

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun de Tiaret

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Mécanique



MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electromécanique

Spécialité : Maintenance Industrielle

Thème

**ÉTUDE ET REALISATION D'UNE MAQUETTE
DIDACTIQUE POUR ANALYSE VIBRATOIRE DES
MACHINES TOURNANTES EN MESURE SPECTRALE**

Préparé par :

AZZOUZ Aymen et **KHITER** Ahmed Mustapha

Soutenu publiquement le : .27 / 09 / 2020, devant le jury composé de :

M. BENAMAR B	Maître assistant "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Président
M. SAAD M	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M.SLIMANI H	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M. GUEMMOUR M.B	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Encadreur
M BEY M	Maître assistant "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Co-Encadreur

REMERCIEMENTS

On tient avant tout à remercier chaleureusement Messieurs **GUEMMOUR Mohamed Boutkhal**, Maître de conférences (B) et Dr **BEY Mohamed** de l'université Ibn-Khaldoun de Tiaret de nous avoir encadré et assuré le suivi de notre travail. En nous faisant confiance depuis le début de nos travaux, ils ont su diriger ce travail tout en nous laissant une complète autonomie. On les remercie non seulement pour la qualité de leur encadrement mais également pour l'inestimable qualité humaine dont ils ont toujours fait preuve.

On remercie tout autant Monsieur (*BENAMMAR, Badr MAA*) à l'université Ibn-Khaldoun de Tiaret pour avoir accepté de présider le jury de notre mémoire.

Nos sincères remerciements vont également à Messieurs (*SAAD mohamed MCB*) et (*SLIMANI H MCA*) à l'université Ibn-Khaldoun de Tiaret qui nous ont fait l'honneur d'être examinateur de notre mémoire, et qui ont consacré de leur précieux temps à l'examen et à l'évaluation de notre travail. On les remercie vivement pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail afin de l'expertiser avec une grande efficacité et une grande rapidité, ainsi que pour la patience et la pertinence dont ils ont fait preuve à la lecture de ce document.

Dédicaces

Rien n'est aussi beau à offrir que le fruit d'un labeur qu'on dédie du fond du cœur à ceux qu'on aime et qu'on remercie en exprimant la gratitude et la reconnaissance durant toute notre existence.

Je dédie ce modeste travail

A mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ma mère qui a été à mes côtés et m'a soutenu durant toute ma vie, et mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis, merci mes parents.

- ❖ *A toute ma famille*
- ❖ *A mes frères et sœur*
- ❖ *A mon binôme et sa famille*
- ❖ *A tous mes amis(es) sans exception*

Amen

Dédicaces

Je tiens à dédier ce modeste travail
A mes Parents, Merci pour tout leur amour et
leur soutien depuis toujours.

Ils m'ont donné toutes les chances pour réussir.

Qu'ils trouvent, dans la réalisation de ce
travail, la conséquence de leurs efforts ainsi que
l'expression de ma plus affectueuse gratitude.

A mes beaux frères et mes belles sœurs qui ont
toujours été présents pour moi,

Et mon binôme et sa famille.

Merci pour vos encouragements et votre
confiance.

Ainsi qu'à tous mes amis.

KHITER Ahmed Mustaph

Liste des figures

<i>Figure I.1.</i> Organismes de normalisation	4
<i>Figure I.2.</i> Différents types de maintenance	5
<i>Figure I.3.</i> Maintenance préventive	6
<i>Figure I.4.</i> Remplacement des roulements.....	7
<i>Figure I.5.</i> Evolution dans le temps de la maintenance préventive conditionnelle.....	7
<i>Figure I.6.</i> Impact des arrêts de production	8
<i>Figure I.7.</i> Exemple d'un système vibratoire.....	10
<i>Figure I.8.</i> Représentation des différentes amplitudes caractéristiques d'un signal	11
<i>Figure I.9.</i> Représentation des indicateurs temporels	13
<i>Figure I.10.</i> Représentation temporel et fréquentielle d'un même signal	14
<i>Figure I.11.</i> Spectre d'un Signal sinusoïdal	15
<i>Figure I.12.</i> Spectre d'un Signal composite.....	15
<i>Figure I.13.</i> Représentation en échelle linéaire et en échelle logarithmique de l'amplitude d'un signal vibratoire	16
<i>Figure I.14.</i> Concept de détection des défauts par analyse fréquentiel.....	20
<i>Figure II.1</i> Composant Arduino UNO	25
<i>Figure II.2.</i> Brochage de la carte ArduinoUNO	27
<i>Figure II.3.</i> Vue d'ensemble du logiciel Arduino	29
<i>Figure II.4.</i> Interface du logiciel Arduino.....	30
<i>Figure II.5.</i> Vue d'ensemble de l'espace de travail du logiciel Arduino	31
<i>Figure II.6.</i> Evolution d'un mesurande m et de la réponse s correspondante du capteur	31
<i>Figure II.7.</i> Principe de foction d'un capteur.....	32
<i>Figure II.8.</i> Chaînes de mesure	33
<i>Figure II.9.</i> ADXL335	33
<i>Figure II.10.</i> Diagramme électrique de capteur	34
<i>Figure II.11.</i> MEMS accéléromètre	35
<i>Figure II.12.</i> Position de capteur et valeurs normalisées	36
<i>Figure II.13.</i> Tension de sortie de l'axe x pour l'accélération = $0g$	37
<i>Figure II.14.</i> Sensibilité de capteur.....	37
<i>Figure III.1.</i> Schéma de montage de l'appareil	40
<i>Figure III.2.</i> Montage de l'appareil « réel »	40
<i>Figure III.3.</i> Interface du programme	31
<i>Figure III.4.</i> Accélération.	45
<i>Figure III.5.</i> Spectre fréquentiel de l'accélération.....	45

Figure III.6. Mixeur	46
Figure III.7. Accélération d'un petit mixeur	46
Figure III.8. Spectre fréquentiel de l'accélération d'un mixeur	47
Figure III.9. Modèle de ventilateur (120 x 120 x 38mm) choisi pour l'étude de cas	48
Figure III.10. Maquette constitué d'un ventilateur.....	49
Figure III.11. Accélération d'un ventilateur suivant « X »	49
Figure III.12. Spectre fréquentiel de l'accélération d'un ventilateur suivant « X »	50
Figure III.13. Accélération d'un ventilateur suivant « Y »	50
Figure III.14. Spectre fréquentiel de l'accélération d'un ventilateur suivant « Y »	51
Figure III.15. Accélération d'un ventilateur suivant « Z ».....	51
Figure III.16. Spectre fréquentiel de l'accélération d'un ventilateur suivant « Z »	52

Liste des tableaux

Tableau I.1. Tableau des paramètres permettant de détecter un défaut	12
Tableau III.1. Caractéristiques techniques du ventilateur	48

SOMMAIRE

Introduction générale	2
------------------------------------	---

<i>Chapitre I : Généralités sur la maintenance.</i>

I.1. Introduction.....	5
I.2. Définition de la maintenance	5
I.3. Différents types de maintenances	6
I.3.1. Maintenance corrective.....	6
I.3.2. Maintenance préventive.....	7
I.3.2.1. Maintenance préventive systématique.....	7
I.3.2.2. Maintenance préventive conditionnelle.....	8
I.4. Application de la maintenance Prédicative	9
I.4.1. Méthodes de la maintenance prédictive.....	9
I.4.1.1. Mesure acoustique	9
I.4.1.2. Thermographie.....	9
I.4.1.3. Analyse vibratoire.....	10
I.5. Objectifs de la maintenance.....	10
I.6. Vibrations	10
I.6.1. Caractéristique des vibrations.....	11
I.6.1.1. Fréquence.....	11
I.6.1.2. Amplitude	11
I.6.2. Vibrations et la maintenance	12
I.7. Rôle d'analyse vibratoire dans la maintenance	12
I.8. Types d'analyse vibratoire.....	13
I.8.1. Méthodes temporelles (Les valeurs classiques).....	13
I.8.2. Méthodes fréquentielles.....	14
I.8.3. Analyse spectrale	14
I.8.3.1. Définition d'un spectre	15
I.8.3.2. Représentation graphique d'un spectre.....	15
I.8.3.3. Détection par l'analyse spectrale des principales anomalies	16
I.8.3.4. Acquisition du signal temporel	19
I.9. Conclusion	20

Chapitre II : Méthodologie.

II.1. Introduction	22
II.2. Définition de module Arduino	22
II.3. Gammes de la carte Arduino	23
II.4. Présentation de la carte Arduino	23
II.4.1. Constitution de la carte Arduino UNO	24
II.4.2. Alimentation.....	24
II.4.3. Bénéfiques et avantages de la carte Arduino UNO	25
II.4.4. Branchage de la carte Arduino UNO	26
II.4.4.1. Broches d'alimentation	26
II.4.4.2. Entrées et sorties numériques	27
II.4.4.3. Communication Série	27
II.4.4.4. Interruptions Externes	27
II.4.4.5. Impulsion PWM (largeur d'impulsion modulée).....	27
II.4.4.6. SPI (Interface Série Périphérique).....	27
II.4.4.7. I2C	27
II.4.4.8. LED	28
II.5. Partie software (Logiciel).....	28
II.6. Présentation du capteur	30
II.6.1. Généralités.....	30
II.6.2. Caractéristiques de capteur.....	30
II.6.3. Chaîne de mesure	31
II.6.4. Capteur d'accélération ADXL335.....	31
II.6.4.1. Description	31
II.6.4.2. Composant de capteur	32
II.6.4.3. Principe de fonctionnement.....	32
II.6.4.4. Positionnement du capteur	33
II.6.4.5. Etalonnage du capteur	33
II.6.4.6. Conversion analogique/ digitale	34
II.6.4.7. Erreur de l'offset	34
II.6.4.8. Sensibilité du capteur	35
II.9. Conclusion.....	35

<i>Chapitre III : Réalisation de projet.</i>
--

III.1. Introduction.....	37
III.2. Conception du projet.....	37
III.2.1. Partie Hardware.....	37
III.2.2. Partie software.....	40
III.2.2.1 Interface graphique utilisateur	40
III.2.2.2 Calcul et affichage des résultats.....	41
III.5. Test de l'appareil.....	43
III.6. Résultats obtenus.....	45
III.8. Conclusion	47
Conclusion générale	50
Références bibliographiques	52

Introduction générale

Le but d'une surveillance moderne de l'état des machines (CMS Condition Monitoring System) est d'effectuer un entretien ou une réparation en fonction des besoins et de minimiser les temps de réparation et d'immobilisation d'une machine. Cela permet d'augmenter le taux de rendement synthétique (OEE Overall Equipment Effectiveness) et d'optimiser la structure des coûts. Lorsque les symptômes des défaillances ne sont pas facilement détectés par la perception humaine, des techniques de maintenance prédictive sont utilisées sur des machines afin de pouvoir envisager une réparation ou une intervention de maintenance. Ainsi, les défaillances seront détectées d'une manière précoce bien avant le stade de leur apparition. Cette détection précoce est du ressort de la maintenance prédictive qu'est principalement une maintenance préventive conditionnelle. Cette dernière garantit la surveillance des conditions mécaniques, l'efficacité de l'équipement et bien d'autres paramètres et tente d'entirer le temps approximatif de l'apparition d'une défaillance et offre une assistance au diagnostic exact des défauts. Dans plusieurs cas, il est possible d'estimer le degré de sévérité des défauts détectés. Cependant, les techniques de maintenance préventive conditionnelle utilisées dépendent principalement du type d'équipements installés et de leur impact sur la production, ou bien d'un certain nombre de paramètres clé convenablement choisis.

Parmi les techniques de détection des défaillances, il y a l'analyse vibratoire. Cette dernière est utilisée pour déterminer les conditions opérationnelles des équipements, car elle permet d'identifier l'évolution des anomalies avant qu'elles ne deviennent dangereuses et causent des arrêts non programmés. L'analyse vibratoire est principalement pratiquée sur machines tournantes tels que les turbo-alternateurs, les turbopompes, les motopompes, les compresseurs, les laminoires, les machines-outils, mais aussi sur les machines alternatives tels que les moteurs Diesel et les compresseurs volumétriques. La nature et l'amplitude des vibrations générées par une machine ou par des pièces de machines permettent une bonne évaluation de leur état mécanique. Cela peut être fait en menant un suivi régulier des vibrations de machines soit en continue ou à intervalle planifié en utilisant un système de mesure et d'analyse vibratoire. Pour ce faire, les vibrations sont détectées à travers un système de mesure et d'analyse vibratoire assurée par les fonctions suivantes : Chaîne d'acquisition, traitement du signal, l'affichage des mesures et stockage des informations.

Cependant, il faut savoir que cet équipement peut coûter relativement cher. A notre niveau, le besoin de mener des travaux pratiques en vibrations mécaniques, nécessite l'existence et la disponibilité d'un équipement ou d'un matériel dédié pour l'acquisition de données. Comme solution alternative à moindre coût, on peut toujours procéder à une acquisition de données en utilisant un accéléromètre et un microcontrôleur à bas prix.

Le présent travail s'intègre dans un contexte didactique et pédagogique, en relation avec l'instrumentation et mesures et plus particulièrement celui de la détection et mesures des vibrations mécaniques.

En ce qui concerne le problème posé, notre mémoire traite la conception et la réalisation d'un support didactique destiné à la mesure des vibrations mécaniques basé sur une plate-forme Arduino et un accéléromètre MEMS afin d'effectuer une analyse vibratoire fréquentielle des machines tournantes. L'élément important du projet est l'accéléromètre GY-61 ADXL335 à trois axes interfacé avec carte open source type Arduino.

Les objectifs visés par notre projet sont premièrement l'étude et concept de l'analyse vibratoire et son importance dans la maintenance des machines électriques, deuxièmement concevoir et mettre en œuvre le système de mesure des vibrations avec l'aspect fréquentielle pour détecter les défauts dans les machines électriques en utilisant la mise en œuvre Arduino et troisièmement programmation d'une interface simple sous environnement Matlab.

Pour ce faire, notre mémoire a été divisé en trois chapitres. Chaque chapitre développe les détails de ce projet. Le premier chapitre présente le contexte et les différents concepts de la maintenance prédictive, le deuxième chapitre est consacré à la chaîne d'acquisition à la base de la plateforme Arduino et L'ADXL335 est un triple axe accéléromètre à base de la technologie "MEMS". Au troisième chapitre se trouve la conception générale de notre maquette didactique ainsi que les résultats. Enfin on conclut l'ensemble du projet avec certaines recommandations pour que plus d'améliorations puissent être apportées par la suite.

Chapitre I

La maintenance prédictive

I.1. INTRODUCTION

La plupart des machines en bon état vibrent peu. Lorsque la condition de la machine se détériore, les vibrations augmentent. Si l'augmentation des vibrations permet de détecter un défaut, l'analyse des caractéristiques vibratoires de la machine permet d'en identifier la cause. La mesure et la surveillance de la vibration produite par une machine s'avère un excellent indicateur de son état. Ce chapitre sera consacré spécialement sur la notion de la maintenance des machines et l'importance de l'analyse des vibrations pour la détection des défauts.

I.2. DEFINITION DE LA MAINTENANCE

La norme NF X60-010 définit la maintenance comme « l'ensemble des actions permettant de **maintenir** ou de **rétablir** un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé». Dans une entreprise, maintenir, c'est donc effectuer des opérations (dépannage, réparation, graissage, contrôle, etc.) qui permettent de conserver le potentiel du matériel pour assurer la production avec efficacité et qualité [4].

- **Maintenir** : contient la notion de prévention sur un système en fonctionnement.
- **Rétablir** : contient la notion de correction consécutive à une perte de fonction.

AFNOR faisant partie du CEN, les définitions AFNOR seront supplantées par les définitions CEN lorsque les normes « projet » deviendront définitives, Il n'existe pas actuellement de normes internationales ISO relatives à la fonction maintenance, on peut bien reprendre avec la figure I.1 suivante :

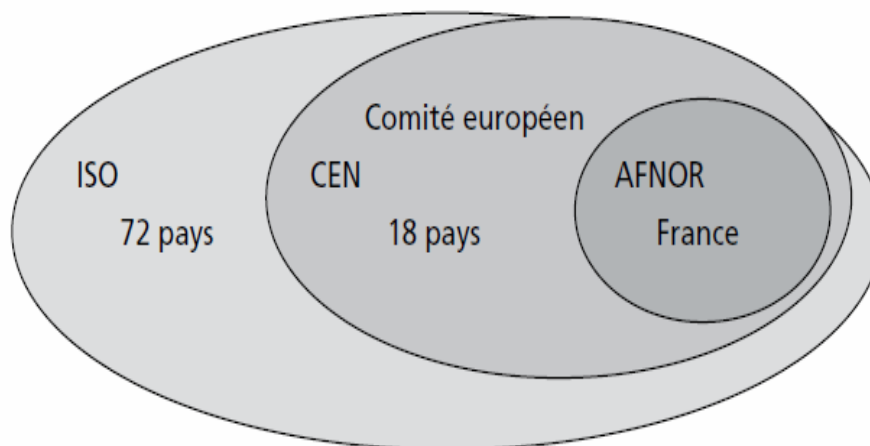


Figure I.1. Organismes de normalisation

I.3. DIFFERENTS TYPES DE MAINTENANCES [4]

La figure I.2 ci-dessous montre les deux principaux types de la maintenance :

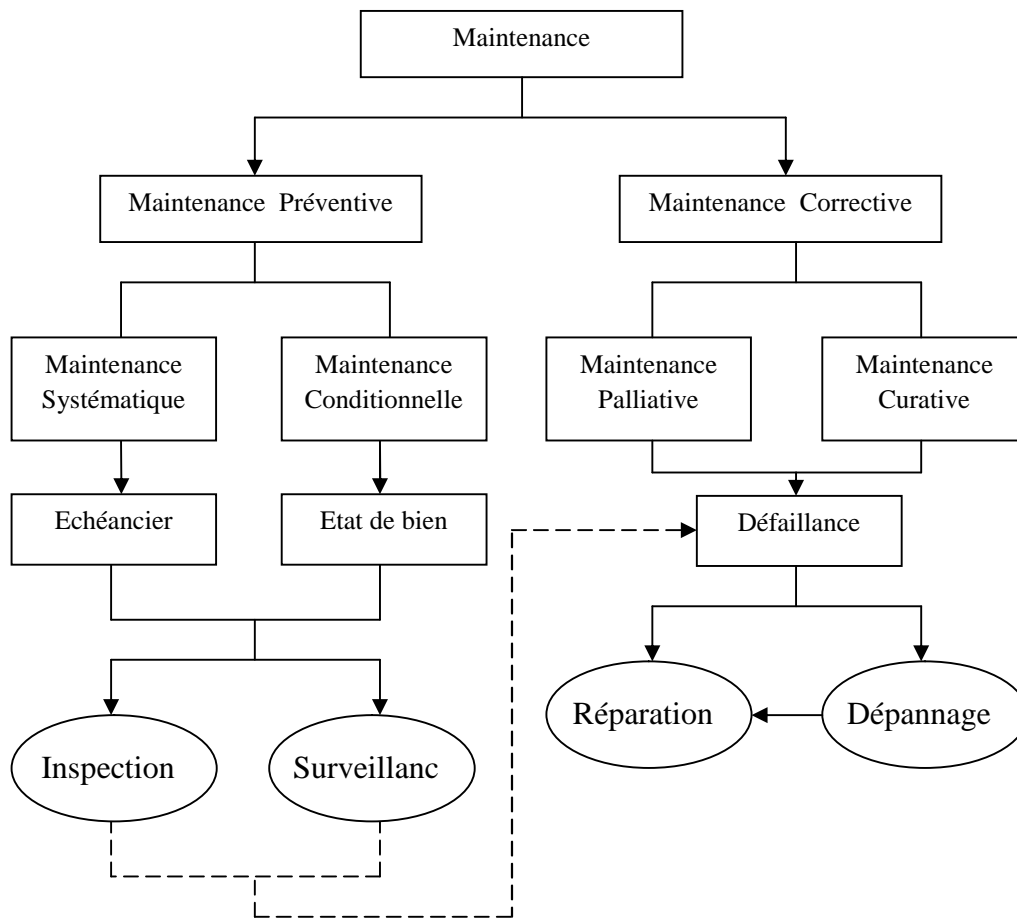


Figure I.2. Différents types de maintenance.

