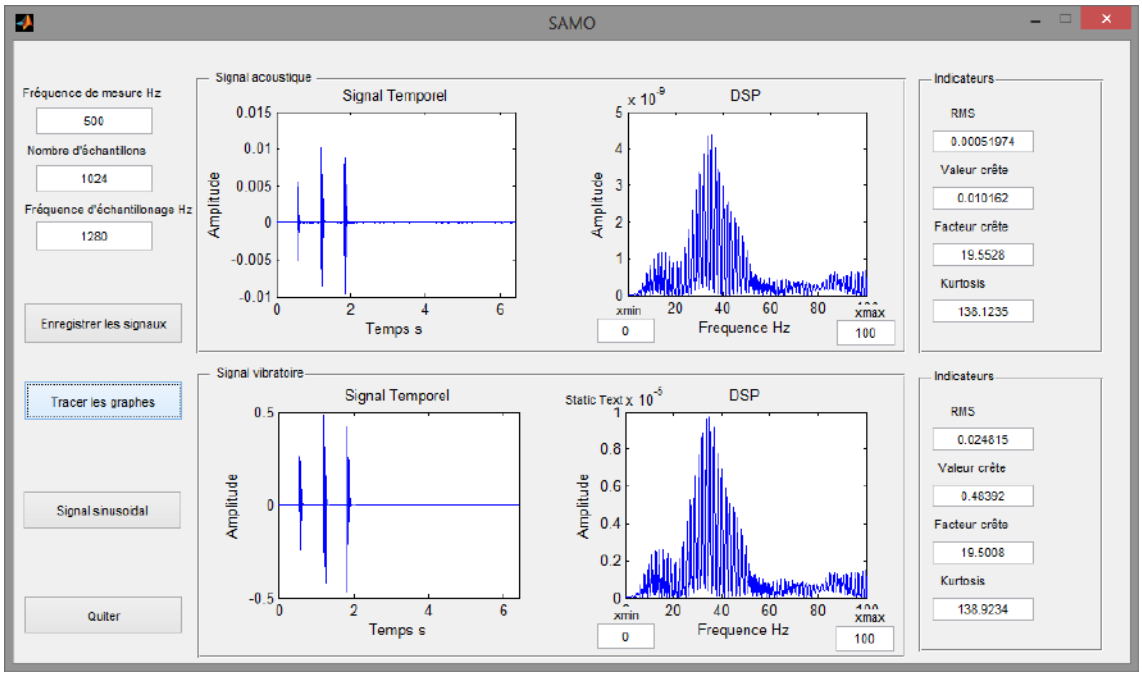


Figure 3.22- Marteau/bois 500 Hz

Cas n° 02 :

Dans cet essai, les mesures ont été effectuées dans les conditions suivantes :

1- Bande de fréquence [0 1000] Hz.

2- Nombre de points d'échantillonnage égal à 1024 point.

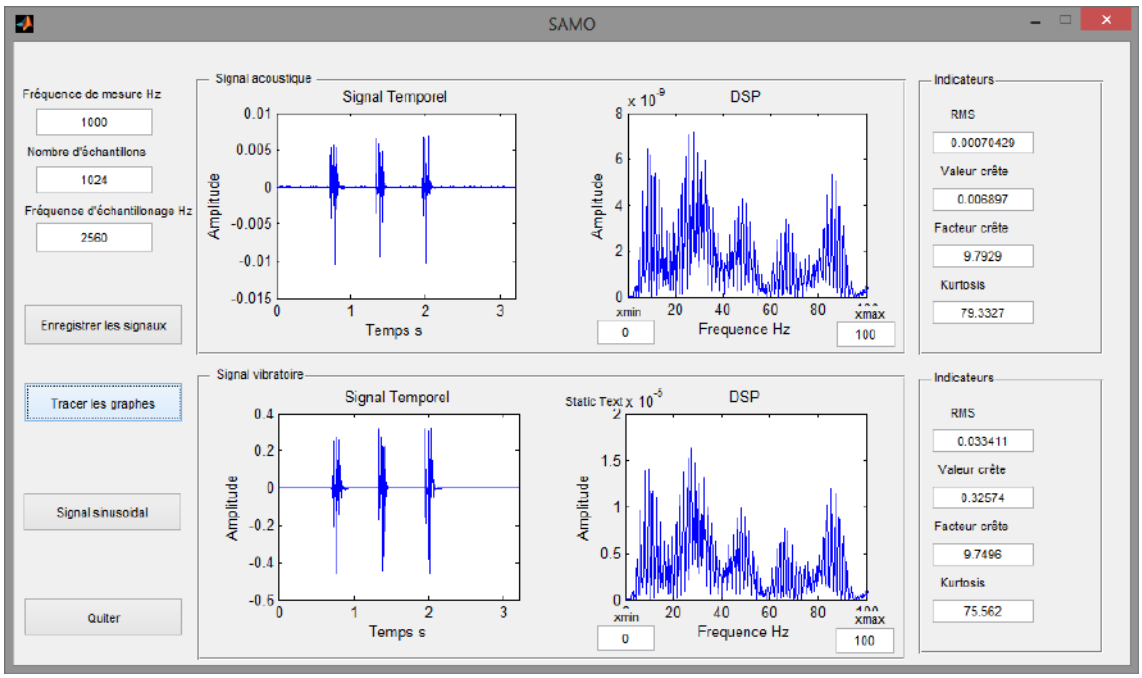


Figure 3.23- Marteau/bois 1000 Hz

Cas n° 03:

Dans cet essai, les mesures ont été effectuées dans les conditions suivantes :

3- Bande de fréquence [0 10000] Hz.

4- Nombre de points d'échantillonnage égal à 1024 point.

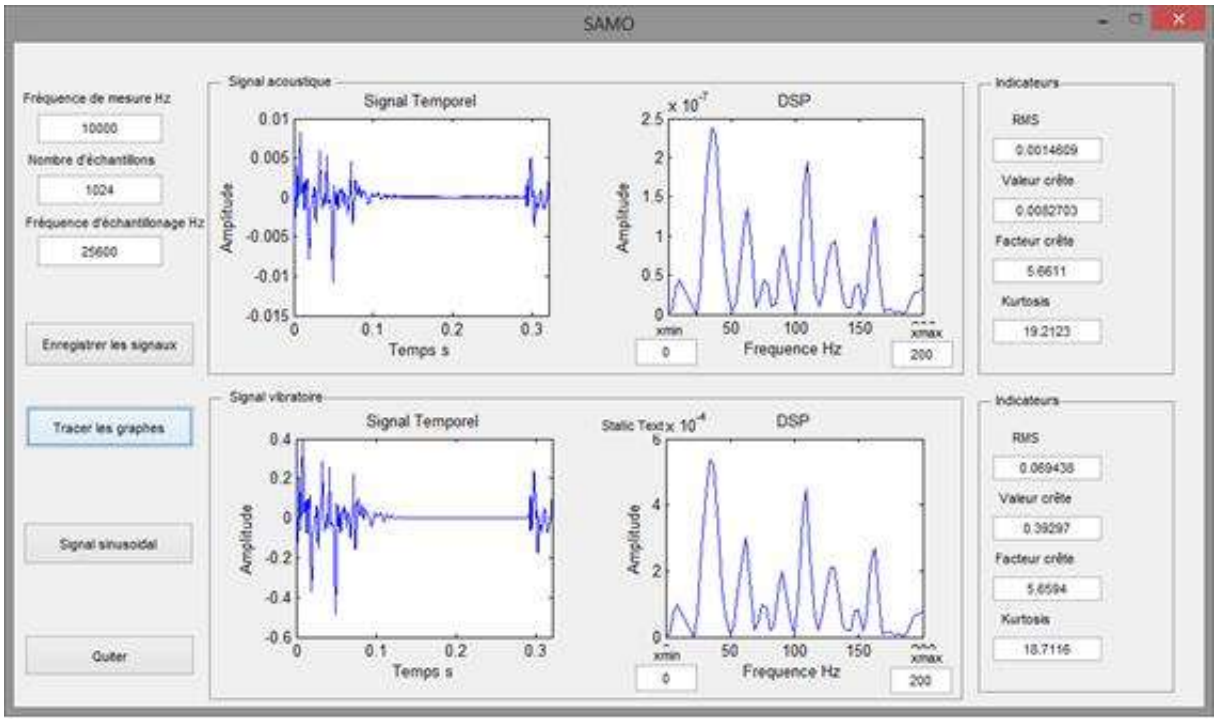


Figure 3.24- Marteau/bois 10000 Hz

La figure 3.25 montre que les valeurs de FC et kurtosis sont plus importantes par rapport les indicateurs rms et vc.