I.3.1. Maintenance corrective

Elle est appelée aussi maintenance fortuite, accidentelle ou curative. L'opération de maintenance intervient après la défaillance. C'est l'attitude qui consiste à attendre la panne pour procéder à une intervention. Elle peut se décomposer en deux branches : la maintenance palliative et la maintenance curative.

- Maintenance palliative : l'action de dépannage permet de remettre provisoirement le matériel à un niveau de performance acceptable mais inférieure au niveau optimal.
- Maintenance curative : l'intervention qui suit la défaillance permet le rétablissement du niveau de performance optimal du matériel.

I.3.2. Maintenance préventive

Une maintenance subordonnée à l'analyse de l'évolution surveillée des paramètres significatifs de la dégradation du bien, permettant de retarder et planifier les interventions. Il existe deux autres types :



Figure I.3. Maintenance préventive.

I.3.2.1. Maintenance préventive systématique

En maintenance systématique, la visite des équipements est dictée par des données statistiques à intervalles réguliers et fixe. Les éléments constitutifs est équipements étant renouvelés avant l'épuisement total de leurs vie utile. L'intervention est provoquée avant l'avarie. Les avantages se présentent sous la forme :

- D'une meilleure gestion des coûts et des arrêts ; les arrêts sont programmés en accord avec les utilisateurs.
- D'une meilleur connaissance du comportement des équipements ; suivi des interventions et l'analyse des défaillances.
- D'une réduction du correctif résiduel. Les inconvénients se situent à deux niveaux : - Le cout des opérations est élevé.
- Le taux de défaillance de l'équipement n'est pas toujours amélioré par le remplacement périodique de composants.

La **figure I.4** ci-dessous montre la limite de la maintenance préventive systématique appliquée à un roulement [4] :

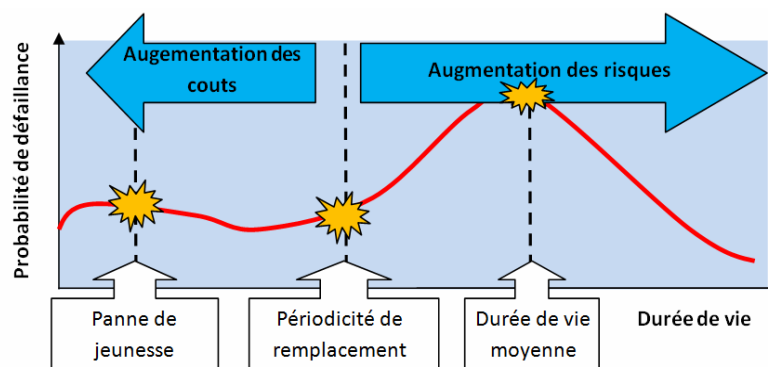


Figure I.4. Remplacement des roulements

I.3.2.2. Maintenance préventive conditionnelle

La maintenance conditionnelle dite aussi prédictive, elle est subordonnée à un type d'événement prédéterminé par un autodiagnostic, une information d'un capteur, d'une mesure d'une usure ou un autre outil révélateur de l'état de dégradation actuel et de prématuré du bien. La pratique de ce type de maintenance consiste à ne pas changer l'élément que lorsque celui-ci présente des signes de vieillissement ou d'usure mettant en cause à brève échéance ses performances et comporte trois phases :

- La détection du défaut qui se développe.
- L'établissement d'un diagnostic.
- L'analyse de la tendance.

On peut disséminer l'avantage de cette maintenance sur la **figure I.5** ci-dessous [4]:

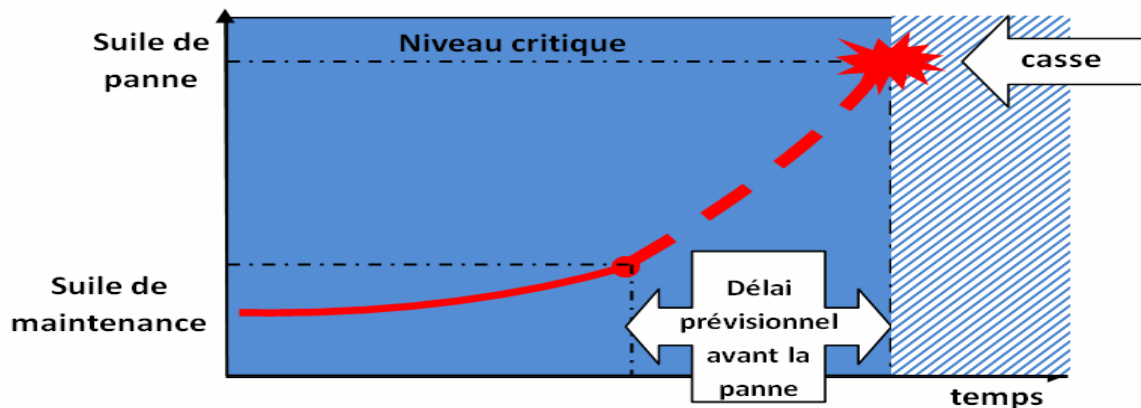


Figure I.5. Evolution dans le temps de la maintenance préventive conditionnelle.

L'efficacité d'une maintenance conditionnelle est subordonnée à l'efficacité et à la fiabilité des paramètres de mesure qui la caractérisent. Elle sera donc réservée aux matériels dont l'évolution d'éventuels défauts est facilement détectable et mesurable [4].

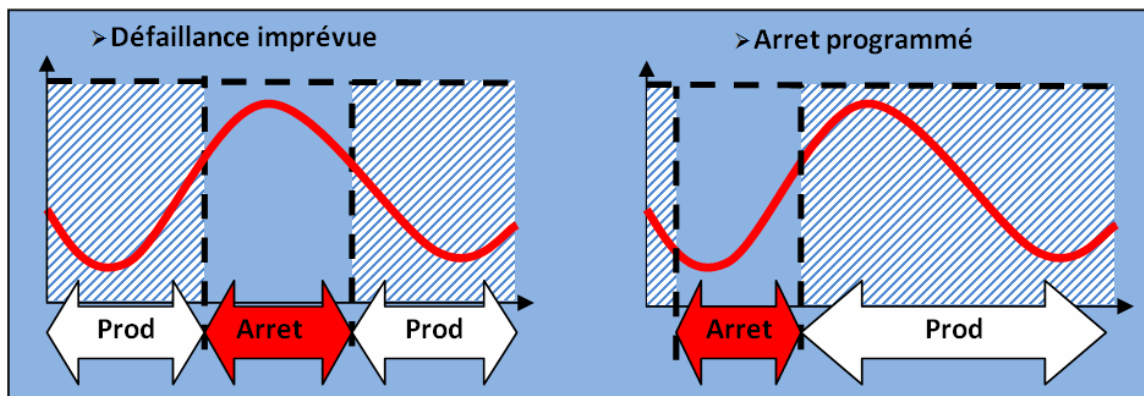


Figure I.6. Impact des arrêts de production

Le bon choix du type de maintenance devra toujours résulter d'un compromis financier et technique qui nécessite la recherche de plus de fiabilité possible au meilleur coût. Alors il faut quantifier en permanence les charges de la maintenance et n'appliquée la maintenance conditionnelle que lorsque son avantage est supérieure au coût de la maintenance systématique ou corrective. L'avantage de cette maintenance peut se produire dans **figure I.5**.

I.4. APPLICATION DE LA MAINTENANCE PREDICTIVE

La maintenance prédictive est définie selon la norme **NF EN 13306 X 60-319** comme une « maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien » [5]. Elle passe par l'évaluation de l'état des équipements pour détecter les signes de pannes et anticiper ces dernières. En somme, elle permet de surveiller l'usure des composants des machines qui pourrait ensuite les endommager. L'objectif final de la maintenance prédictive est double : réduire la fréquence des pannes des machines et, en conséquence, diminuer la fréquence des interventions de réparation.

I.4.1. Méthodes de la maintenance prédictive

Pour une maintenance prédictive optimale, il est possible de combiner différentes méthodes afin d'obtenir de meilleurs résultats. Nous vous présentons trois méthodes de maintenance.

I.4.1.1 Mesure acoustique

Cette méthode a recours aux ultrasons pour évaluer l'état des machines industrielles. L'écoute des ultrasons émis par les équipements en fonctionnement aide à détecter [5]:

- Le défaut mécanique ;
- La fuite, un défaut d'étanchéité ;
- Le problème électrique,

I.4.1.2. Thermographie

La thermographie surveille le profil thermique des équipements industriels grâce à des capteurs de températures. Les caméras infrarouges sont fréquemment utilisées. Elle identifie les variations anormales de température qui peuvent indiquer :

- La fuite,
- Le point chaud,
- Le défaut électrique.

L'avantage de la thermographie est qu'elle ne nécessite aucun contact avec les machines, et n'impose donc pas d'interrompre les opérations en cours [5].

I.4.1.3. Analyse vibratoire

Elle analyse les vibrations émises par les machines en fonctionnement pour confirmer un diagnostic et le préciser. Cette méthode identifie :

- Le défaut de serrage,
- Le défaut d'alignement (arbre de transmission, par exemple),
- L'usure d'une pièce.

Les vibrations peuvent être mesurées selon l'amplitude, le niveau acoustique (décibels) ou la fréquence (hertz) [5].

I.5. OBJECTIFS DE LA MAINTENANCE

La maintenance doit se faire de telle sorte que l'outil de production soit disponible et en bon état de fonctionnement ; elle est, de ce fait, intimement liée à la production et à la qualité. Les objectifs de la maintenance, se greffent sur ceux de la production ou services attendus tel que la qualité, le coût, les délais etc... De ce point de vue, les objectifs de la maintenance réalisés à travers son organisation, sa gestion et ses interventions, sont nombreux [5] :

- Assurer la disponibilité.
- Développer l'économie de l'entreprise.
- Assurer la bonne qualité des produits.
- Assurer la maintenabilité des équipements.
- Assurer la sécurité du personnel et des installations.
- Augmenter la productivité.

I.6. VIBRATIONS

La norme ISO 2041 « vibration et chocs vocabulaire Août 1990 », définit la notion de vibration comme suit : 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. Un corps est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement oscillatoire autour d'une position d'équilibre ou de référence [6].

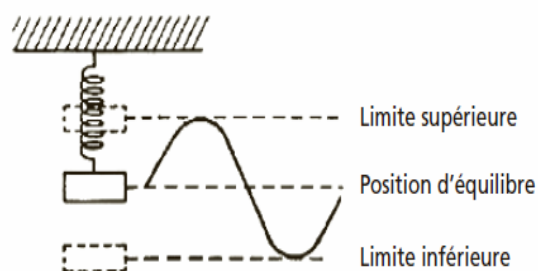


Figure I.7. Exemple d'un système vibratoire.

I.6.1 Caractéristique des vibrations

Par analogie, l'exemple d'un system mass/ ressort représenté par la **figure I.7** ci-dessus et proche de nos machines, qui ont toute une masse et une certaine élasticité structurelle, nous pouvons dire qu'une vibration se caractérise principalement par son **amplitude**, sa **fréquence** et la nature des forces qui l'animent [7].

I.6.1.1. Fréquence

La fréquence représente la répétition d'un phénomène ou le nombre de fois qu'il se reproduit en une seconde, elle s'exprime en Hertz (Hz). Une vibration qui se produira 50 fois/seconde aura donc une fréquence de 50 Hz. 1 Hertz = 1 cycle par seconde. La durée d'un cycle (ou période T) est de 1/50 de seconde soit 20 ms, donc la fréquence f est l'inverse de la période [7].

I.6.1.2. Amplitude

On appelle amplitude d'un mouvement vibratoire la valeur de ses écarts par rapport à sa position d'équilibre. La complexité d'un signal vibratoire réel conduit à définir plusieurs grandeurs pour caractériser son amplitude [7]:

- **L'amplitude « crête (Ac) »** : Elle représente l'amplitude maximale du signal par rapport à sa valeur d'équilibre.
- **L'amplitude « crête à crête (Ac-c) »** : Elle représente l'écart entre les amplitudes extrêmes du signal pour un temps d'observation donné, dans le cas d'une vibration sinusoïdale.
- **L'amplitude « efficace (Aeff) »** : ou RMS en anglais comme en électricité, elle représente l'amplitude corrigée « statique » du signal redressé, indiquant ainsi l'énergie donnée par le mouvement vibratoire.

La figure I.8 ci-dessous montre les différentes amplitudes caractéristiques dans le cas d'un signal sinusoïdal (en a), complexe (en b), impulsionnel périodique (en c) [7].

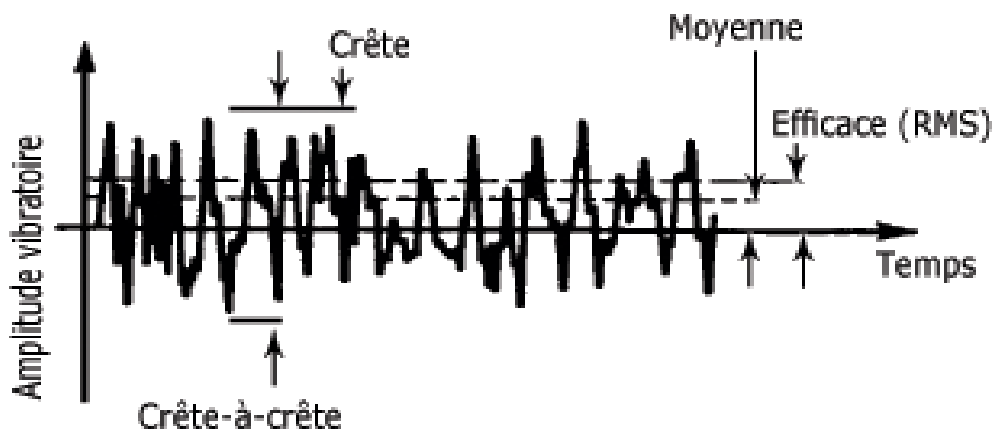


Figure I.8. Représentation des différentes amplitudes caractéristiques d'un signal.

I.6.2. Vibrations et maintenance

Une machine se compose d'un ensemble de mécanismes et d'organes combinés destinés à transformer une énergie ou à transmettre un mouvement. Ces mécanismes, mobiles entre eux, ne peuvent fonctionner sans jeux, contraintes, efforts dynamiques et chocs dont les effets se manifestent principalement sous forme de vibrations et de bruits, tout changement dans l'importance de ces jeux, de ces contraintes, efforts ou chocs, se traduit inmanquablement par une modification de l'intensité ou des fréquences de ces vibrations, cette modification de comportement vibratoire constitue souvent la première manifestation physique d'une anomalie affectant la machine, cause potentielle à terme de dégradations.

I.7. ROLE D'ANALYSE VIBRATOIRE DANS LA MAINTENANCE

L'analyse des vibrations est utilisée pour déterminer l'état de fonctionnement et l'état mécanique de l'équipement. Un avantage majeur est que l'analyse des vibrations peut identifier les problèmes en développement avant qu'ils ne deviennent trop graves et provoquent des arrêts imprévus. Cela peut être accompli en effectuant une surveillance régulière des vibrations de la machine soit sur une base continue, soit à intervalles planifiés. Une surveillance régulière des vibrations peut détecter des roulements détériorés ou défectueux, un jeu mécanique et des engrenages usés ou cassés. L'analyse des vibrations peut également révéler des incohérences et des déséquilibres avant que ces conditions n'endommagent le roulement ou l'arbre. Les niveaux de vibration courants peuvent identifier de mauvaises pratiques d'entretien, telles qu'un montage et un remplacement incorrects du roulement, un alignement inexact des colonnes ou un équilibrage du rotor inexact [8].