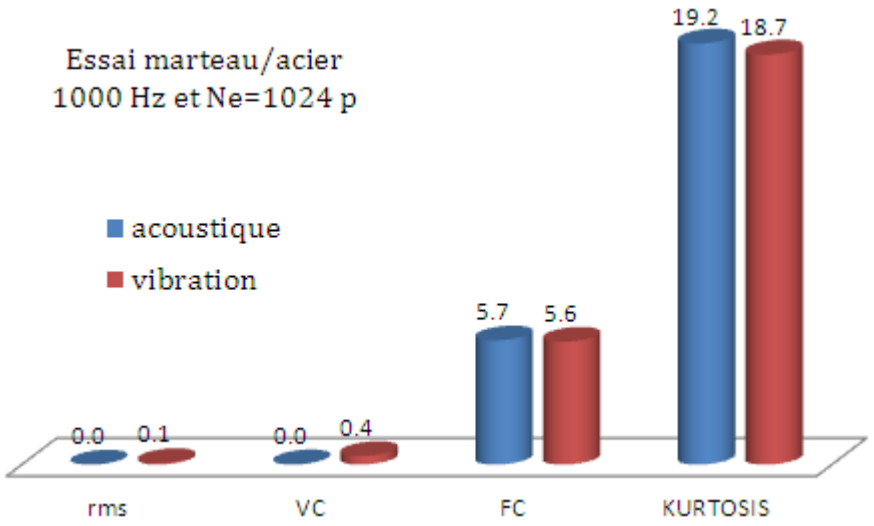


Figure 3.25- Comparaison entre les indicateurs statistiques des deux signaux (marteau/bois)

B/ Capteurs fixés sur le capot d'un véhicule (Année de circulation 2011).

Les figures 3.26, 3.27 et 4.28 montrent les résultats obtenus à partir de l'acquisition signaux vibratoires at acoustiques. Pour les deux signaux, on constate la présence des pics périodiquesdans les spectres fréquentiels. L'interprétation de ces derniers dépend de la connaissance de la structure et la chaine cinématiques du véhicule.

Cas n° 01:

Dans cet essai, les mesures ont été effectuées dans les conditions suivantes :

1- Bande de fréquence [0 500] Hz.
2- Nombre de points d'échantillonnage égal à 1024 point.

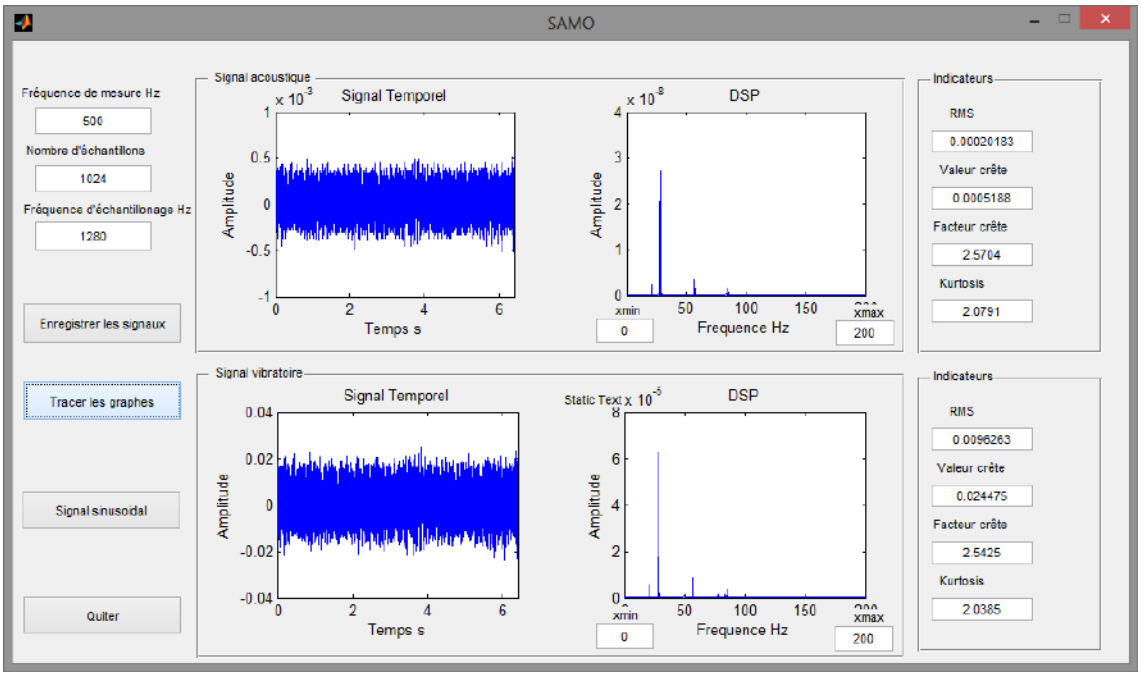


Figure 3.26- Véhicule, 500 Hz

Cas n° 02:

Dans cet essai, les mesures ont été effectuées dans les conditions suivantes :

1- Bande de fréquence [0 1000] Hz.

2- Nombre de points d'échantillonnage égal à 1024 point.

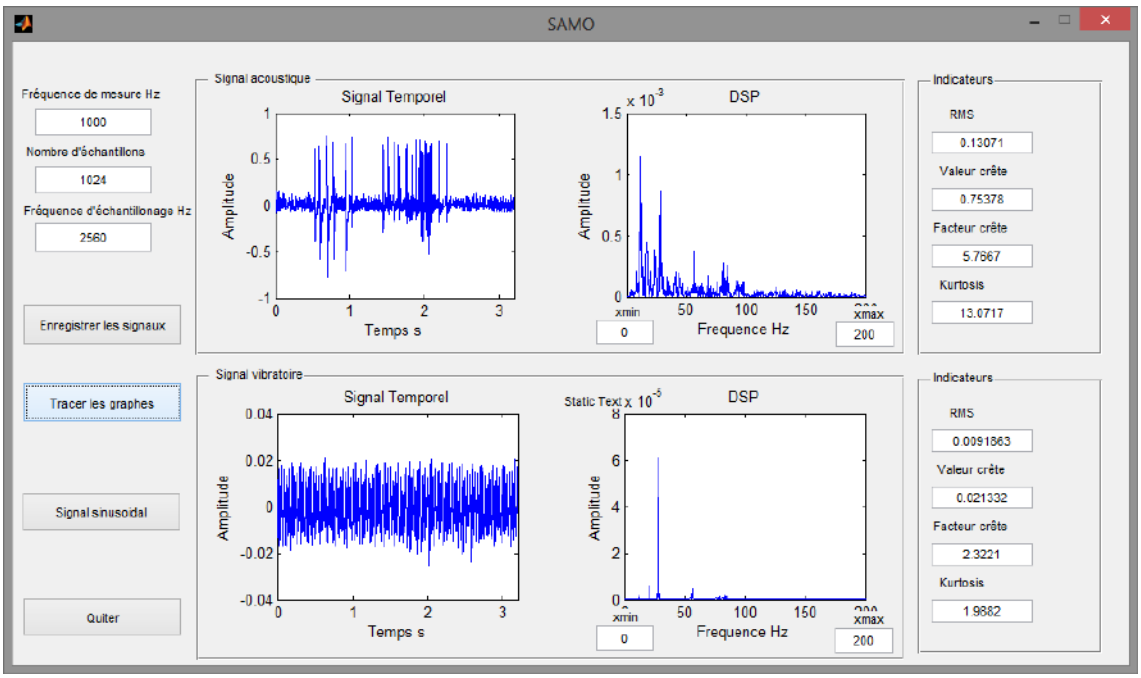


Figure 3.27- Véhicule, 1000 Hz

Cas n° 03:

Dans cet essai, les mesures ont été effectuées dans les conditions suivantes :

1- Bande de fréquence [0 10 000] Hz.

2- Nombre de points d'échantillonnage égal à 1024 point.

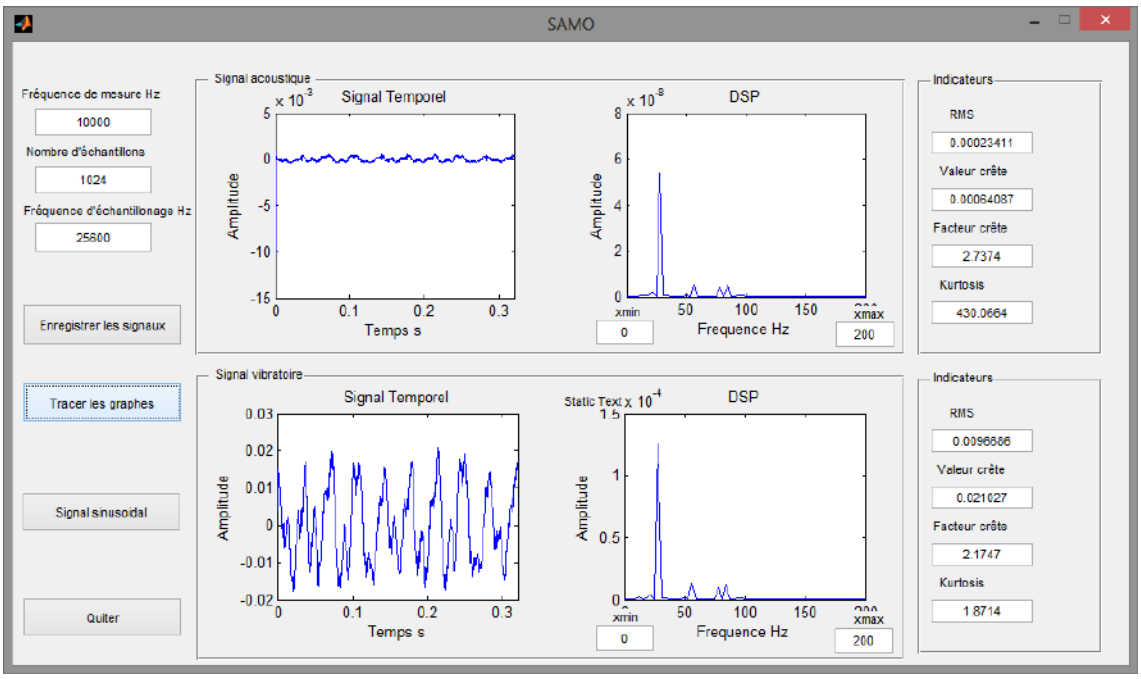


Figure 3.28- Véhicule, 10000 Hz

Indicateurs statistiques

La figure 3.29 montre que les rms des signaux vibratoires ont des valeurs convergentes. Par contre pour les signaux acoustiques, on constate une valeur importante pour la gamme de fréquence de 1000 Hz. Cette valeur est justifiée par la circulation d'autres véhicules qui passent près de véhicule sous test.

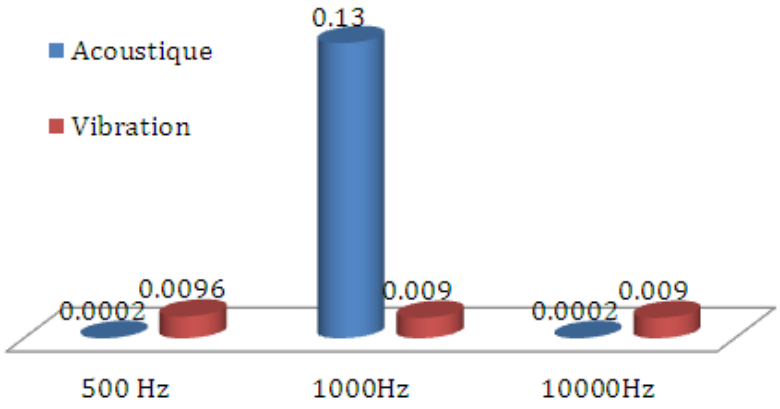


Figure 3.29 Evolution de rms en fonction la gamme de mesure

La figure 3.30.montre que l'indicateur valeur crête a un comportement identique avec celui de l'indicateur rms.

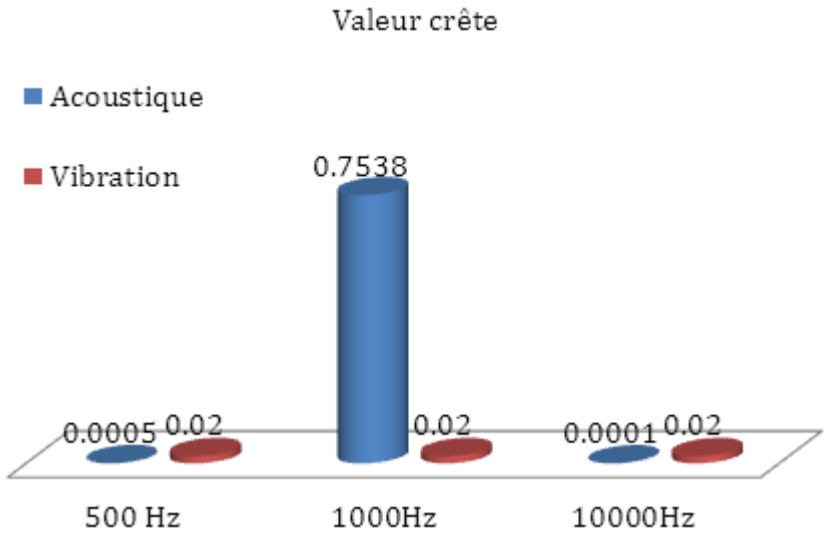


Figure 3.30. Evolution de la valeur crête en fonction la gamme de mesure

La figure 3.31.donne les mêmes indications que les indicateurs rms et valeur crête.

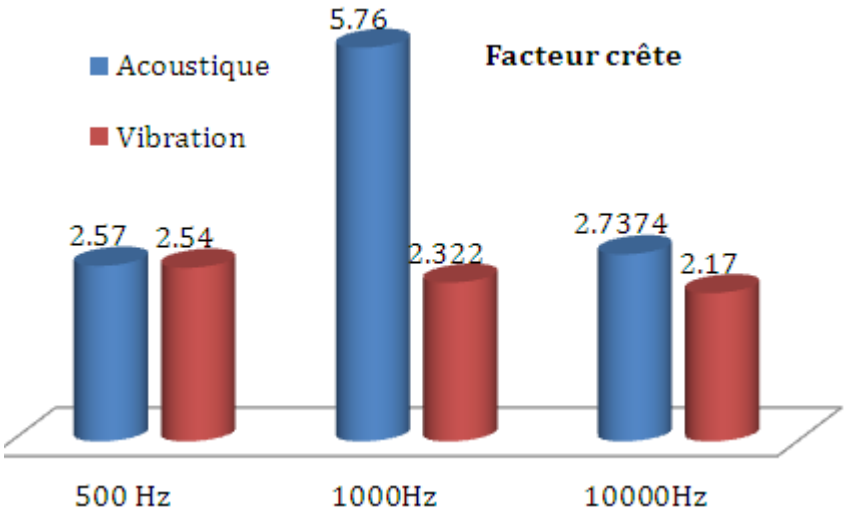


Figure.3.31 Evolution dufacteur crête en fonction la gamme de mesure

La figure 3.32.monte une augmentation dans la valeur du kurtosis du signal acoustique pour la gamme de mesure 10000HZ Ceci indique la présenced'influence à proximité à proximité du lieu d'expérimentation.