Tableau I.1. Tableau des paramètres permettant de détecter un défaut [9]

Défauts \ Paramètres	Température	Pression	Analyse d'huile	Vibration
Déséquilibre (balourd)				▲
Arbres non alignés flexion d'arbres	▲			▲
Roulements à billes	▲		▲	▲
Paliers	▲		▲	▲
Engrenages	▲	▲	▲	▲
Frottement	▲			▲

I.8. TYPES D'ANALYSE VIBRATOIRE

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

I.8.1 Méthodes temporelles (Les valeurs classiques)

L'analyse des signaux vibratoires dans le domaine temporel est l'une des techniques les plus faciles et les moins coûteuses. L'information contenue dans le signal vibratoire engendre des variations d'amplitude et de temps lors d'apparition d'un défaut. Par exemple la périodicité d'un pique d'amplitude peut indiquer une certaine anomalie du système. Ainsi, l'approche temporelle est appropriée pour des vibrations périodiques engendrées par un défaut produisant des impulsions périodiques. Cependant, l'analyse des courbes de deux signaux vibratoires : l'un sain et l'autre en défaut peut révéler une différence des deux formes, mais cela n'indique pas la cause exacte du défaut, sa nature et sa gravité. D'ailleurs, certaines machines génèrent de fortes vibrations lors de son opération. Lorsque ces machines développent un défaut progressif, son évolution s'accroît constamment dans le temps tandis que l'augmentation du niveau des vibrations est difficile à percevoir. Si le niveau de gravité de ce défaut est bas, il est difficile à détecter les symptômes de ce défaut par les variations enregistrées sur la courbe du signal vibratoire [10].

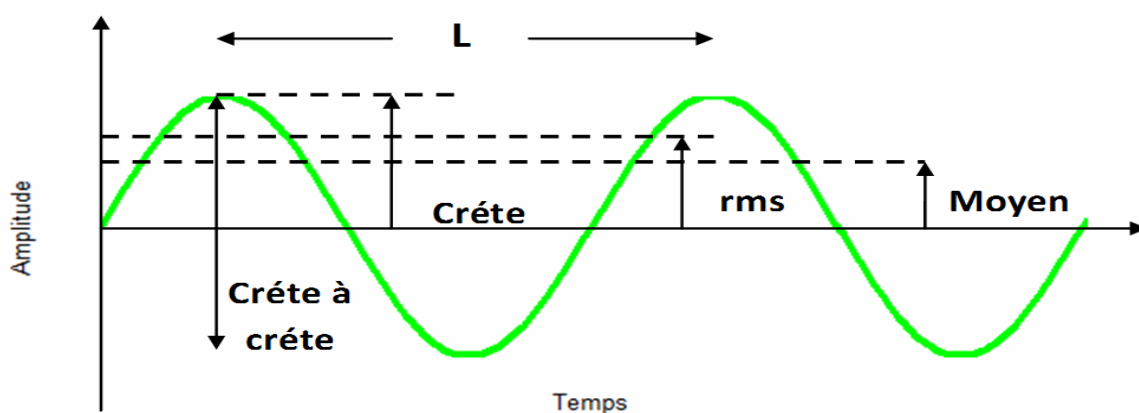


Figure I.9. Représentation des indicateurs temporels

I.8.2. Méthodes fréquentielles

Faute de pouvoir représenter le signal vibratoire en fonction du temps sous une forme facilement exploitable, on a recherché à le représenter dans un diagramme amplitudes fréquences appelé spectre (parce qu'intemporel) [11]. Avec ce type de représentation, chacune des composantes sinusoïdales, constituant le signal, est parfaitement définie par son amplitude et sa fréquence.

Un signal quelconque $x(t)$ peut être décomposé en signaux sinusoïdaux élémentaires. L'analyse spectrale consiste à identifier la fréquence et l'amplitude de ces sinus, ce qui permet de tracer la représentation amplitude/fréquence de $x(t)$.

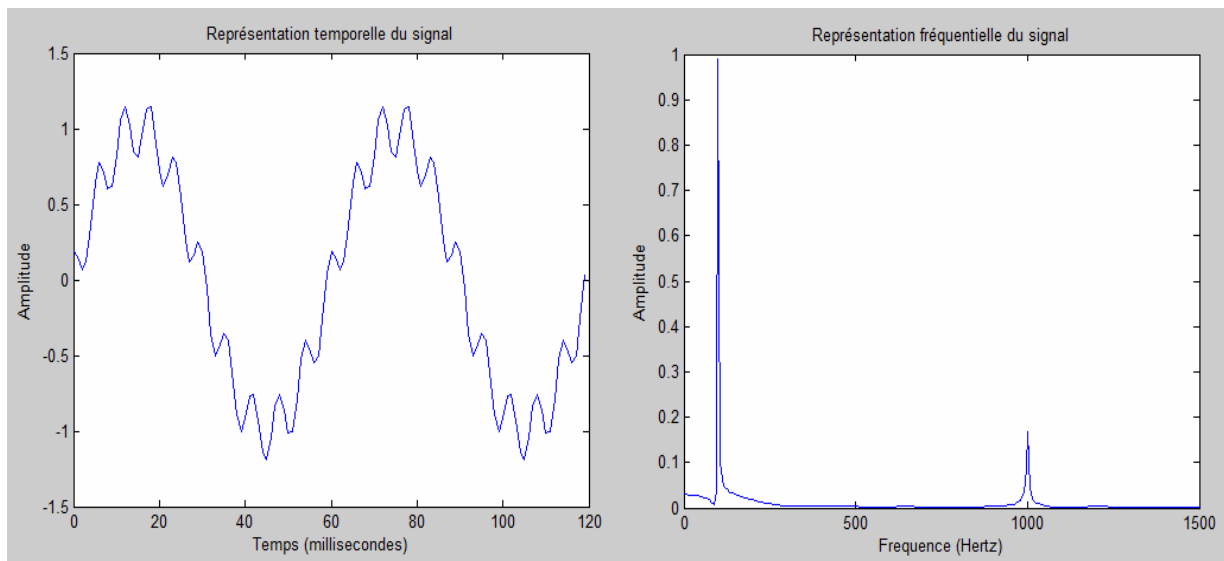


Figure I.10. Représentation temporelle et fréquentielle d'un même signal

I.8.3. Analyse spectrale

L'analyse spectrale repose sur une analyse systématique du signal vibratoire pour rechercher la présence d'images vibratoires de l'ensemble des défauts susceptibles d'affecter l'installation considérée. Cela demande une connaissance des caractéristiques cinématiques des différents organes constitutifs, de leur vitesse de rotation ou mieux encore de leur fréquence de mouvement.

La représentation en fonction de la fréquence dans un diagramme amplitude–fréquence appelé spectre : représentation spectrale.

Le signal complexe $F(t)$ difficile à interpréter, est décomposé en une série de composantes sinusoïdales élémentaires définies par leurs amplitudes et leurs fréquences. L'outil mathématique utilisé est la décomposition en série de Fourier.

I.8.3.1. Définition d'un spectre

Un spectre est un graphe dans lequel sont représentées les amplitudes et les fréquences de toutes les composantes vibratoires élémentaires induites par le fonctionnement d'une machine. Chaque composante est représentée par un segment vertical appelé raie dont l'abscisse représente la fréquence et l'ordonnée, l'amplitude. Les figures I.11 et I.12 présentent quelques exemples de spectres [11] :

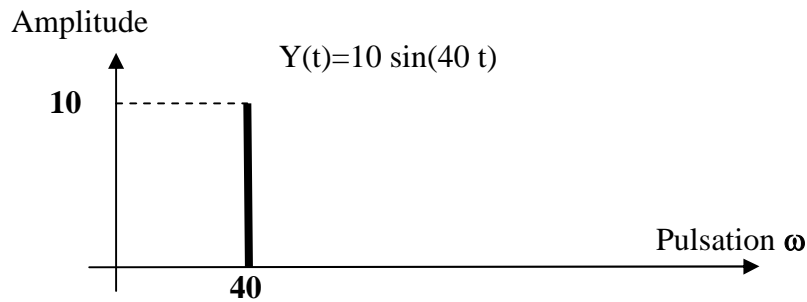


Figure I.11. Spectre d'un Signal sinusoïdal [12]

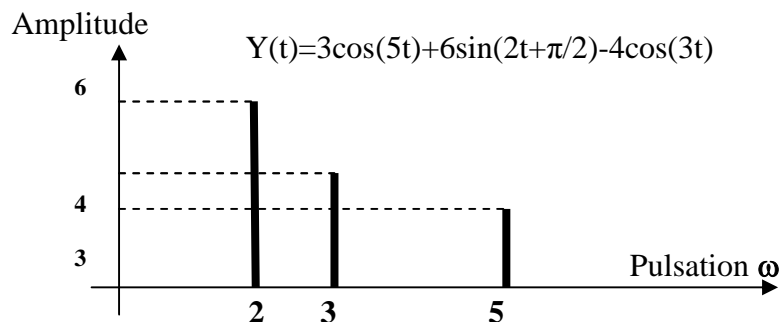


Figure I.12. Spectre d'un Signal composite [12]

I.8.3.2. Représentation graphique d'un spectre

Les spectres issus de signaux vibratoires réels sont très riches en raison du grand nombre de sources vibratoires présentes dans une machine. Par suite, les informations intéressantes dans le spectre ne correspondent pas forcément aux fréquences présentant des maximums d'amplitude. Des raies spectrales d'amplitude faibles au regard des autres peuvent être d'un intérêt de premier plan pour le diagnostic. Afin de pouvoir les visualiser, on utilise pour la représentation des spectres en fréquences une échelle logarithmique des amplitudes du signal. Ce type de représentation présente l'avantage de favoriser l'affichage des petites amplitudes et est donc recommandé.

La figure I.13 présente un spectre avec deux représentations en échelle linéaire et en échelle logarithmique de l'amplitude d'un signal vibratoire [13].

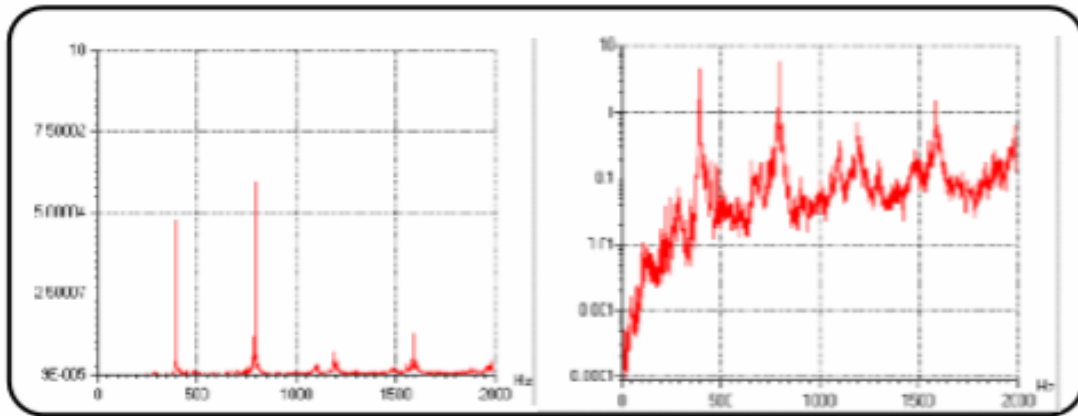


Figure I.13. Représentation en échelle linéaire et en échelle logarithmique de l'amplitude d'un signal vibratoire

I.8.3.3. Détection par l'analyse spectrale des principales anomalies

Les anomalies spectrales peuvent être classées en 3 catégories :

- Pics apparaissant à des fréquences multiples ou sous multiples de la vitesse du rotor.
- Pics apparaissant à des vitesses indépendantes de la vitesse du rotor.
- Densité spectrale provenant de composantes aléatoires de la vibration.

I.8.3.3.1. Phénomènes provoquant des pics dont les fréquences sont liés à celle du rotor

Ce sont principalement les phénomènes de balourd, de désalignement, de mauvais serrage mécanique, d'avaries d'engrenage, de tourbillonnement de film d'huile, d'excitation hydrodynamique, de mauvais état d'une courroie de transmission.

a) Phénomène de balourd

C'est la cause de vibrations la plus commune et la plus fréquemment rencontrée. En dépit du soin apporté à la construction des rotors, il est impossible de les équilibrer parfaitement et il existe donc toujours une vibration à la fréquence de rotation dont l'amplitude est directement proportionnelle à l'importance du balourd et au carré de la vitesse de rotation. Une modification brusque de l'amplitude correspond systématiquement à une modification du balourd dont l'origine peut être une rupture ou la déformation d'une partie du rotor (ailettes de turbine par exemple). Si cette modification d'amplitude est plus lente, il peut s'agir d'une ou d'un encrassement de la partie tournante. Le phénomène de balourd se caractérise par une vibration radiale importante à la fréquence de rotation.

b) Désalignement

Un désalignement provoque des vibrations à la fréquence de rotation ainsi qu'aux harmoniques d'ordre 2, 3 et parfois 4 (double, triple ou quadruple de la fréquence de rotation et parfois même davantage en particulier pour les accouplements à denture où l'on rencontre l'harmonique lié au nombre de dents et à la fréquence de rotation). La composante axiale de la vibration est particulièrement importante pour l'harmonique d'ordre 2.

c) Mauvais serrage mécanique

Lorsqu'un palier est desserré ou présente une possibilité de mouvement partiel dans le plan radial il apparaît une vibration radiale à une fréquence égale à deux fois la vitesse de rotation. Cette vibration se produit sous l'effet du balourd initial et elle peut prendre une amplitude élevée en fonction du degré de desserrage du palier. Une analyse du déphasage entre deux mesures prises orthogonalement sur un même palier permet de différencier une anomalie due à un balourd (force tournante), d'un défaut de serrage ou d'une déformation du support (force directionnelle due à la contrainte).

d) Défaillance d'engrenage

Dans le phénomène d'engrènement, il se produit un choc chaque fois qu'une dent menant est en contact avec une dent menée. Ceci génère une vibration dont la fréquence est égale à la vitesse de rotation du pignon multipliée par son nombre de dents. S'il y a déformation du profil de la denture, la fluctuation de la charge sur la ou les dents donne naissance à des fluctuations de vitesse et aboutit ainsi à une modulation de fréquence (ou de phase). L'analyse spectrale de ce phénomène montre des bandes latérales situées de part et d'autre de la fréquence d'engrènement. L'analyse du spectre peut aider à l'identification de ces bandes latérales.

e) Tourbillonnement de film d'huile

Ce phénomène apparaît sur les paliers lisses faiblement chargés, lubrifiés en graissage hydrodynamique. Il se produit légèrement en dessous de la moitié de la fréquence de rotation de l'arbre (de 0,42 à 0,48 fois la fréquence suivant les caractéristiques du palier). Ceci, associé à un balourd du rotor et à une fréquence de résonance voisine de la vitesse de rotation, conduit au phénomène de fouettement du rotor.

f) Excitation hydrodynamique

Les variations de pression engendrées par les ailettes d'une turbine passant devant des ailettes fixes vont créer des vibrations dont la fréquence sera égale à la vitesse de rotation multipliée par le nombre d'ailettes tournantes et le nombre d'ailettes fixes.

g) Courroie de transmission en mauvais état

Le mauvais état d'une courroie en « V » (variation de largeur, déformation) crée des variations de tension susceptibles d'induire des vibrations de fréquence égale à celle de la rotation de la courroie. Si les poulies ne sont pas bien alignées, il y aura une composante axiale importante à cette fréquence.

I.8.3.3.2. Phénomènes créant des pics à des fréquences non liées à celle du rotor**a) Vibrations de machines voisines**

Le sol et les socles de fixation peuvent transmettre les vibrations d'une machine à l'autre. Si l'on arrête la machine voisine mise en cause, le pst spectral disparaît.

b) Vibrations d'origine électrique

Les vibrations des parties métalliques du stator et du rotor sous l'excitation de champs électromagnétiques produisent des pics à des fréquences égales à celle du secteur et à ses harmoniques. L'augmentation de ces pics peut être le signe de la dégradation du moteur (par exemple variation de l'entrefer). Ces pics disparaissent bien évidemment avec la coupure du courant.

c) Résonance de la structure ou du rotor

Chaque sous-ensemble de la machine possède une fréquence propre de résonance qui est fonction de paramètres multiples tels que la rigidité, la masse, la forme géométrique... Si une excitation quelconque possède une fréquence voisine de celle de la résonance, un pic apparaît dans le spectre. Les machines sont toujours conçues pour que ces fréquences de résonance ne se rencontrent que dans les régimes transitoires et non au régime de fonctionnement.

I.8.3.3.3. Phénomènes créant des modifications des composantes aléatoires du spectre**a) Cavitation**

Ce phénomène hydrodynamique induit des vibrations aléatoires qu'il faut pouvoir reconnaître pour les éliminer en modifiant les caractéristiques d'aspiration de la pompe. L se reconnaît également par un bruit caractéristique.

b) Ecaillage des roulements

L'écaillage d'une piste de roulements provoque des chocs et une résonance du palier qu'il est facile d'identifier avec un appareil à mesure d'ondes de chocs. En analyse spectrale, ce phénomène apparaît aux hautes fréquences par une densité spectrale qui augmente au fur et à mesure que les roulements se détériorent, et sous forme de « bosses » qu'il est possible d'analyser notamment avec les techniques de « détection d'enveloppe ».

c) Frottements

Le frottement de surfaces comportant des aspérités génère des vibrations d'une fréquence généralement élevée. L'état de surface et la nature des matériaux en contact a une influence sur l'intensité et la fréquence des vibrations ainsi créées. Ces phénomènes sont souvent sporadiques et donc difficiles à analyser et à surveiller.

I.8.3.4. Acquisition du signal temporel

En analyse vibratoire, le signal temporel est aussi communément appelé “donnée brute”, puisqu'il représente l'information réelle transmise par la machine à partir des efforts qui sont générés. Comme première étape lors de toute mesure, les analyseurs de vibration enregistrent ce signal temporel et le traite ensuite pour en extraire différentes valeurs. Le signal temporel est donc un élément clé de l'analyse vibratoire [14]. Le signal temporel est fonction de:

- Fréquence d'échantillonnage: “à quelle vitesse est ce que j'acquiers la donnée?”
- le nombre d'échantillons: “quelle quantité d'information dois-je enregistrer?”

a) Fréquence d'échantillonnage

Techniquement, la fréquence d'échantillonnage est la fréquence à laquelle le collecteur de donnée va convertir le signal analogique mesuré en signal numérique.

L'application du théorème de Nyquist, nous indique que la fréquence d'échantillonnage doit être supérieure à 2.56 fois à la fréquence maximale que l'on souhaite observer, appelée F_{max} . Différents types de défauts vont se manifester dans différentes gammes de fréquences. Pour résumer la situation, F_{max} devra être adaptée en fonction du type de défauts que vous cherchez à détecter. Voici une illustration par la **figure I.14** permettant d'expliquer le concept.