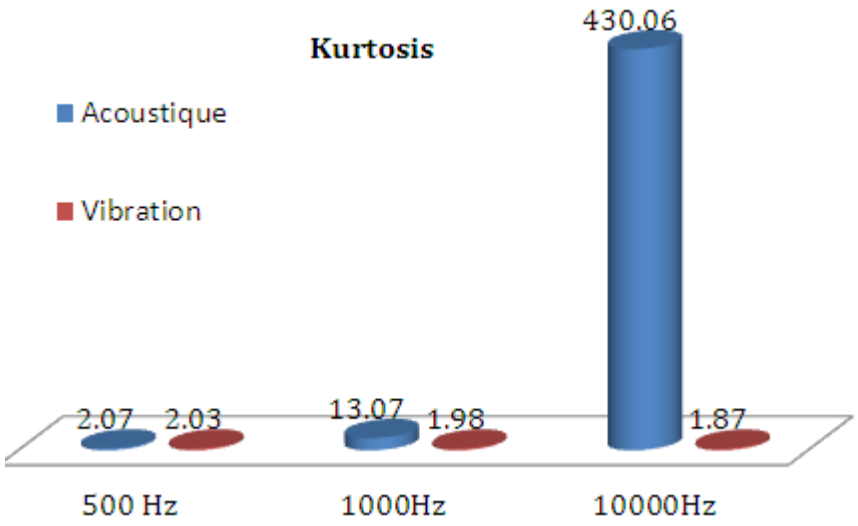


Figure 3.32 Evolution dukurtosis en fonction la gamme de mesure

Conclusion générale

Ce travail propose une chaîne d'acquisition et un programme pour l'acquisition et l'analyse des signaux acoustiques et vibratoires. L'analyse de ces signaux permet d'intervenir pour:

- Surveiller et suivre l'état d'un équipement par l'utilisation des indicateurs statistiques tels que: RMS, Valeur crête,…
- Localiser et identifier les causes des vibrations et d'acoustiques par l'utilisation des outils spécifiques tels que: Transformée de Fourier Rapide.

Dans le premier chapitre, une étude liée aux signaux acoustiques et vibratoires permet de comprendre le domaine et définir les problèmes. Il ressort de cette étude qu'il existe de nombreux outils pour l'analyse de ces signaux.

Dans le deuxième chapitre, une étude sur les chaînes d'acquisition et les capteurs est évoquée. L'étude montre que les éléments constitutifs d'une chaîne d'acquisition des signaux sont indispensables pour acquérir les signaux avec efficacité.

Dans le troisième chapitre, la chaîne d'acquisition réalisée et le programme développé sont présentés et décrit. La chaîne est constituée d'une carte sont d'un pc, d'un microphone électret et d'un accéléromètre. Les tests effectués par le système d'acquisition réalisé ont montré l'importance d'utilisation des deux capteurs ensemble où nous avons constaté que les vibrations sont toujours accompagnées du son.Ils montrent aussi que l'acquisition des sons est très influencée par l'effet de l'environnement qui entoure le microphone. Ils montrent aussi l'effet de la fréquence de mesure et du nombre des échantillons sur les résultats obtenus et particulièrement sur la résolution et le temps d'acquisition. La résolution augmente avec l'augmentation de la fréquence de mesure. Par contre le temps d'acquisition augmente avec la diminution de la fréquence de mesure.

Références

[1] Jérôme Antoni, MenadSidahmed, « Contrôle et diagnostic à partir des signaux acoustiques et vibratoires », Spécial congrès surveillance 5.

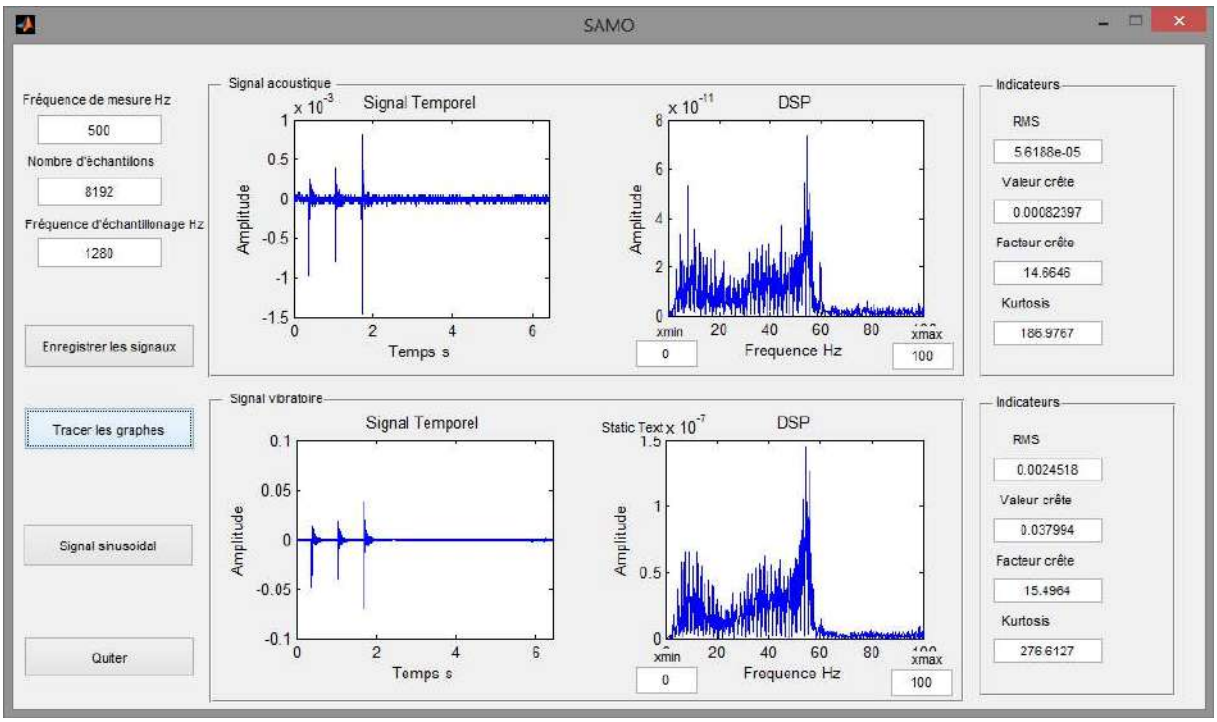
[2] F.Ollivier, « analyse des signaux aléatoires et identification des systèmes linéairesen vibrations et acoustique », Sorbonne Universités, 2014.

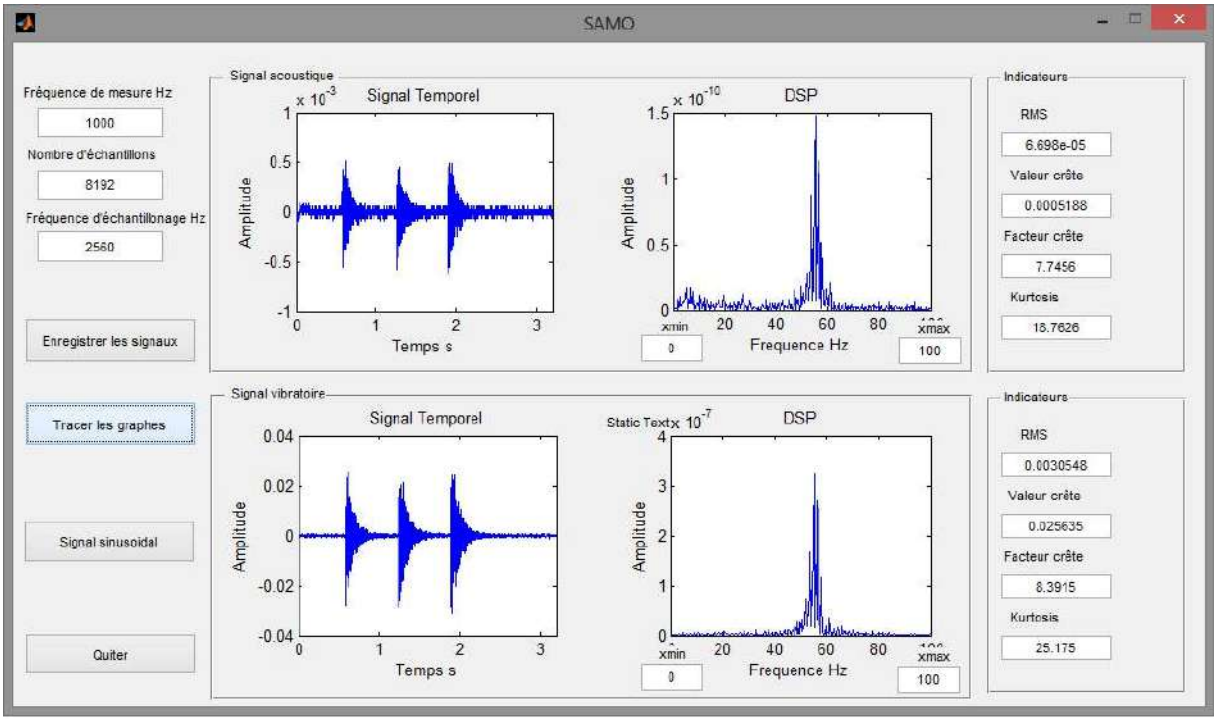
[3] David AUGEIX, « Analyse vibratoire des machinestournantes », techniques d'ingénieur, référence BM 5 145.

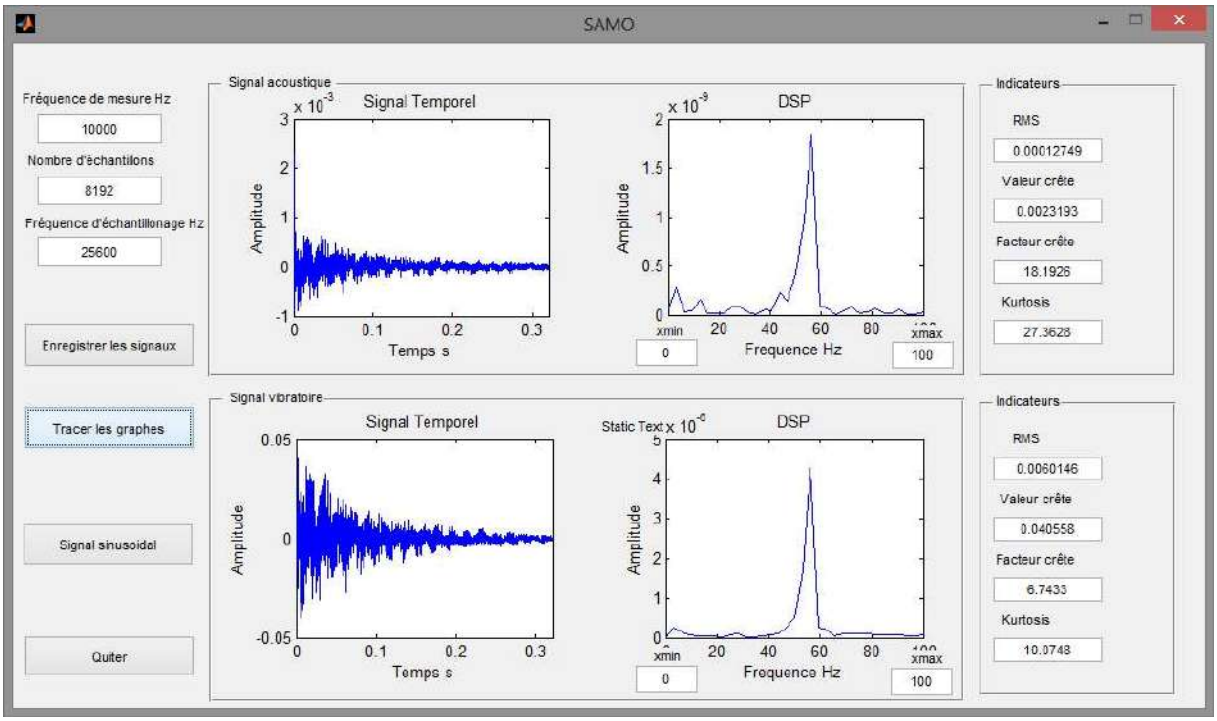
[4] Xavier vuylsteke , « cours d'acoustique et mécanique ondilatoire », 2013

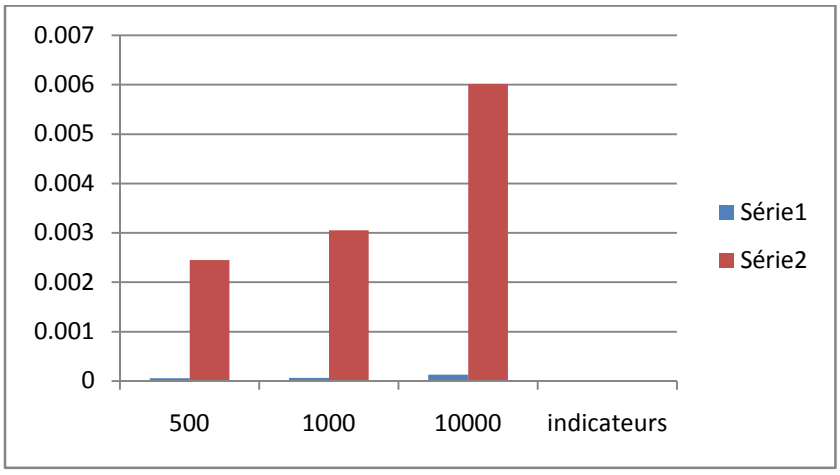
[5] Hélène HorsinMolinaro - EricVourc'h – Jean-Pierre Barbot, « Capteurs et chaîne d'acquisition », ENS, 2015.