Afin de couvrir les applications les plus communes efficacement à l'échelle d'un site industriel, nous recommandons de vous assurer que votre collecteur de vibration puisse analyser au moins jusqu'à 20kHz ce qui représente une fréquence d'échantillonnage de 51.2 kHz.

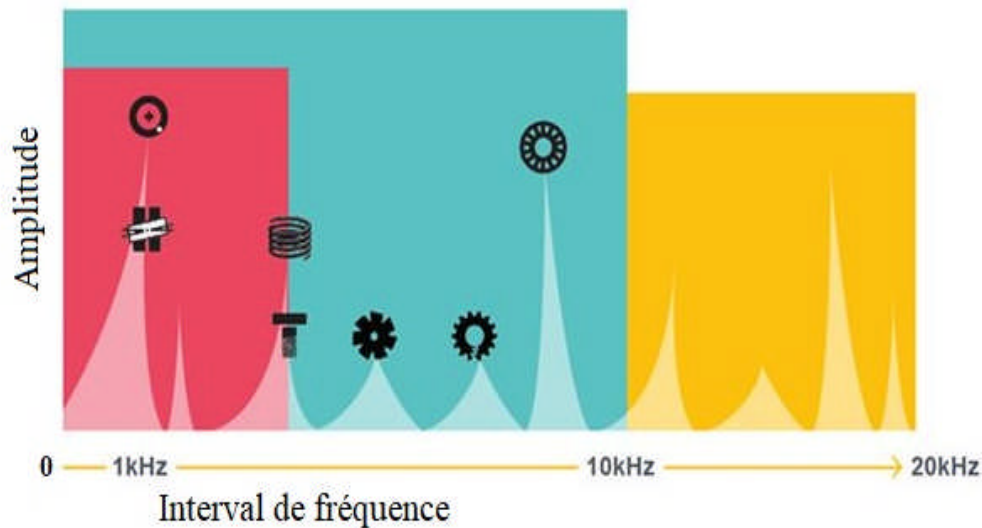


Figure 1.14. Concept de détection des défauts par analyse fréquentiel

b) Nombre d'échantillons

La durée d'acquisition du signal temporel découle directement de la fréquence d'échantillonnage (à quelle fréquence enregistrer) et du nombre d'échantillons (quelle quantité). Pour une fréquence d'échantillonnage donnée, la durée d'un signal temporel sera donc plus longue avec un nombre d'échantillons plus important, et plus faible avec un nombre d'échantillons restreint. Afin d'être capable de détecter les défauts de manière efficace, il faut vous assurer que vous puissiez enregistrer un minimum de 7 à 10 rotations de l'arbre dans le signal temporel (pour un fonctionnement en conditions stationnaires). Il faut donc bien prendre en compte ces deux paramètres

- La fréquence d'échantillonnage, qui détermine le contenu fréquentiel visible dans les mesures
- La longueur du signal temporel à capturer, qui permettra de réaliser un suivi efficace

On peut déduire le nombre d'échantillons à partir de la formule suivante :

$$N_s = F_s \times T_s \quad (1.1)$$

Avec:

- N_s : Nombre d'échantillons
- F_s : Fréquence d'échantillonnage en Hz (nombre d'échantillons par seconde)
- T_s : La durée du signal temporel en secondes

I.9. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons parlé sur la relation entre la maintenance et l'analyse de vibration par donner un rappel général sur la maintenance et les vibrations. Nous avons aussi présenté les différents défauts qui peut être affecté une machine électrique durant son fonctionnement ainsi les différentes techniques de l'analyse vibratoire pour détecter les défauts.

Chapitre II

Mesure des vibrations Avec Arduino

II.1. INTRODUCTION

Dans les temps modernes, toutes les sciences sont devenues interconnectées. Par exemple, pour étudier un phénomène mécanique, on peut utiliser des supports électroniques, et parfois même des langages de programmation. Dans ce chapitre, nous discutons de l'Arduino et de son rôle efficace dans la programmation et l'enregistrement des vibrations et comment utiliser cette carte simplement et selon ce que nous voulons. Ensuite, nous discutons du capteur de vibration, comment il est connecté à la carte Arduino et comment il fonctionne.

II.2. MODULE ARDUINO

Arduino est une plateforme libre (freeware) qui peut être programmé pour analyser ou produire des signaux électriques et exécuter des commandes, son interface facile et son langage de programmation simple en font un des microcontrôleurs les plus utilisés dans le monde, que ce soit par les débutants ou par les utilisateurs plus expérimentés [15].

Elle est constituée de deux parties :

1°. Le logiciel (Software)

Le logiciel de programmation des modules Arduino est une application Java multiplateformes (fonctionnant sur tout système d'exploitation), servant d'éditeur de code et de compilateur, et qui peut transférer le firmware (et le programme) au travers de la liaison série (RS232, Bluetooth ou USB selon le module). Gratuit et open source, développé en Java, dont la simplicité d'utilisation relève du savoir cliquer sur la souris. Le développement sur Arduino est très simple :

1. on code l'application : Le langage Arduino est basé sur les langages C/C++ , avec des fonctions et des bibliothèques spécifiques à Arduino (gestions des e/s).
2. on relie la carte Arduino au PC et on transfère le programme sur la carte

2°. Le matériel (Hardware)

Les cartes électroniques dont les schémas sont en libre circulation sur internet. Cette liberté a une condition que le nom « Arduino » ne doit être employé que pour les cartes « officielles ». En somme, les concepteurs ne pouvant pas fabriquer leurs propres cartes sur le modèle Arduino et leurs assigner le nom « Arduino ». Arduino est utilisé dans beaucoup d'applications comme l'électrotechnique industrielle et embarquée ; le modélisme, la domotique mais aussi dans des domaines différents comme l'art contemporain et le pilotage d'un robot, commande des moteurs et faire des jeux de lumières, communiquer avec l'ordinateur, commander des appareils mobiles.

II.3. CARTES ARDUINO

Actuellement, il existe plus de 20 versions de module Arduino, nous citons quelques un afin d'éclaircir l'évaluation de ce produit scientifique et académique [15] :

- **Le NG d'Arduino** : avec une interface d'USB pour programmer et usage d'un ATmega8.
- **L'extrémité d'Arduino** : avec une interface d'USB pour programmer et usage d'un Microcontrôleur ATmega8.
- **L'Arduino Mini** : une version miniature de l'Arduino en utilisant un microcontrôleur ATmega168.
- **L'Arduino Nano** : une petite carte programme à l'aide porte USB cette version utilisant un microcontrôleur ATmega168 (ATmega328 pour une plus nouvelle version).
- **Le Lily Pad Arduino** : une conception de minimaliste pour l'application wearable en utilisant un microcontrôleur ATmega168.
- **Le NG d'Arduino+** : avec une interface d'USB pour programmer et usage d'un ATmega168.
- **L'Arduino Bluetooth** : avec une interface de Bluetooth pour programmer en utilisant un microcontrôleur ATmega168.
- **L'Arduino Diecimila** : avec une interface d'USB et utilise un microcontrôleur ATmega168.
- **L'Arduino Duemilanove ("2009")** : en utilisant un microcontrôleur l'ATmega168 (ATmega328 pour une plus nouvelle version) et actionné par l'intermédiaire de la puissance d'USB/DC.
- **L'Arduino Mega** : en utilisant un microcontrôleur ATmega1280 pour I/O additionnel et mémoire.
- **L'Arduino UNO** : utilisations microcontrôleur ATmega328.
- **L'Arduino Mega2560** : utilisations un microcontrôleur ATmega2560, et possède toute la mémoire à 256 KBS. Elle incorpore également le nouvel ATmega8U2 (ATmega16U2 dans le jeu de puces d'USB de révision 3).
- **L'Arduino Leonardo** : avec un morceau ATmega32U4 qui élimine le besoin de raccordement d'USB et peut être employé comme clavier.
- **L'Arduino Esplora** : ressemblant à un contrôleur visuel de jeu, avec un manche et des sondes intégrées pour le bruit, la lumière, la température, et l'accélération.

II.4. PRESENTATION DE LA CARTE ARDUINO

Dans la gamme des cartes électroniques Arduino, nous avons choisi la carte Arduino UNO (carte Basique). L'intérêt principal de cette carte est la faciliter de la mise en œuvre d'une telle commande qui sera détaillée par la suite.

II.4.1. Constitution de la carte Arduino UNO

Un module Arduino UNO est généralement construit autour d'un microcontrôleur Atmel AVR (ATmega328 ou ATmega2560 pour les versions récentes, ATmega168 ou ATmega8 pour les plus anciennes), et de composants complémentaires qui facilitent la programmation et l'interfaçage avec d'autres circuits. Chaque module possède au moins un régulateur linéaire 5V et un oscillateur à quartz 16 MHz (ou un résonateur céramique dans certains modèles).

Le microcontrôleur est préprogrammé avec un boot loader de façon à ce qu'un programmeur dédié ne soit pas nécessaire. [16]. La carte Arduino UNO contient une mémoire morte de 1 kilo. Elle est dotée de 14 entrées/sorties digitales (dont 6 peuvent être utilisées en tant que sortie PWM), 6 entrées analogiques et un cristal à 16 MHz, une connexion USB et possède un bouton de remise à zéro et une prise jack d'alimentation. La carte est illustrée dans la **figure II.1** :

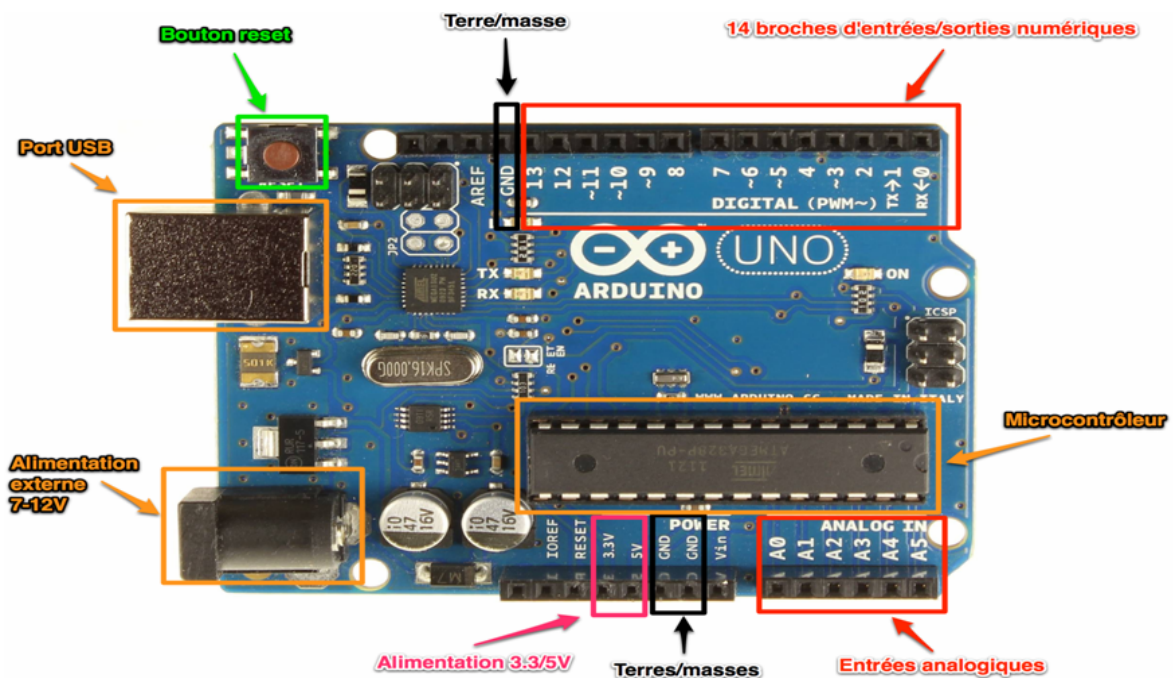


Figure II.1. Composant Arduino UNO.

II.4.2. Alimentation

La carte Arduino UNO peut-être alimentée soit via la connexion USB (qui fournit 5V jusqu'à 500mA) ou à l'aide d'une alimentation externe. La source d'alimentation est sélectionnée automatiquement par la carte [16]. L'alimentation externe (non-USB) peut être soit un adaptateur secteur (pouvant fournir typiquement de 3V à 12V sous 500mA) ou des piles (ou des accus). L'adaptateur secteur peut être connecté en branchant une prise 2.1mm positif au centre dans le connecteur jack de la carte.

Les fils en provenance d'un bloc de piles ou d'accus peuvent être insérés dans les connecteurs des broches de la carte appelées GND (masse ou 0V) et Vin (Tension positive en entrée) du connecteur d'alimentation.

Cependant, si la carte est alimentée avec moins de 7V, la broche 5V pourrait fournir moins de 5V et la carte pourrait être instable. Si on utilise plus de 12V, le régulateur de tension de la carte pourrait chauffer et endommager la carte. Aussi, la plage idéale recommandée pour alimenter la carte UNO est entre 7V et 12V.

II.4.3. Bénéfiques et avantages de la carte Arduino UNO

La carte Arduino UNO simplifie la façon de travailler avec les microcontrôleurs tout en offrant à personnes intéressées plusieurs avantages cités comme suit [17] :

- **Le prix (réduits) :** la carte Arduino UNO relativement peu coûteuses comparativement aux autres plates-formes.
- **Multi plateforme :** le logiciel Arduino, écrit en JAVA, tourne sous les systèmes d'exploitation Windows, Macintosh et Linux. La plupart des systèmes à microcontrôleurs sont limités à Windows.
- **Un environnement de programmation clair et simple:** l'environnement de programmation Arduino (le logiciel Arduino IDE) est facile à utiliser pour les débutants, tout en étant assez flexible pour que les utilisateurs avancés puissent en tirer profit également.
- **Logiciel Open Source et extensible :** le logiciel Arduino et le langage Arduino sont publiés sous licence open source, disponible pour être complété par des programmeurs expérimentés.
- **Matériel Open source et extensible:** les schémas des modules sont publiés sous une licence créative Commons, et les concepteurs des circuits expérimentés peuvent réaliser leur propre version des cartes Arduino UNO, en les complétant et en les améliorant. Même les utilisateurs relativement inexpérimentés peuvent fabriquer la version sur plaque d'essai de la carte Arduino UNO, dont le but est de comprendre comment elle fonctionne pour économiser le coût.

II.4.4. Branchage de la carte Arduino UNO

II.4.4.1. Broches d'alimentation

La figure II.2 ci-dessous montre les broches associées à une carte Arduino UNO :

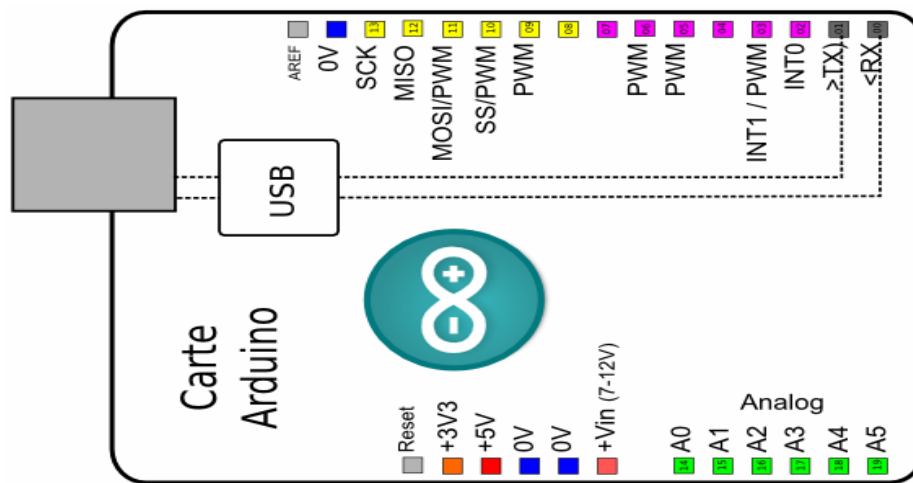


Figure II.2 .Brochage de la carte Arduino UNO .

- **VIN** : La tension d'entrée positive lorsque la carte Arduino est utilisée avec une source de tension externe. Vous pouvez alimenter la carte à l'aide de cette broche, ou, si l'alimentation est fournie par le jack d'alimentation, accéder à la tension d'alimentation sur cette broche [18].
- **5V** : La tension régulée utilisée pour faire fonctionner le microcontrôleur et les autres composants de la carte (pour info : les circuits électroniques numériques nécessitent une tension d'alimentation parfaitement stable dite "tension régulée" obtenue à l'aide d'un composant appelé un régulateur et qui est intégré à la carte Arduino). Le 5V régulé fourni par cette broche peut donc provenir soit de la tension d'alimentation **VIN** via le régulateur de la carte, ou bien de la connexion USB (qui fournit du 5V régulé) ou de toute autre source d'alimentation régulée.
- **3.3V** : Une alimentation de 3.3V fournie par le circuit intégré FTDI (circuit intégré faisant l'adaptation du signal entre le port USB de votre ordinateur et le port série de l'ATmega) de la carte est disponible : ceci est intéressant pour certains circuits externes nécessitant cette tension au lieu du 5V). L'intensité maximale disponible sur cette broche est de 50mA.
- **GND** : Broche de masse (ou 0v).

II.4.4.2. Entrées et sorties numériques

Chacune des 14 broches numériques de la carte UNO (numérotées des 0 à 13) peut être utilisée soit comme une entrée numérique, soit comme une sortie numérique, en utilisant les instructions **pinMode**, **digitalWrite** et **digitalRead** du langage Arduino. Ces broches fonctionnent en 5V. Chaque broche peut fournir ou recevoir un maximum de 40mA d'intensité et dispose d'une résistance interne de "rappel au plus" (pull-up) (déconnectée par défaut) de 20-50 KOhms. Cette résistance interne s'active sur une broche en entrée à l'aide de l'instruction **digitalWrite**(broche, HIGH). De plus, certaines broches ont des fonctions spécialisées [17].

II.4.4.3. Communication Série

Broches 0 (RX) et 1 (TX), utilisées pour recevoir (RX) et transmettre (TX) les données séries de niveau TTL. Ces broches sont connectées aux broches correspondantes du circuit intégré ATmega8U programmé en convertisseur USB-vers-série de la carte, composant qui assure l'interface entre les niveaux TTL et le port USB de l'ordinateur.

II.4.4.4. Interruptions Externes

Broches 2 et 3, broches peuvent être configurées pour déclencher une interruption sur une valeur basse, sur un front montant ou descendant, ou sur un changement de valeur.

II.4.4.5. Impulsion PWM (largeur d'impulsion modulée)

Broches 3, 5, 6, 9, 10, et 11, fournissent une impulsion PWM 8-bits à l'aide de l'instruction **analogWrite()**.

II.4.4.6. SPI (Interface Série Périphérique)

Broches 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK), ces broches supportent la communication SPI (Interface Série Périphérique) disponible avec la librairie pour communication SPI. Les broches SPI sont également connectées sur le connecteur ICSP qui est mécaniquement compatible avec les cartes Mega.

II.4.4.7. I2C

Broches 4 (SDA) et 5 (SCL), supportent les communications de protocole I2C (ou interface TWI (TwoWire Interface - Interface "2 fils"), disponible en utilisant la librairie Wire/I2C (ou TWI - Two-Wire interface - interface "2 fils").

II.4.4.8. LED

Broche 13, une LED incluse dans la carte connectée à la broche 13. Lorsque la broche est au niveau HAUT, la LED est allumée, lorsque la broche est au niveau BAS, la LED est éteinte.

II.5. Partie software (Logiciel)

Pour commander une Arduino sur PC, on installe le logiciel du même nom Arduino IDE (version 1.8.1 dans notre cas) qui est une application Java et qui a l'interface montré dans la **figure II.3**, ci-dessous :

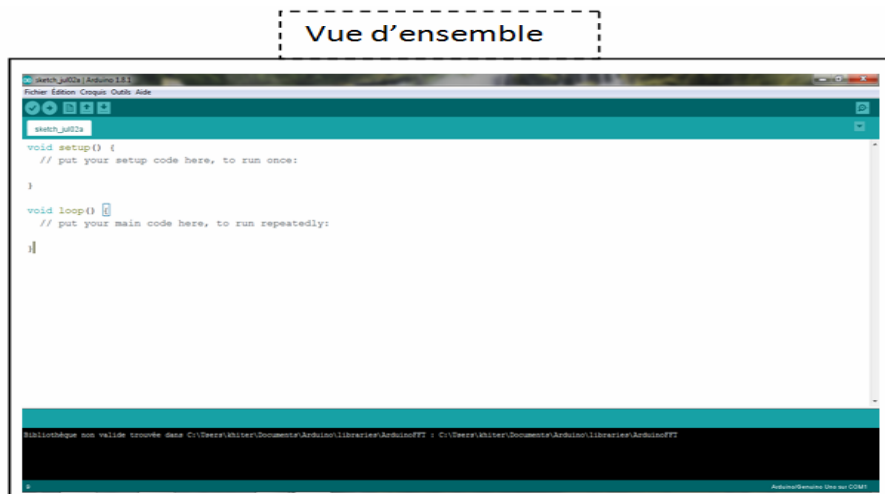


Figure II.3. Vue d'ensemble du logiciel Arduino [18].

Le logiciel Arduino a pour fonctions principales :

- De pouvoir écrire et compiler des programmes pour la carte Arduino ;
- De se connecter avec la carte Arduino pour y transférer les programmes ;
- De communiquer avec la carte Arduino ;

L'interface du logiciel contient aussi une barre d'outils, une barre des boutons pour vérifier et compiler (télé-verser), ainsi que l'espace de travail comme montré par la **figure II.4**.

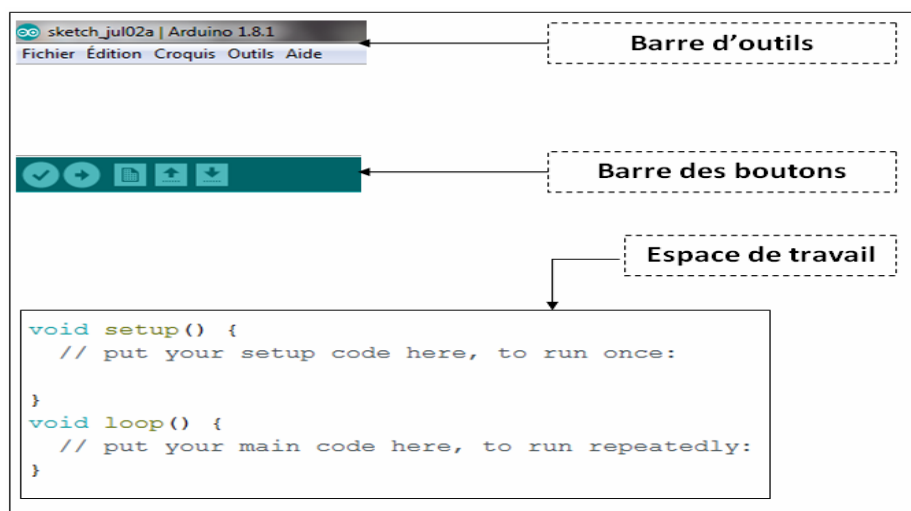


Figure II.4. Interface du logiciel Arduino [18].

Cet espace de développement intégré (EDI) dédié au langage Arduino et à la programmation des cartes Arduino comporte :

- Une BARRE DE MENUS comme pour tout logiciel une interface graphique (GUI) ;
- une BARRE DE BOUTONS qui donne un accès direct aux fonctions essentielles du logiciel (Compiler, Télé-verser) ;
- Un MONITEUR SERIE qui affiche sur l'ordinateur l'état de variables, de résultats de calculs ou de conversions analogique-numérique ;
- Un EDITEUR (Edition des programmes) pour écrire le code de programme, avec onglets de navigation ;
- Une ZONE DE MESSAGES qui affiche indique l'état des actions en cours ;
- Une CONSOLE TEXTE qui affiche les messages concernant le résultat de la compilation du programme ;



Figure II.5. Vue d'ensemble de l'espace de travail du logiciel Arduino [18].

II.6. PRESENTATION DU CAPTEUR

II.6.1 Définition

Les capteurs sont les premiers composants d'une chaîne d'acquisition de mesure. L'ISA (Instrument Society of America) définit les capteurs comme "un système qui fournit un extrant exploitable en réponse un mesurande spécifique". Le mesurande est une " grandeur physique que l'on souhaite connaître, une propriété ou une condition qui est mesurée". Les extrants sont des "quantité électriques, produites par le capteur, et qui sont des fonction des mesurandes appliqués. Les capteurs sont des mini systèmes de conversion d'énergie (Figure II.6). Ils requièrent de l'énergie sous une certaine forme et la convertissent soit en force électromotrice, soit en courant, soit en charge électrique.

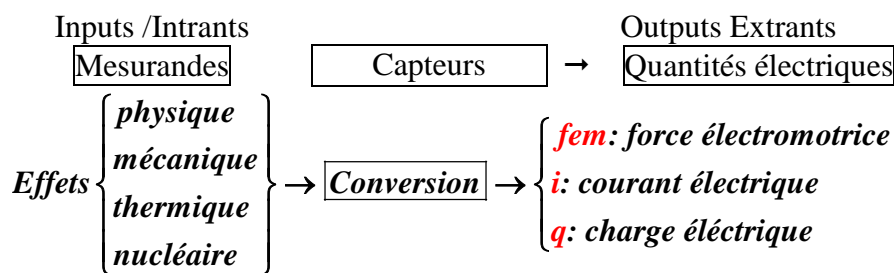


Figure II.6. Fonction globale d'un capteur

Le principe général d'un capteur peut-être représenté par le schéma fonctionnel de la figure II.7

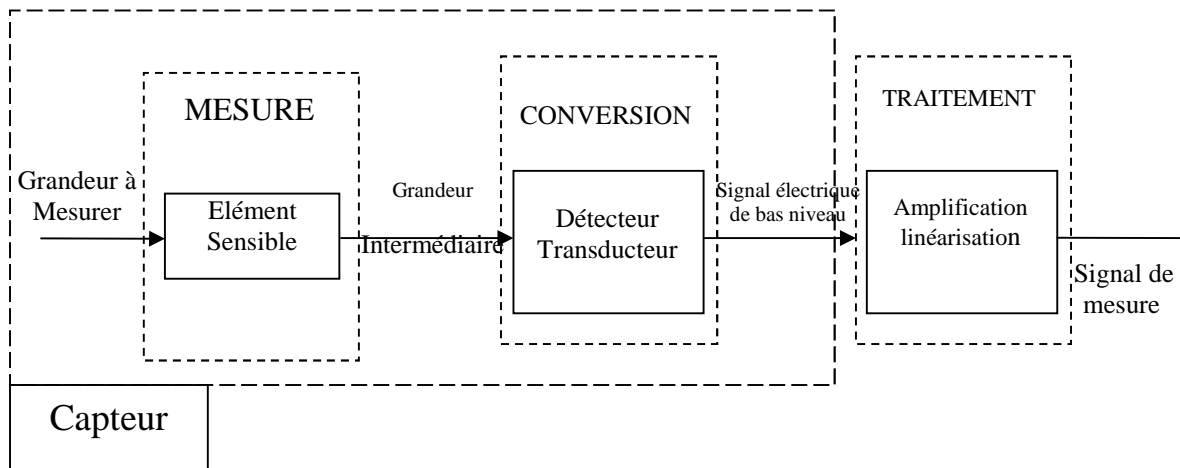


Figure II.7. Principe de fonction d'un capteur.

II.6.2. Caractéristiques de capteur

- Etendue de mesure : Valeurs extrêmes pouvant être mesurée par le capteur.
- Résolution : Plus petite variation de grandeur mesurable par le capteur.
- Sensibilité : Variation du signal de sortie par rapport à la variation du signal d'entrée.
- Précision : Aptitude du capteur à donner une mesure proche de la valeur vraie.
- Rapidité : Temps de réaction du capteur. La rapidité est liée à la bande passante [19].

II.6.3. Chaîne de mesure

La chaîne de mesure représenté par la **figure II.8**, est constituée de l'ensemble des dispositifs, y compris le capteur, rendant possible, dans les meilleures conditions, la détermination précise de la valeur du mesurande. À l'entrée de la chaîne, le capteur soumis à l'action du mesurande permet, directement s'il est actif ou par le moyen de son conditionneur s'il est passif, d'injecter dans la chaîne le signal électrique, support de l'information liée au mesurande. À la sortie de la chaîne, le signal électrique qu'elle a traité est converti sous une forme qui rend possible la lecture directe de la valeur cherchée du mesurande [20].

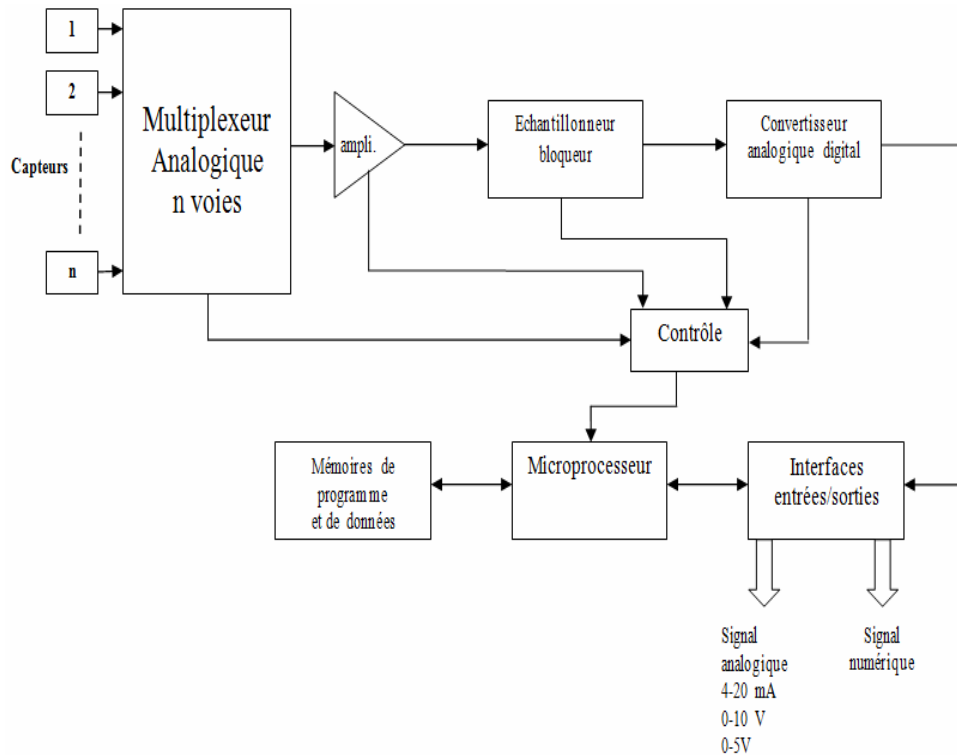


Figure II.8. Chaînes de mesure

II.6.4. Capteur d'accélération ADXL335

II.6.4.1. Description

Un capteur accéléromètre à 3 axes ADXL335 de type analogique, est la dernière d'une longue ligne éprouvée des capteurs analogiques. L'ADXL335 est un triple axe accéléromètre à base de la technologie « MEMS » avec un bruit extrêmement faible et la consommation d'énergie - 320uA seulement [21].

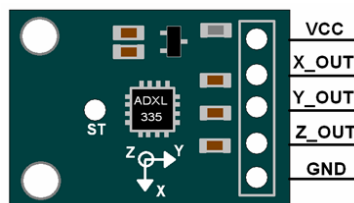


Figure II.9. ADXL335

Le capteur a une gamme complète de détection de +/-20g par exemple, peut mesurer l'accélération statique de la gravité dans les applications de détection d'inclinaison, ainsi que l'accélération dynamique résultant du mouvement, de choque et de vibration. Il important d'alimenter le capteur par une tension continue comprise entre 1,8 et 3.6V, a cause de l'absence de régulation de la puissance.

II.6.4.2. Composant de capteur

La figure ci-dessous, montre le digramme électrique du capteur d'accélération ADXL335. Le capteur est constitué essentiellement de 3 parties : Il contient un capteur micro-usiné en surface en silicium poly cristallin et un circuit de conditionnement de signal pour mettre en œuvre une architecture de mesure d'accélération en boucle ouverte. Les signaux de sortie sont des tensions analogiques proportionnelles à l'accélération.

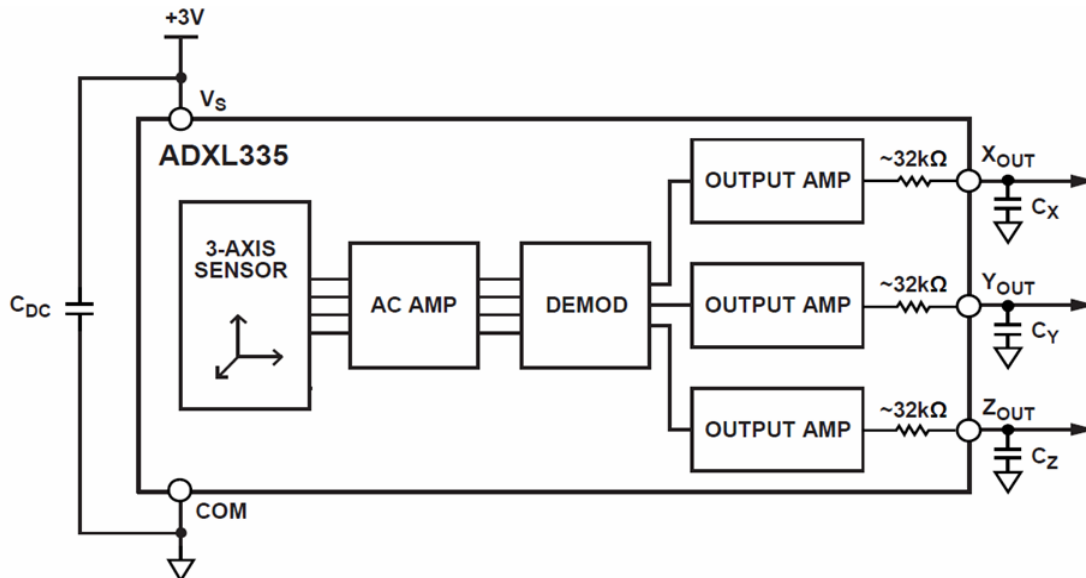


Figure II.10. Diagramme électrique de capteur.

II.6.4.3. Principe de fonctionnement

Le capteur est une structure micro-usinée en surface en silicium poly cristallin construite au sommet d'une tranche de silicium. Des ressorts en silicium poly cristallin suspendent la structure sur la surface de la plaquette et offrent une résistance aux forces d'accélération. La déflexion de la structure est mesurée à l'aide d'un condensateur différentiel composé de plaques fixes indépendantes et de plaques fixées à la masse en mouvement. Les plaques fixes sont entraînées par des ondes carrées déphasées de 180°. L'accélération dévie la masse en mouvement et déséquilibre le condensateur différentiel résultant en une sortie de capteur dont l'amplitude est proportionnelle à l'accélération. Des techniques de démodulation sensibles à la phase sont ensuite utilisées pour déterminer l'amplitude et la direction de l'accélération.