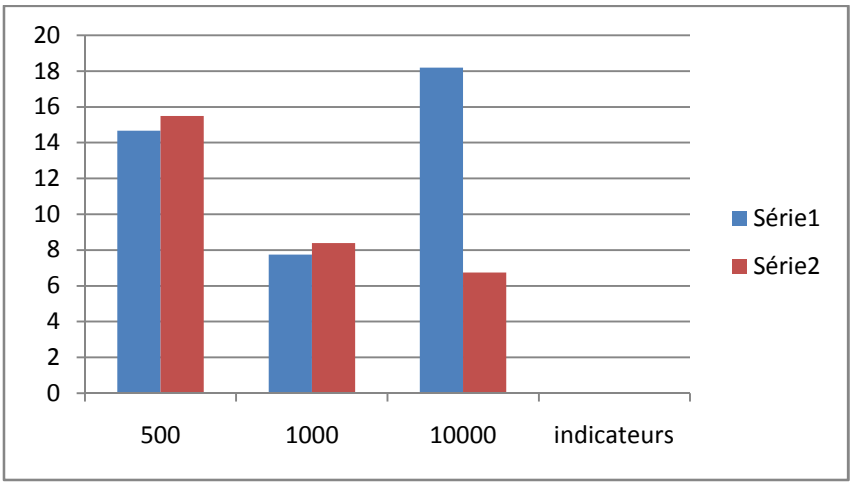
TEST : MARTAU/ pièce en ACIER



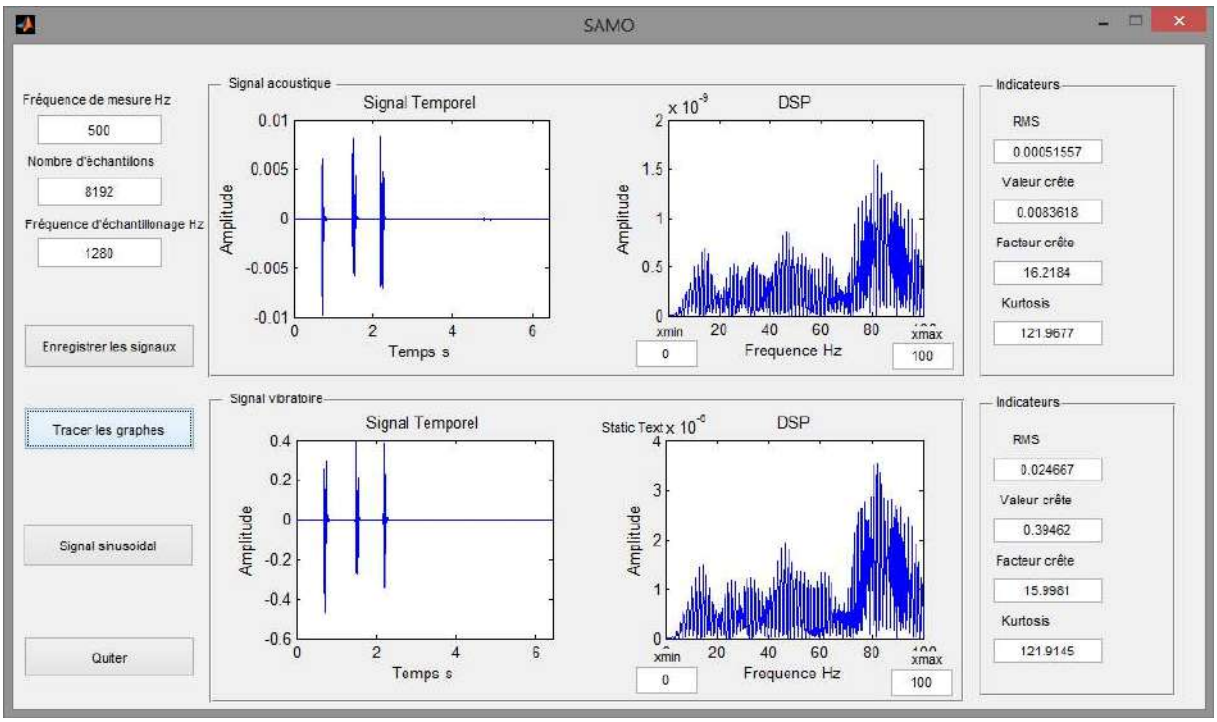


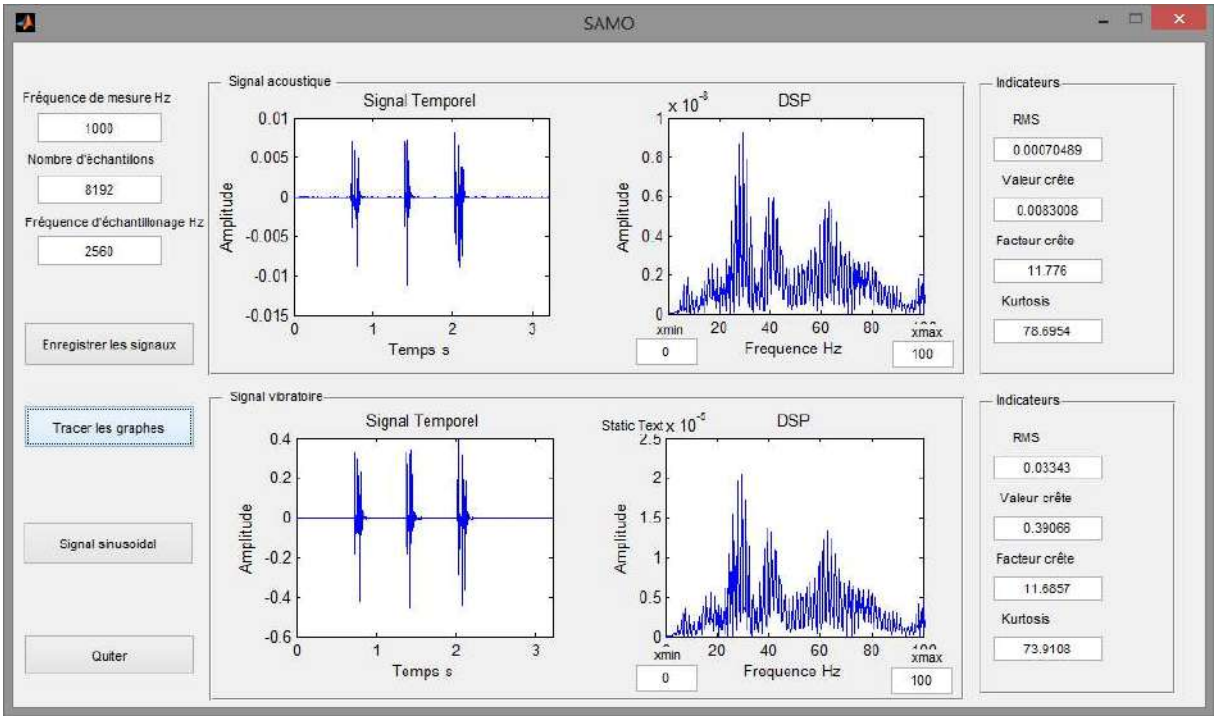

SAMO
Fréquence de mesure Hz
10000
Nombre d'échantillons
8192
Fréquence d'échantillonage Hz
25600
Enregistrer les signaux
Tracer les graphes
Signal sinusoidal
Quiter
Signal acoustique
Signal Temporel
DSP
Amplitude
Temps s
Frequence Hz
xmin
xmax
Indicateurs
RMS
0.00012749
Valeur crête
0.0023193
Facteur crête
18.1926
Kurtosis
27.3628
Signal vibratoire
Signal Temporel
DSP
Amplitude
Temps s
Frequence Hz
Indicateurs
RMS
0.0060146
Valeur crête
0.040558
Facteur crête
6.7433
Kurtosis
10.0748

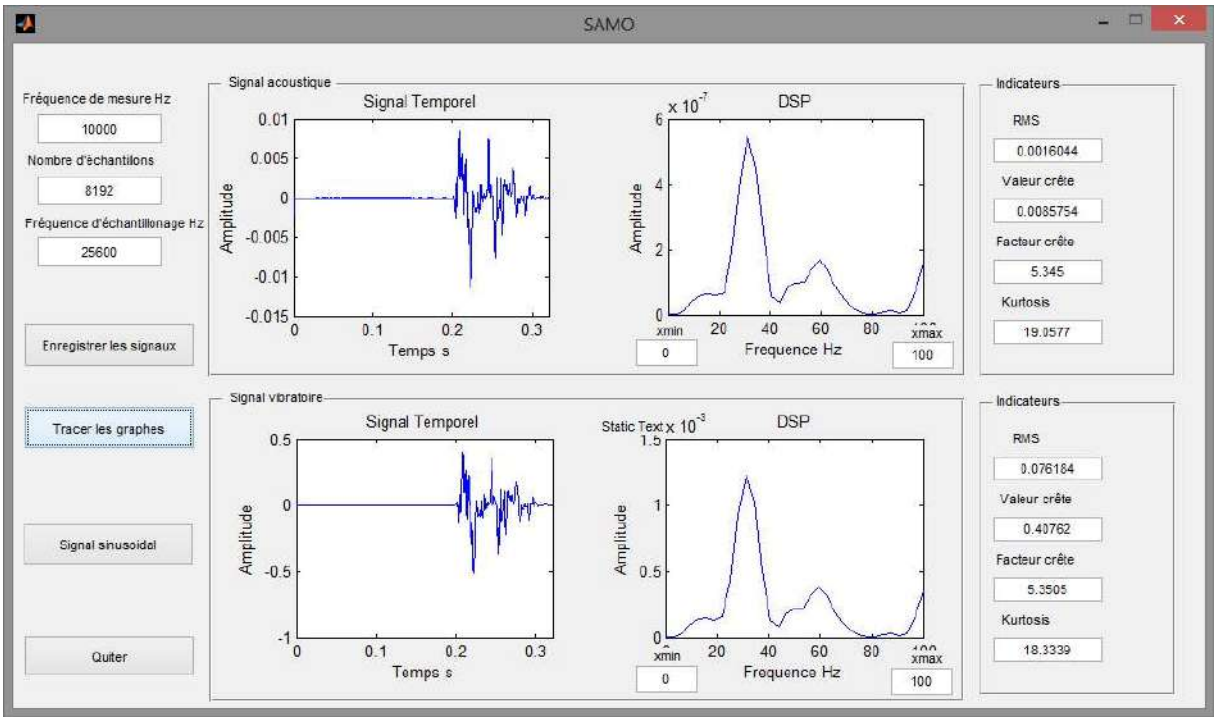

0.007
0.006
0.005
0.004
0.003
0.002
0.001
0
500
1000
10000
indicateurs
Série1
Série2

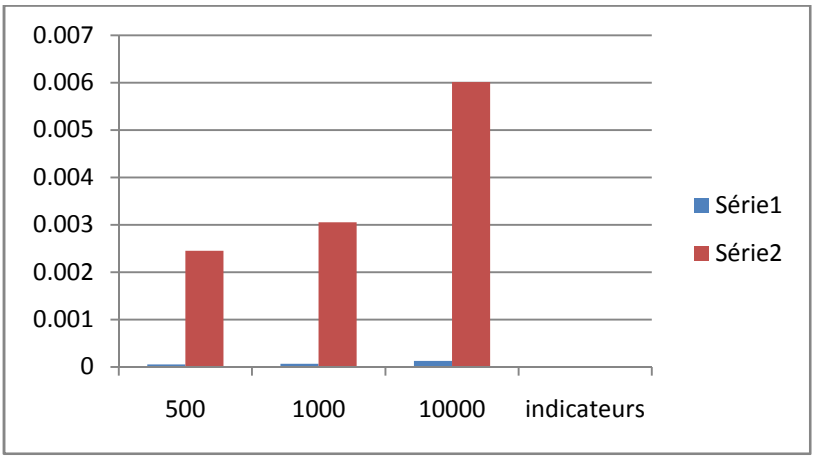

20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
500
1000
10000
indicateurs
Série1
Série2