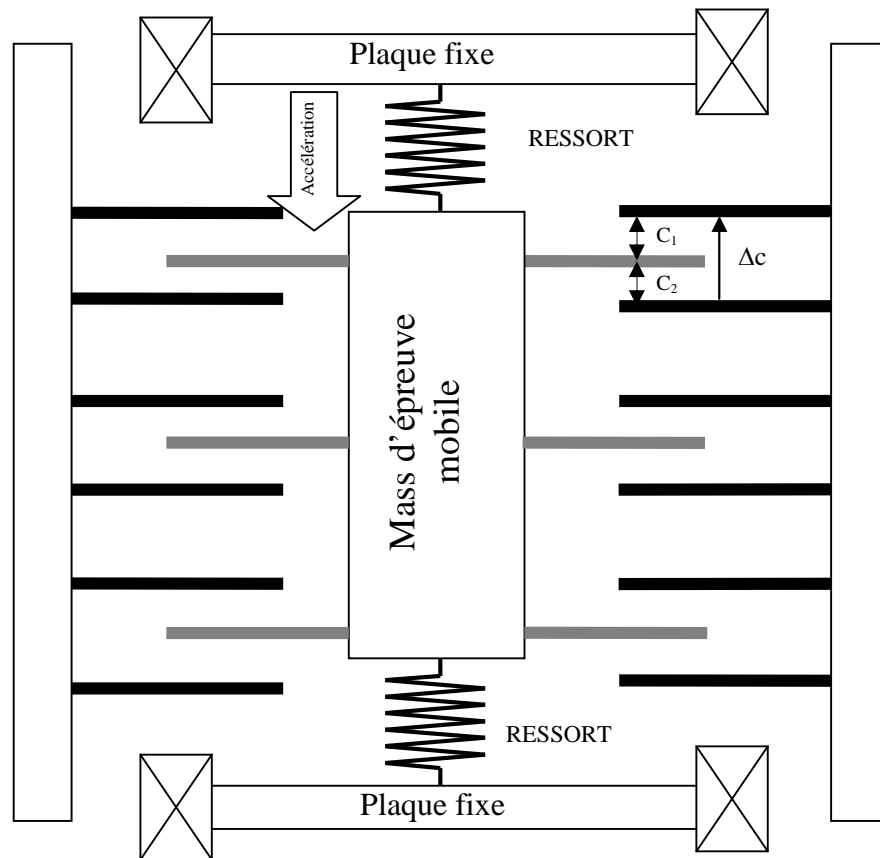


Figure II.11. MEMS accéléromètre

II.6.4.4. Positionnement du capteur

Lors de l'utilisation de ce type de capteur, respecte le positionnement du capteur sur le dispositif tout en respectant les flèches de direction est indispensable. La direction de chaque axe est liée directement au sens de gravité.

II.6.4.5. Etalonnage du capteur

L'ADXL335 utilise une seule structure pour détecter les axes X, Y et Z. Par conséquent, les directions de détection des trois axes sont très orthogonales et ont une faible sensibilité transversale. Le désalignement mécanique de la puce du capteur sur le boîtier est la principale source de sensibilité transversale. Le désalignement mécanique peut bien sûr être étalonné au niveau du système. Dans le manuel du capteur, le fabricant, donne des valeurs normalisées pour chaque direction comme montré par la **figure II.12**.

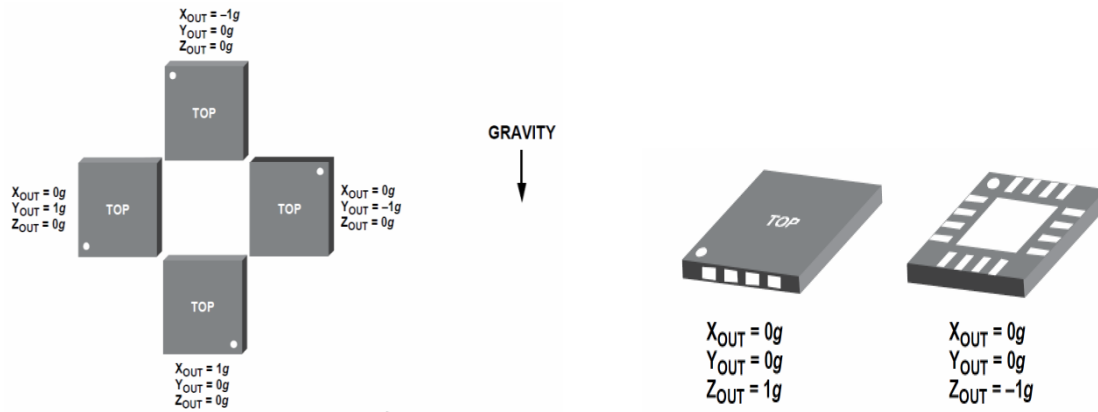


Figure II.12. Position de capteur et valeurs normalisées

II.6.4.6. Conversion analogique/ digitale

Les portes ADC UNO a une valeur de référence par défaut de 5V. Cela signifie que nous pouvons donner une tension d'entrée maximale de 5V pour la conversion de l'ADC à tout canal d'entrée. Étant donné que certains capteurs fournissent des tensions de 0-2.5V, avec une référence 5V nous obtenons une précision moindre, nous avons donc une instruction qui nous permet de modifier cette valeur de référence. Ainsi, pour changer la valeur de référence, nous avons ("**analogReference () ;**").

Par défaut, nous obtenons la résolution ADC du l'Arduino UNO qui est 10bits, cette résolution peut être modifiée à l'aide de l'instruction ("**analogReadResolution (bits) ;**"). Ce changement de résolution peut être utile dans certains cas.

Si les conditions ci-dessus sont définis par défaut, on peut lire la valeur de l'ADC du canal '0' en appelant directement la fonction "**analogRead (broche);**". La valeur de l'ADC peut être prise en un entier comme "**int ADCVALUE = analogRead (A0);** », Par cette instruction la valeur après ADC est stocké dans l'entier" ADCVALUE ". Par conséquent, la valeur de sortie est obtenue par l'équation (2.1)

$$\begin{aligned}
 &5V \longrightarrow 2^{10} - 2^0 \\
 &(\text{Valeur analogique}) \quad (\text{Valeur digitale}) \\
 &(\text{Valeur analogique}) = \frac{(\text{Valeur digitale}) \times 5V}{1023} \quad (2.1)
 \end{aligned}$$

II.6.4.7. Erreur de l'offset

Selon les fiches de données (datasheet) du capteur et comme montré par la **figure II.13** pour l'axe x, le décalage est presque **1.5V** pour les 3 axes x, y et z a la température ambiante (Lorsque l'accélération égal zéro, vous obtiendrez **1.5V** de la sortie du capteur).

Pour régler ce problème qui s'appelle problème de zéro ou offset, il suffit de soustraire cette valeur de la valeur mesure tel que:

$$(Valeur\ réelle) = (Valeur\ mesurée - 1.5)V$$

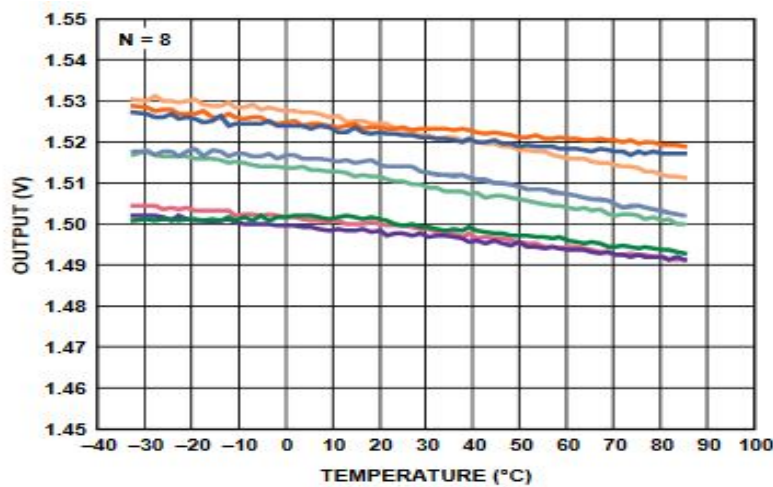


Figure II.13. Tension de sortie de l'axe x pour l'accélération = 0g

II.6.4.8. Sensibilité du capteur

La sensibilité du capteur est montrée par la figure II.14, pour toutes les axes de mesure une sensibilité de 300mV pour une variation de chaque '1g' dans l'accélération d'après le manuel de capteur. Alors la valeur réel a la sortie est égale : Valeur réel = Valeur réelle/0.300.

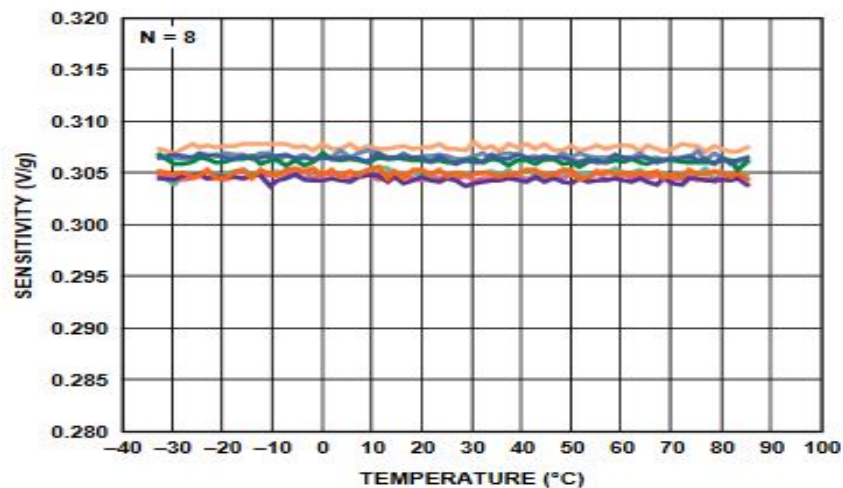


Figure II.14. Sensibilité de capteur

II.9. Conclusion

Ce chapitre explique la fonctionnalité et l'utilité de chaque composante dans la réalisation de ce projet. On conclue donc que toute les composantes utilisées sont disponibles dans le marché avec des prix raisonnable de tant plus que leur manipulation est facile surtout en consultant les guide d'utilisation (datasheet) et les tutoriels sur internet.

Chapitre III

Réalisation du prototype de la maquette

III.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, la discussion sera basée sur le développement de matériel et de logiciel. Il a impliqué la mise en œuvre, la fabrication, les essais et la modification du prototype. La réalisation a pour objectif de construire un prototype d'une maquette didactique qui peut effectuer les tâches suivantes :

1. Mesurer l'accélération en temps réel en fonction des vibrations.
2. Afficher le signal temporel de l'accélération à l'aide d'une interface développée sous Matlab ;
3. Transformer le signal temporel en signal fréquentiel..

III.2. CONCEPTION DU PROJET

Afin de simplifier la conception du prototype de la maquette didactique, la réalisation comprend deux parties : partie hardware et partie software.

III.2.1. Partie hardware

1°. Système à étudier

Pour rester dans le cadre des petits bancs d'essais didactiques pour vibrations, l'objet technique étudié est choisi pour se rapprocher le plus possible de la catégorie des machines tournantes. Ainsi, on a opté pour un ventilateur. Les ventilateurs sont des turbomachines qui font communiquer à l'air qui les entoure l'énergie cinétique nécessaire pour :

- Faire véhiculer l'air au travers une paroi (cas des ventilateurs de paroi),
- Faire véhiculer l'air dans une ou plusieurs conduites (cas des ventilateurs de conduite)
- Faire balayer l'air dans une cavité (espace ou local) assurant ainsi homogénéisation de l'air.

Pour notre projet on a opté pour un ventilateur centrifuge à carcasse en aluminium à cinq pales, utilisé dans les boîtiers des ordinateurs, afin d'assurer le renouvellement d'air, le refroidissement par extraction de l'air chaud et des poussières. Les principales caractéristiques techniques de cette gamme étant listées dans le **tableau III.1**, notre choix s'est porté sur le modèle N° **03** vu sa disponibilité sur le marché local. Pour notre réalisation, il s'agit du ventilateur illustré sur La **figure III.1**.

Tableau III.1.Caractéristiques techniques du ventilateur [23]

NO	Caractéristiques Dim	Tension [V]	Intensité [A]	Puissance [W]	Débit [m3/s]	Rotation [tr/min]	Palier
1	120 x 120 x 25 mm	220	0.10/ 0.09	19 /17	5.66 e-12 / 6.22 e-12	2200 / 2500	Lisse
2	120 x 120 x 25 mm	220	0.10 / 0.09	19 /17	5.88 e-12 / 6.45 e-12	2300 / 2600	Bille
3	120 x 120 x 38 mm	220	0.14 / 0.12	22 / 21	9.62 e-12 / 1.13 e-11	2600 / 3000	Lisse
4	120 x 120 x 38 mm	220	0.14 / 0.12	22 / 21	1.07 e-11 / 1.18 e-11	2700 / 3100	Bille

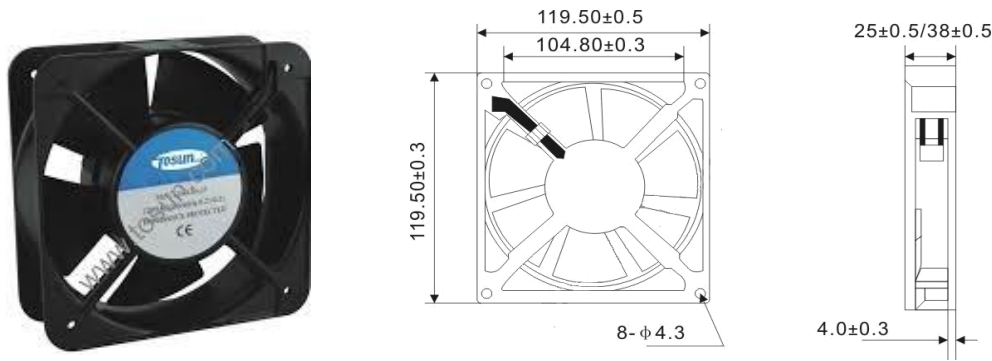


Figure III.1. Modèle de ventilateur (120 x 120 x 38mm) choisi pour l'étude de cas [23]

2°. Le câblage

Le montage se compose du ventilateur (système technique dont prévoit de mesurer les vibrations), d'une carte Arduino Uno, d'un accéléromètre ADXL335 et trois résistances servant à stabiliser le signal reçu par l'Arduino à travers les trois ports analogique A3, A4 et A5. Ce montage permet de capter et afficher l'accélération d'une machine suivant les trois direction X,Y et Z. Pour récupérer le signal, l'Arduino est connecté directement un PC par l'USB qui garantit l'échange de l'information entre l'Arduino et le PC et l'alimentation de l'ensemble Arduino-capteur. Le bouton "reset" sert à réinitialiser l'Arduino et recommencé le processus de nouveau. La figure III.2 représente le schéma de câblage entre la carte Arduino Uno et l'accéléromètre ADXL 335.

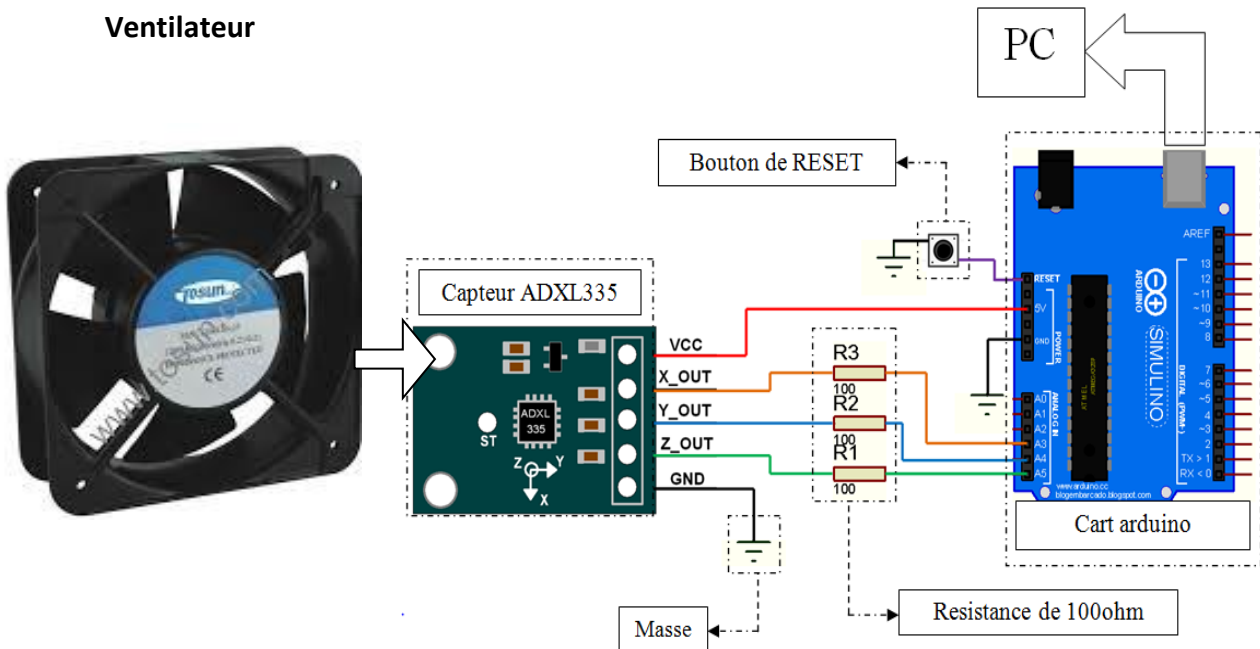


Figure III.2. Schéma de câblage de la maquette

3°. Montage de la maquette

La réalisation physique de la maquette, a nécessité **figure III .3** et **figure III.4** :

1. 01 socle en bois sur lequel seront monté le ventilateur et le boîtier métallique.
2. 02 équerres métalliques fixés sur le socle en bois et qui vont servir de support pour le ventilateur.
3. 01 boîtier métallique fixés sur le socle en bois et qui va servir de conteneur pour la carte Arduino,
4. 01 interrupteur électrique Marche/Arrêt pour faire démarrer et arrêter le ventilateur



Figure III.3. Montage de la carte Arduino Uno dans son boîtier .



Figure III.4. Montage maquette complète (Ventilateur, Carte Arduino, Accéléromètre).

III.2.2. Partie software

Pour la partie software, nous avons utilisé le logiciel MATLAB. C'est un environnement de calcul numérique construit autour d'un langage de script simple, ce qui rend MATLAB parfait pour les tests rapides et l'analyse des données. Dans notre cas, MATLAB a servi pour concevoir une interface simple et efficace afin de communiquer avec l'Arduino pour l'acquisition des signaux. Dans le programme, nous avons aussi intégré aussi la partie de traitement du signal tel que la conversion analogique -numérique, la transformé de fourrier ainsi que toutes les calculs numériques en terme d'offset et sensibilité. Le code source est divisé en deux parties:

- Partie 1: Interface graphique utilisateur (GUI)
- Partie 2: Calcul accélération, transformé de Fourier et affichage des résultats.

III.2.2.1 Interface graphique utilisateur (GUI: Graphical User Interface)

L'interface graphique utilisateur nous donne la boîte de dialogue pour choisir l'axe de suivi d'accélération. La programmation de l'interface graphique a été faite en exploitant le toolbox inclus dans MATLAB. le code source pour faire fonctionner la boit de dialogue est le suivant:

```

1. function varargout = dialog(varargin)
2. gui_Singleton = 1;
3. gui_State = struct('gui_Name', mfilename, ...
4. 'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
5. 'gui_OpeningFcn', @dialog_OpeningFcn, ...
6. 'gui_OutputFcn', @dialog_OutputFcn, ...
7. 'gui_LayoutFcn', [] ,...
8. 'gui_Callback', []);
9. if nargin && ischar(varargin{1})
10. gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
11. end
12. if nargout
13. [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
14. else
15. gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
16. end
17. function dialog_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
18. handles.output = hObject;
19. guidata(hObject, handles);
20. function varargout = dialog_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
21. varargout{1} = handles.output;

```

En plus pour commander les boutons du choix des axes, nous avons appliqué les instructions suivantes :

```

1. function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
2. function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
3. function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

Figure III.1, présente la boîte de dialogue "Axe suivi". Lorsqu'on clique sur la commande "exécuter", la boîte de dialogue s'affiche.

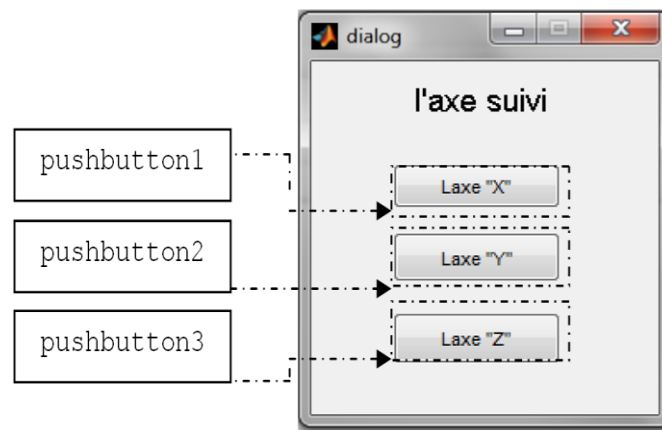


Figure III.3. Interface du programme

A partir de cette boîte on peut choisir l'axe dont on veut connaître l'accélération à partir du capteur. Il est très important que le capteur soit positionné dans la bonne direction de l'axe choisi (regarder les flèches d'orientation sur le capteur).

III.2.2.2 Calculs et affichage des résultats

1°. Acquisition du signal et calcul de l'accélération

La deuxième partie du code traite les calculs et affichage des graphes. Dans notre cas, l'Arduino a été utilisée pour l'acquisition du signal et le calcul de l'accélération.

- Les ports analogique A3, A4 et A5 sont configurés pour obtenir les valeurs des l'accélération en vibration du ventilateur respectivement suivant les axes X, Y et Z.
- La conversion analogique digitale (ADC) est indispensable pour visualiser la valeur de l'accélération.

$$a = (\text{valeur digital captée par Arduino}) * 4.8 \quad (3.2)$$

Avec : 4.8 mV est la valeur obtenu du a la résolution de l'Arduino qu'est 10 bits c'est-à-dire pour une valeur de 5V à l'entrée analogique, le pic affiche une valeur de $2^{10}-1 = 1023$.

- Après avoir obtenu la valeur analogique a_1 de l'accélération, il faut soustraire une valeur de 1.65 qui représente la correction d'offset ou décalage 0 (voir chapitre II). On obtient l'accélération corrigée a_2 :

$$a = a - 1.65 \quad (3.3)$$

- Comme la sensibilité du capteur vaut 0.300 (voir chapitre II), on divise la valeur a_2 donnée par la relation (3.2) sur la sensibilité on obtient :

$$a_3 = \frac{a_2}{0.300} \quad (3.3)$$

- Pour terminer les calculs, on a choisi de convertir la valeur obtenue a_3 pour l'exprimer dans le system international (en $m.s^{-2}$). donc on multiplie cette valeur par 9.8 :

$$a_4 = a_3 \times 9.8 \quad (3.4)$$

- Sous MATLAB, le code qui sert à calculer l'accélération suivant un axe (l'axe z par exemple) est listé comme suit :

```
%Précise l'entrée (port de USB) :
1. a=arduino('Com11');
%le temps du lecteur (en second) :
2. tmax = 25;
% le port logique de l'ARDUINO :
3. v(k) = ((readVoltage(a,'A5')-1.65)/0.300)*9.8;
```

2°. Traitement du signal capté

Comme notre objectif principale est d'obtenir un spectre fréquentiel de l'accélération, qui par la suite nous permet d'effectuer une analyse vibratoire niveau fréquentiel et détecter le défaut, cette étape fait appel à une technique numérique à savoir la transformé de fourrier. Cette dernière transforme le signal de l'accélération du domaine temporel au domaine fréquentiel et fournit les différentes fréquences lors du fonctionnement du système technique. Deux valeurs constantes à fixer indispensablement dans cette partie (voir chapitre I) :

- La première est la fréquence d'échantillonnage,
- La deuxième est le nombre d'échantillons

Pour un test simple (vibration à la main), juste pour tester la réponse du capteur, nous avons choisi une fréquence maximale de 223 Hz (un choix aléatoire), ce qui résulte une fréquence d'échantillonnage de 571 Hz et un nombre d'échantillons de 28550. La fonction « **FFT** » est une fonction dans MATLAB qui effectue la transformé de fourrier directement. Après avoir obtenu le spectre fréquentiel, nous avons ajouté une commande pour afficher les amplitudes des fréquences.

Le code MATLAB de cette partie est :