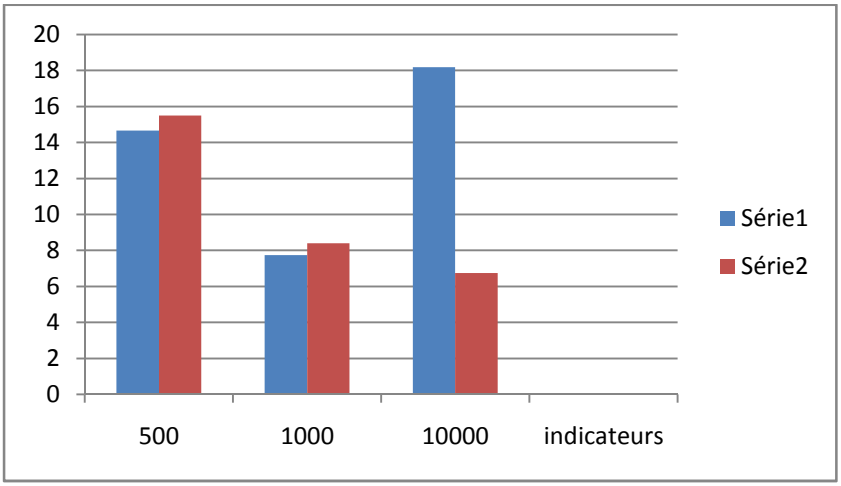
TEST : MARTAU/ pièce en BOIS



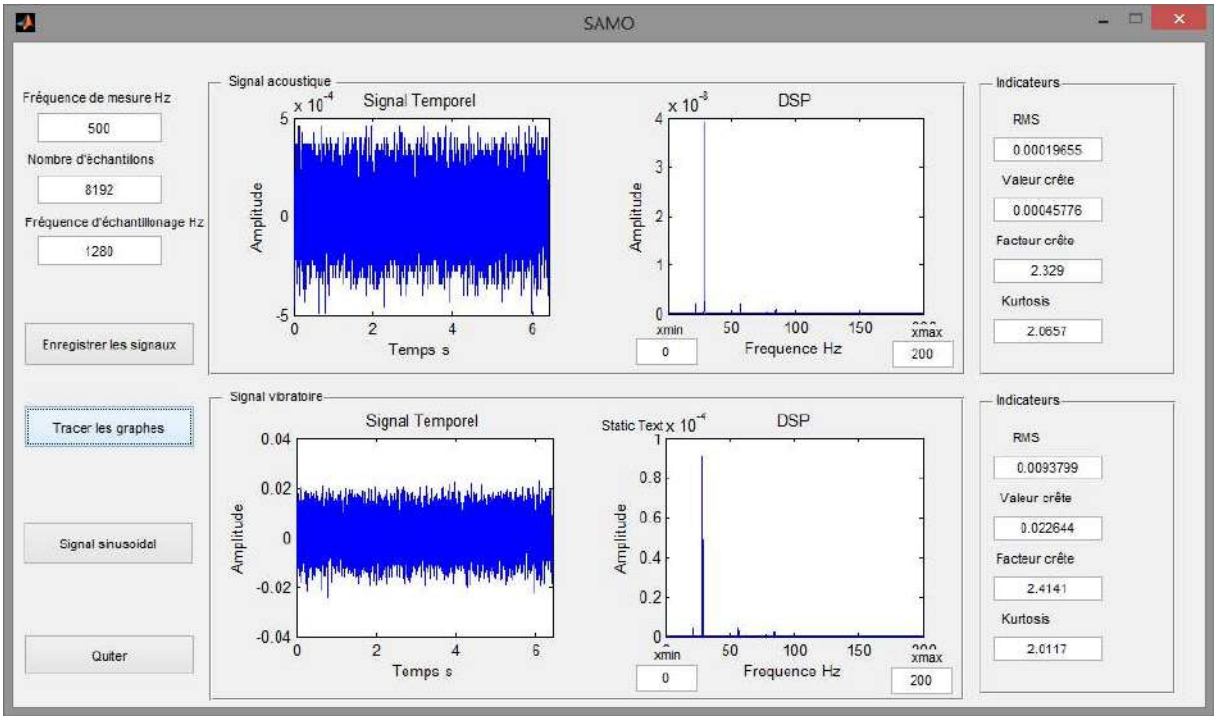


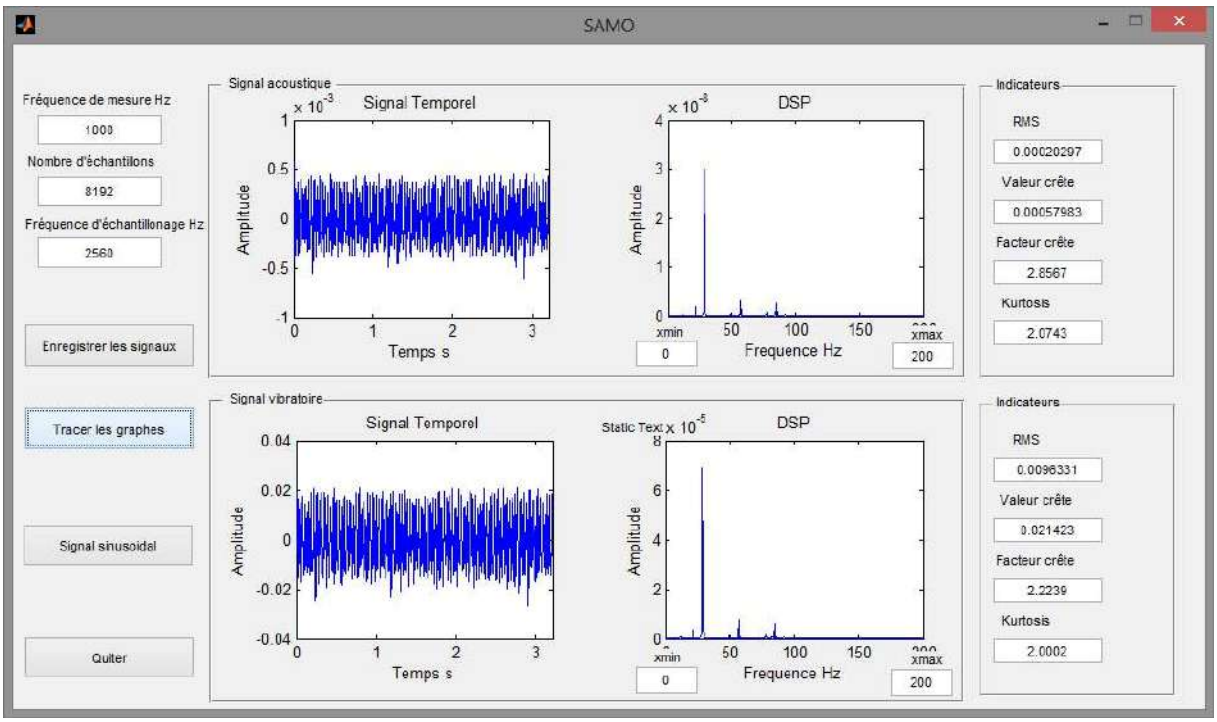

SAMO
Fréquence de mesure Hz
10000
Nombre d'échantillons
8192
Fréquence d'échantillonage Hz
25600
Enregistrer les signaux
Tracer les graphes
Signal sinusoidal
Quiter
Signal acoustique
Signal Temporel
Amplitude
Temps s
DSP
Frequence Hz
xmin
xmax
Indicateurs
RMS
0.0016044
Valeur crête
0.0085754
Facteur crête
5.345
Kurtosis
19.0577
Signal vibratoire
Signal Temporel
Amplitude
Temps s
DSP
Frequence Hz
RMS
0.076184
Valeur crête
0.40762
Facteur crête
5.3505
Kurtosis
18.3339

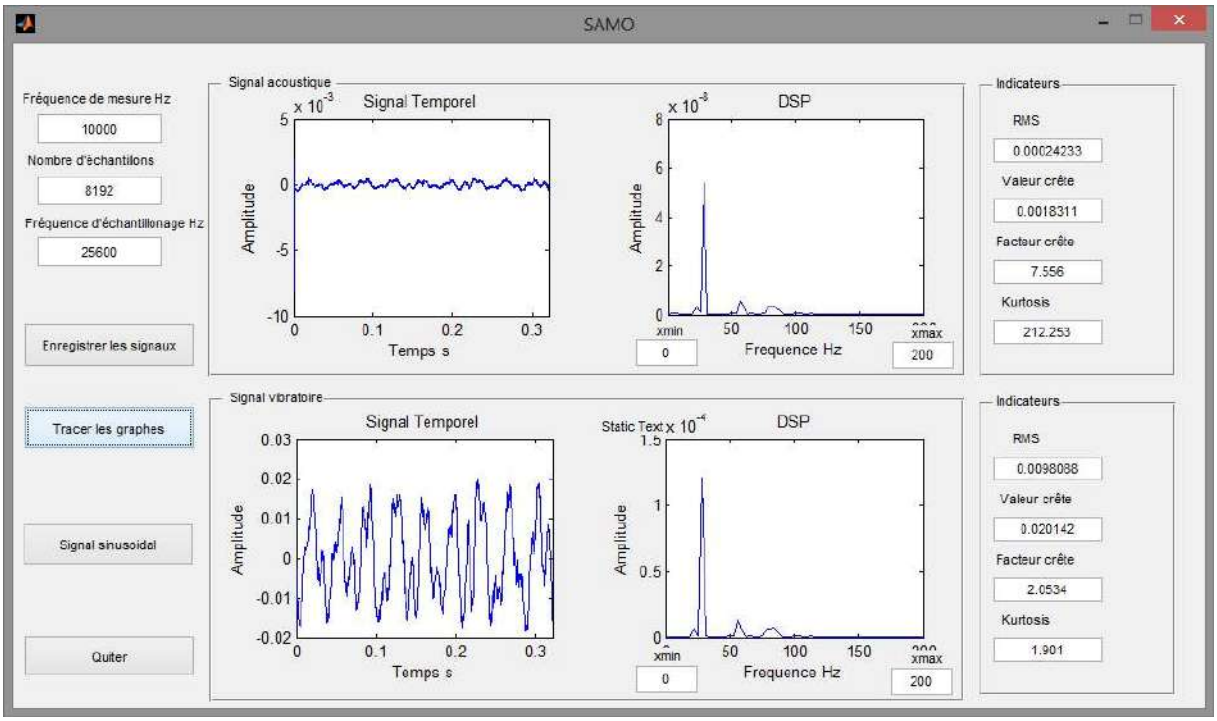

0.007
0.006
0.005
0.004
0.003
0.002
0.001
0
500
1000
10000
indicateurs
Série1
Série2

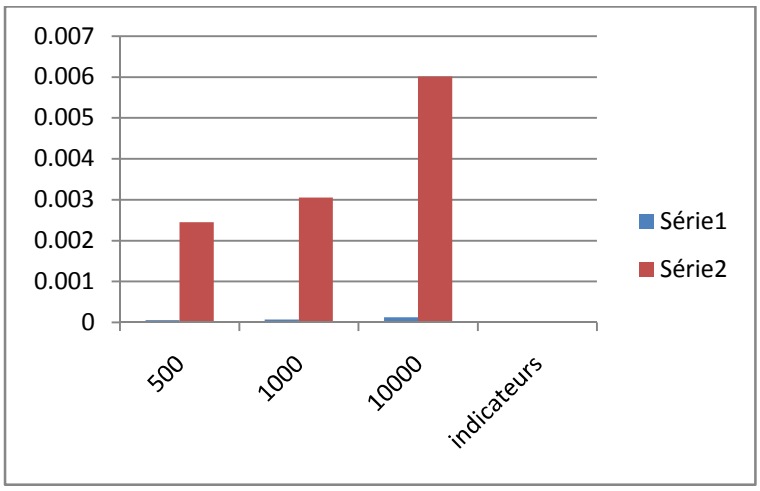

20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
500
1000
10000
indicateurs
Série1
Série2

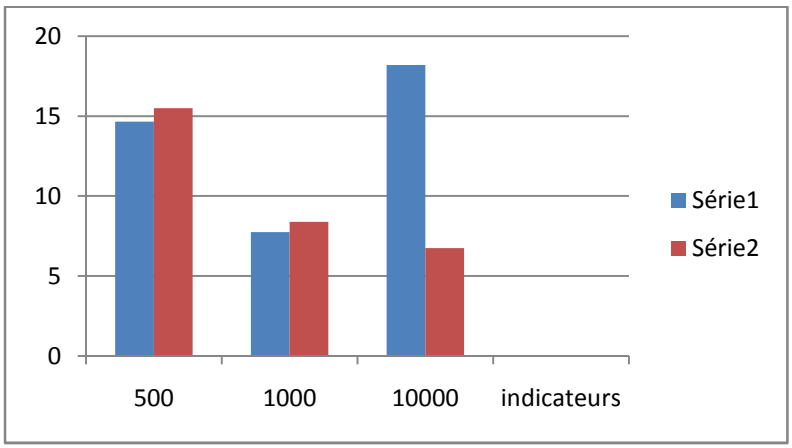
Test :Moteur d'un véhicule






SAMO
Fréquence de mesure Hz
10000
Nombre d'échantillons
8192
Fréquence d'échantillonage Hz
25600
Enregistrer les signaux
Tracer les graphes
Signal sinusoidal
Quiter
Signal acoustique
Signal Temporel
DSP
Amplitude
Temps s
Frequence Hz
xmin
xmax
Signal vibratoire
Static Text
Indicateurs
RMS
0.00024233
Valeur crête
0.0018311
Facteur crête
7.556
Kurtosis
212.253
0.0098088
0.020142
2.0534
1.901


0.007
0.006
0.005
0.004
0.003
0.002
0.001
0
500
1000
10000
indicateurs
Série1
Série2


20
15
10
5
0
500
1000
10000
indicateurs
Série1
Série2