```
% transformation du signal (transforme de fourrier) :
Fs = 571;
T = 1/Fs;
L = length(v);
t = (0:L-1)*T;
ylabel('Z(t)')
Y = fft(v);
P2 = abs(Y/L);
P1 = P2(1:L/2+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
f = Fs*(0:(L/2))/L;
stem(f,P1,'k','Marker','None','LineWidth',3);
grid minor
axis([49 100 0 0.1])
title('Single-Sided Amplitude Spectrum of Z(t)')
xlabel('f(Hz)')
ylabel('|P3(f)|')
P1 = P2(1:L/2+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
```

3° Affichage des résultats

On termine la partie de programmation par l'affichage des résultats obtenus sous forme graphique. Deux allures seront produites en temps réel, la première c'est l'accélération en $m.s^{-2}$ en fonction du temps et le deuxième représente les amplitudes des spectres en Hz. Afin de tester l'efficacité de l'appareil en termes de montage et de programme, des tests aléatoires ont été effectués. Les **figures III.4, III.5**, représente les résultats des premiers tests.

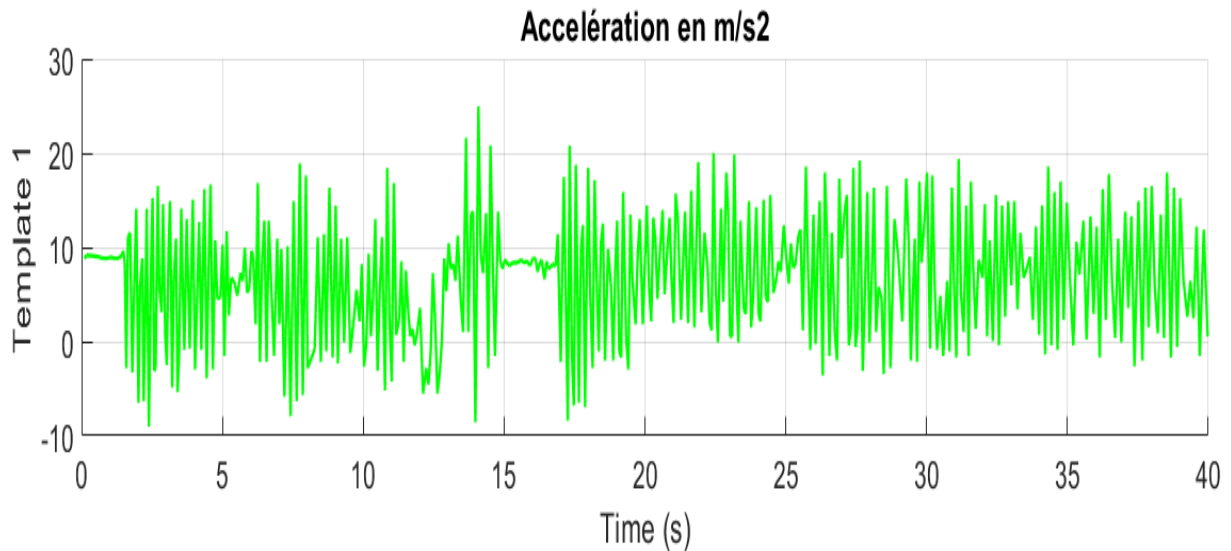


Figure III.4. Affichage sous Matlab de l'accélération

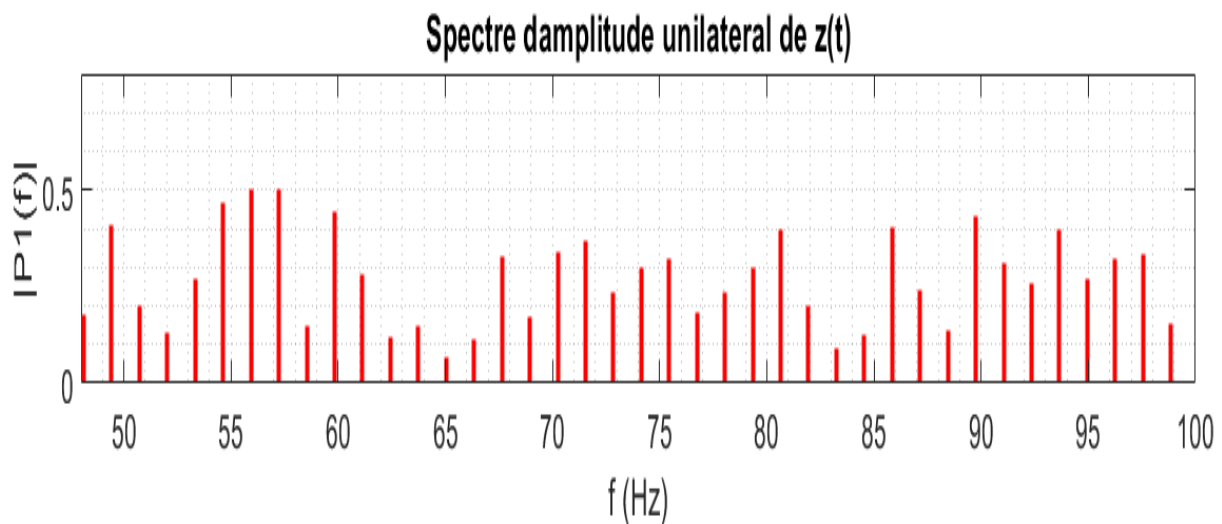


Figure III.5. Spectre fréquentiel de l'accélération

III.5. Test de l'appareil

Après avoir confirmé l'efficacité de notre projet par récupération du signal à vide, nous avons testé ce dernier sur un petit mixeur. On a gardé la même fréquence d'échantillonnage, pour rester dans le premier intervalle des fréquences montrées par la figure I.14 dans le premier chapitre I.

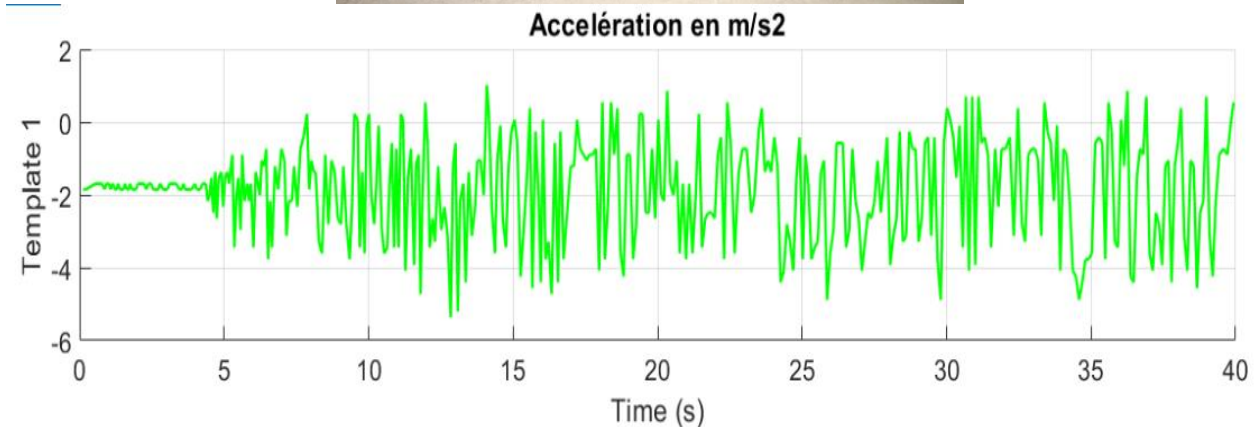


Figure III.7: accélération du mixeur en fonction du temps

La **figure III.7**, montre que le signal de l'accélération est nul avant de secouer manuellement le. Dès que nous commençons à faire bouger le mixeur, des accélérations aléatoires sont enregistrés, ce qui montre la capacité de notre montage à détecter la moindre variation de l'accélération. Après avoir obtenu le résultat de l'accélération dans l'échelle temporelle, le programme convertit le signal automatiquement pour montrer les amplitudes des fréquences du signal obtenu. La **figure III.8**, montre le spectre fréquentiel de ce signal.

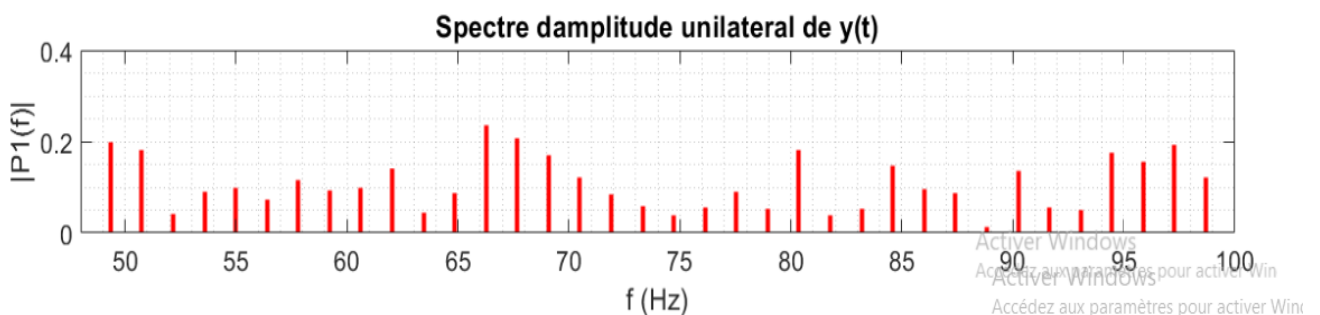


Figure III.8. Spectre fréquentiel de l'accélération d'un mixeur

D'après le spectre obtenu, on peut remarquer qu'il n'y a pas des amplitudes élevées, et presque toutes les fréquences sont dans le même intervalle, ce qui montre clairement que ces vibrations sont dues à des perturbations extérieures faibles.

III.6. RESULTATS OBTENUS

Après avoir effectué des manipulations à vide pour tester la réponse et l'affichage des signaux captés par notre montage, les résultats qui suivent sont les réponses vibratoires du système étudié (ventilateur). Les résultats des accélérations vibratoires du ventilateur sont présentés suivant les trois directions. Ainsi:

1° Mesure suivant l'axe « X »

La **figure III.11** représente le signal temporel concernant la variation de l'accélération en (m/s^2) dans une durée de 25s. On note que le signal varie dans le même intervalle autour d'un même point d'accélération ($54 m/s^2$) d'où le cycle se répète périodiquement cela nous informe que le ventilateur est en bon fonctionnement. Cette résultat est confirmé par le spectre fréquentiel, où on voit aussi dans la **figure III.12** les spectres d'amplitude ne change pas trop et presque toutes les valeurs sont en dessous de (0.07) d'amplitude et c'est la preuve qu'il n'y a pas des problèmes dans le ventilateur.

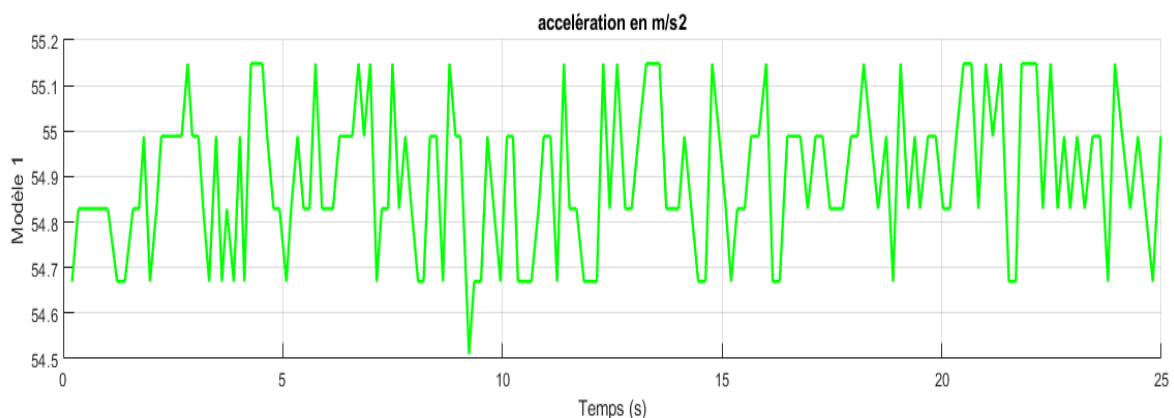


Figure III.11. Accélération d'un ventilateur suivant « X ».

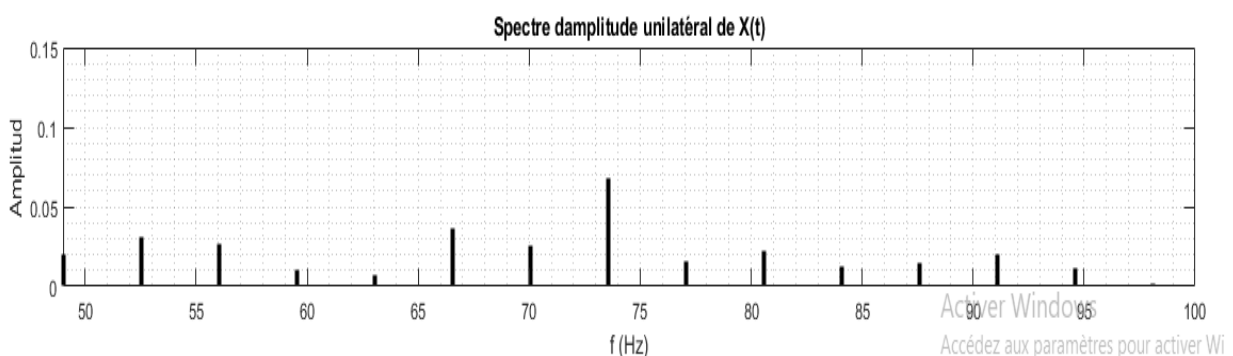


Figure III.12. Spectre fréquentiel de l'accélération d'un ventilateur suivant l'axe « X »

2°. Suivant l'axe « Y »

D'après la **figure III.13**, l'accélération du ventilateur continu a augmenté, cette augmentation de 49 m/s^2 jusqu'à 53 m/s^2 peut se traduire par un fonctionnement anormal et la possibilité de présence de vibration sur l'axe Y.

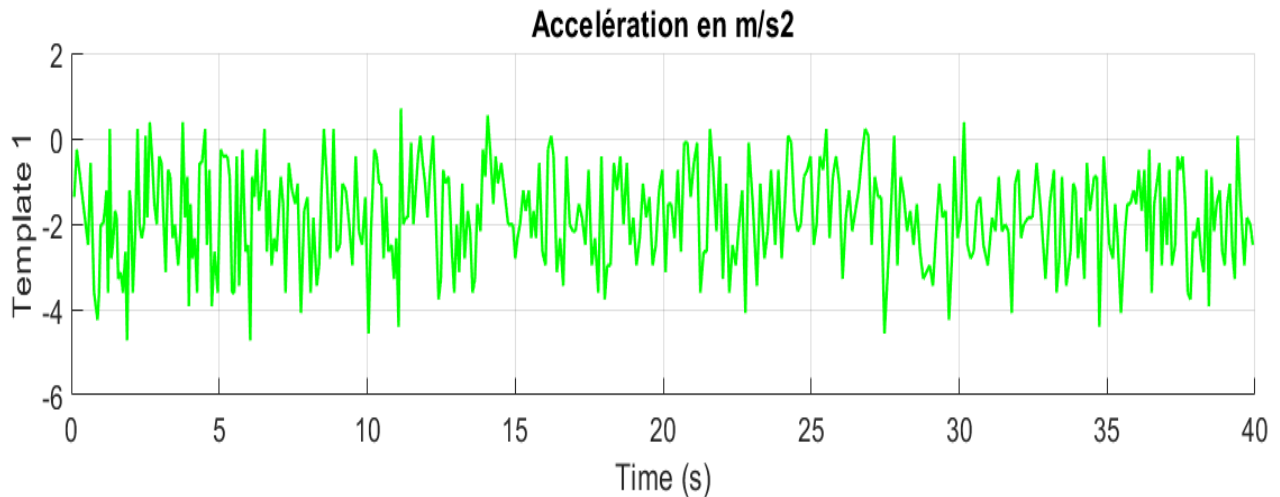


Figure III.13. Accélération d'un ventilateur suivant « Y ».

Passant au spectre extrait à partir de l'accélération suivant l'axe Y et montré dans la figure III.14, des amplitudes de fréquence plus grandes que celles sur l'axe X ont fait leurs apparitions. D'autre part, ces amplitudes sont presque répétitives, ce qui explique l'absence de tout phénomène vibratoire anormal.

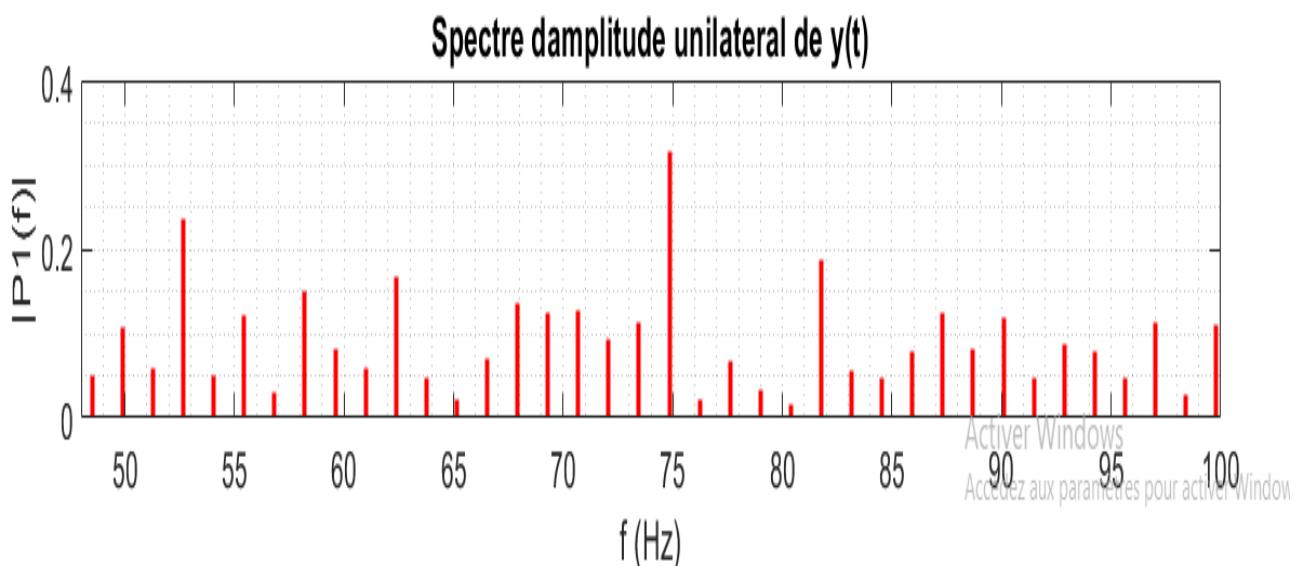


Figure III.14. Spectre fréquentiel de l'accélération d'un ventilateur suivant « Y ».

3°. Suivant l'axe « Z »

Pour l'axe Z, l'accélération sur ce dernier reste toujours sur la même valeur, (les variations dues à la sensibilité du capteur) ce qu'est montré clairement par la figure III.15.

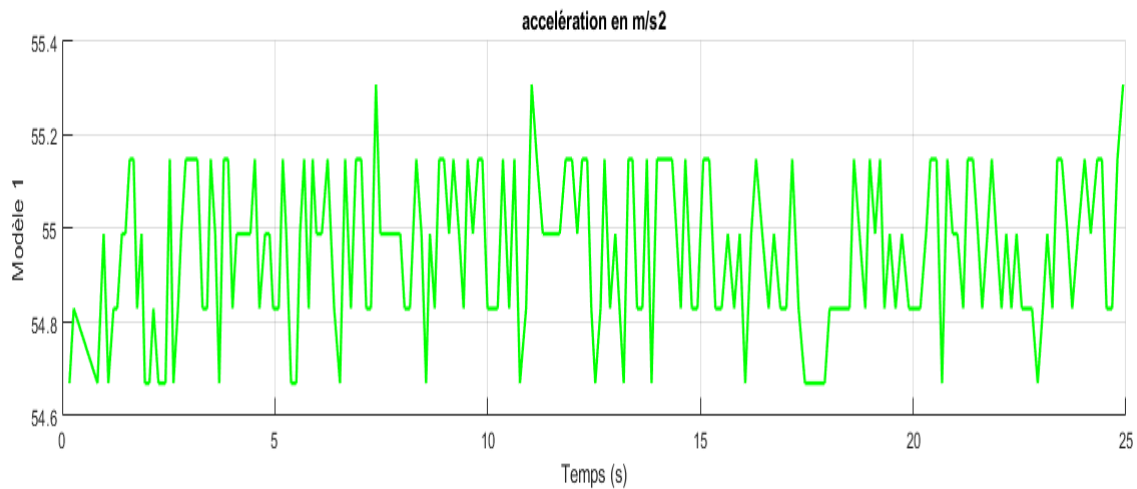


Figure III.15. Accélération d'un ventilateur suivant « Z ».

Sur la **figure III.16** on voit aussi que dans les spectres d'amplitude ne change pas trop presque tous les valeurs sont au-dessous de (0.05) d'amplitude et sa preuve que le fonctionnement du ventilateur est normale.

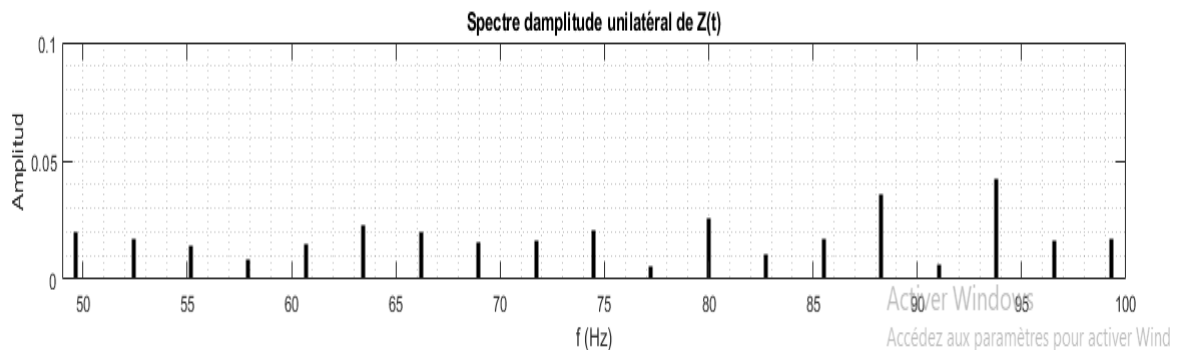


Figure III.16. Spectre fréquentiel de l'accélération d'un ventilateur suivant « Z ».

III.8. CONCLUSION

- Au terme de ce chapitre, nous avons pu en premier lieu réussir à réaliser le montage de notre maquette didactique pour la détection des vibrations en utilisant un accéléromètre ADXL335, la carte Arduino pour l'acquisition des signaux vibratoires et le logiciel Matlab pour le traitement des données du signal vibratoire.
- Une fois le montage de notre maquette didactique fait, nous avons pu la faire fonctionner à travers des essais à vide, puis à travers des mesures vibratoires effectuées sur un ventilateur neuf et saint qu'on peut trouver dans le commerce et dont les caractéristiques sont connues.

- Les mesures recueillies sous forme de signal temporel et fréquentiel peuvent nous permettre par la suite de diagnostiquer l'état vibratoire du ventilateur en cas où il présente un défaut.
- En fin, on peut dire que la réalisation d'une telle maquette didactique élémentaire pour l'analyse vibratoire ne nécessite pas de grands moyens matériels, mais juste des composants électroniques qu'on peut se procurer dans le commerce. Dans le cas où on ne dispose pas d'un logiciel sous licence, on peut toujours le remplacer par des applications open source et créer des prototypes à l'usage des applications pédagogiques pour mettre en évidence la phénoménologie vibratoire.

Conclusion
générale

En conclusion, la maquette didactique de détection et d'analyse spectrale des vibrations a été conçue avec succès là où il peut afficher les signaux d'accélération temporelle et fréquentielle pour chaque axe de l'espace. La transformé de fourrier qui par la suite montre les spectres peut être vu clairement sur le pc par l'intermédiaire d'une interface Matlab. Il aide les étudiants à comprendre la technique de détection des défauts dans la machine par cette méthode.

Dans ce projet, les recherches liées concernant la maintenance et l'analyse vibratoire sont bien informés de toutes les revues et thèses connexes. Plus d'informations et de nouvelles connaissances au sujet de cet appareil sont apprises tout au long du semestre. Les plateformes comme l'Arduino soft et hard est une nouvelle fondamentale qui est amusants à apprendre car il est un outil convivial, moins cher, et seulement besoin d'une connexion de circuit simple à traiter avec elle. Ce sujet est très important pour nous-mêmes et pour nos collègues qui manipule les différents TP dans le module "analyse des vibrations" durant le parcours de génie mécanique.

Il y a plusieurs recommandations qui peuvent être faites pour améliorer cet appareil dans les travaux futurs. Ces recommandations sont spécifiquement sur la conception du matériel.

La conception d'ensemble n'est pas optimale. Le conseil proto devrait être remplacé par la carte de circuit imprimé pour fournir plus d'efficacité de mesure des signaux. En raison de composants connectés par la plaque d'essai du prototypage, les données ne sont pas très exactes et précises. Par conséquent, pour éviter cette erreur ne se reproduise, un prototype avec la carte complète des PCB doit être envisagé. L'Arduino Wifi interface ou sans fil peut être ajouté au prototype pour produire un appareil sans fil qui peut surveiller l'état de la machine en temps réel via une connexion Internet par exemple. Les données peuvent également être illustrées dans le format alphanumérique. Cela aidera l'étudiant à comprendre facilement la traduction du spectre et par la suite comprendre le défaut facilement.

Dans un cadre plus large, cet appareil doit être considéré comme utilisé dans l'industrie aussi

*Références
bibliographiques*

-
- [1] M. Sonowal, B. B. Gogoi, M. Boruah, J. K. Barman, "Health Monitoring of Induction Motor through Vibration Analysis", ADBU Journal of Electrical and Electronics Engineering, Vol 3, n° 1, 2019.
- [2] M. Varanis, A. L. Silva, P. H. A. Brunetto, R. F. Gregolin, "Instrumentation for mechanical vibrations analysis in the time domain and frequency domain using the Arduino platform", Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 38, n° 1, 2016.
- [3] Solène Kojtych, « Mesures d'accélération et système d'acquisition par microcontrôleur Arduino Uno », Rapport Technique, École Polytechnique de Montréal. 2019.
- [4] Hég Jean, « Pratique de la maintenance préventive ». Edition Dunod, 2002.
- [5] Boukhobza Mohamed EL Habib, « Application du traitement du signal pour le suivi des défauts de composants mécaniques soumis à des vibrations », Mémoire de Magister, USTO, 2010.
- [6] L. Bourgain, R. Dart, J. Bourgain, " Machines tournantes et circuits pulsés", Edition Dunod, Paris 1988.
- [7] A. Boulenger, C. Pachaud, « Surveillance des machines par analyse des vibrations », Dunod, Paris ,2009.
- [8] C. Scheffer, « Pratical Mechinery Vibration Annalysis and Predictive Maintenance », Newnes, oxford, 2004.
- [9] Philippe Arqués, « Diagnostic prédictif de l'état des machines » Edition Masson, Lyon 1996.
- [10] G. Collienne, « Comparaison d'un capteur sonore et d'un capteur d'accélération dans le cadre de la maintenance vibratoire », travail de fin d'études, Gramme Liège, 2004.
- [11] Nabti Mohamed Tahar, « Etude de l'évolution des indicateurs spectraux et spectraux dans la détection des défauts mécaniques », Mémoire de Magister, UFAS, Algerie, 2011.
- [12] Jean-philippe muller, « cours Analyse spectrale », Physique appliquée, juillet 2002.
- [13] Landolsi Fouad, «Cours Technique Surveillance Analyse-Spectrale», Vol B; n° 671, édition technique de l'ingénieur, 2001.
- [14] Gohil Chetan, « Les fondamentaux de l'analyse vibratoire : acquisition du signal temporel », Programme de formation ONEPROD ISO 18436, 2019.
- [15] S. Landrault, H. Weisslinger, « Arduino : Premiers pas en informatique embarquée », blog d'Eskimon, 2014.
- [16] Claude Guéganno, « Arduino: approche «temps-réel», Support pour s'initier à électronique et en programmation avec Arduino, 2017.
- [17] Erik Bratmann, « le grand livre de d'Arduino », 3^{ème} Edition, Eyrolles, 2014.
- [18] C. Nizar, C. Amin, « Commande d'un système thermique à l'aide de la carte ARDUINO UNO », Formation : Arduino↔Matlab/Simulink, 2014.
-

- [19] BEY Mohamed, «Cours Capteur et technique de mesure », Université Ibn Khaldoun Tiaret, Algerie, 2018.
- [20] G. Asch-coll, « Les capteurs en instrumentation industrielle », Dunod, Paris, 2010.
- [21] ADXL335 (datasheet), disponible sur <https://www.analog.com/en/products/adxl356.html>
- [22] Daniel Le Guern, « Guide D'utilisation d'un Module de Stabilisation Intègre (Gyroscope + Accelerometre) en Application Embarquée », cours en ligne, disponible sur <http://starlino.com>, 2018.

في هذا المشروع ، قمنا بوصف جهاز كشف جديد لقياس الاهتزازات ومراقبة حالة الآلات. هنا قمنا بدمج مقياس التسارع مع لوحة لأردوينو متحكم. عندما يجمع المستشعر إشارات التسارع ؛ ويمكن إرسال هذه البيانات المخزنة في وحدة التحكم الدقيقة إلى أجهزة الطرف الثالث (كمبيوتر محمول ، كمبيوتر شخصي ، وما إلى ذلك) لإجراء تحليل أكثر تعمقاً للإشارة تسمى التحليل الطيفي..

Résumé

Dans ce projet, nous avons décrit un nouvel appareil de détection pour la mesure des vibrations et la surveillance de l'état des machines. Ici, nous avons intégré un accéléromètre avec la carte microcontrôleur Arduino. Lorsque le capteur collecte les signaux de l'accélération; et ces données stockées dans le microcontrôleur peuvent être envoyées à des appareils tiers (ordinateur portable, PC, etc.) pour une analyse plus approfondie du signal dite analyse spectral.

Abstract

In this project, we have described a new detection device for measuring vibrations and monitoring the condition of machines. Here we have integrated an accelerometer with the Arduino microcontroller board. When the sensor collects acceleration signals; and these data stored in the microcontroller can be sent to third party devices (laptop, PC, etc.) for a more in-depth analysis of the signal called spectral analysis.
