

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 RÉALISATION D'UNE MAQUETTE  
DIDACTIQUE POUR ANALYSE VIBRATOIRE DES  
MACHINES TOURNANTES EN MESURE GLOBALE**

Préparé par :

**MECHTA Soumia et EL-EUDJAMA Marwa**

Soutenu publiquement le : 29 / 09 / 2020, devant le jury composé de :

<b>M. DEBBIH .S</b>	Maître assistant "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Président
<b>M. BOUZIDANE .A</b>	Professeur (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
<b>M. SLIMANI .H</b>	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
<b>M. GUEMMOUR M.B</b>	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Encadreur

Année universitaire : 2019 - 2020

---

## ***REMERCIEMENTS***

On tient avant tout à remercier chaleureusement Messieurs **GUEMMOUR Mohamed Boutkhil**, Maître de conférences (B) et **BEY Mohamed** Maître assistant classe (B) 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 **DEBBIH Senouci** maître assistant à l'université Ibn-Khaldoun de Tiaret pour avoir accepté de présider le jury de notre mémoire.

Nos sincères remerciements vont également à Monsieur **BOUZIDANE Ahmed** Professeur ainsi qu'à Madame **SLIMANI Halima** maître de conférences tous les deux enseignants 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.

---

## TABLE DES MATIERES

Introduction générale .....	2
<b>Chapitre 01 : Vibration mécanique et application</b>	
1.1 Introduction .....	4
1.2 Application des vibrations mécanique.....	5
1.3 Sources des vibrations mécaniques.....	7
1.4 Vibration mécanique.....	8
1.4.1 Définition.....	8
1.4.2 Réponse vibratoire .....	8
1.4.2.1 Position du problème .....	8
1.4.2.2 Classification des réponses vibratoires.....	9
1.4.2.3 Représentation graphique.....	11
1.5.1 Réponse vibratoire simple.....	15
1.5.2 Réponse vibratoire périodique composée.....	16
1.5.3 Réponse vibratoire aperiodique transitoire.....	17
1.5.4 Réponse vibratoire aperiodique aléatoire.....	17
<b>Chapitre 02 : Chaîne d'acquisition des données</b>	
2.1 Introduction .....	20
2.2 Chaîne d'acquisition des données.....	21
2.2.1 Définition.....	21
2.2.2 Structure de base d'une chaîne d'acquisition .....	21
2.2.3 Classification des chaînes d'acquisition .....	22
2.2.3.1 Système d'acquisition analogique .....	22
2.2.3.2 Système d'acquisition numérique .....	23
2.2.4 Architecture des chaînes d'acquisition de données .....	24
2.3 Capteurs .....	26
2.3.1 Définition .....	26
2.3.2 Rôle des capteurs .....	27
2.3.3 Classification des capteurs.....	27
2.3.4 Choix d'un capteur.....	28
2.3.5 Les capteurs de vibrations.....	28
2.3.5.1 Types de capteurs de vibrations .....	28
2.3.5.2 Caractéristiques des capteurs de vibrations .....	28
2.3.5.3 Capteurs en vibrations .....	29
2.3.5.3.1 Les proximètres (capteurs de déplacements) .....	29
2.3.5.3.2 Les vélocimètres (capteurs de vitesses) .....	30
2.3.5.3.3 Les accéléromètres (capteurs d'accélérations) .....	30
2.3.5.4 Montage du capteurs de vibration .....	32

---

## Chapitre 03 : Réalisation pratique et application

3.1	Introduction .....	34
3.2	Le matériel .....	35
3.2.1	Le système étudié .....	35
3.2.2	Plateforme Arduino .....	36
3.2.2.1	Le projet Arduino .....	36
3.2.2.2	Les cartes Arduino .....	37
3.2.2.3	Critère de choix d'une platine Arduino .....	38
3.2.2.4	Carte Arduino Uno .....	38
3.2.3	L'accéléromètre.....	42
3.3	Logiciel .....	43
3.4	Mesure vibratoire en niveau global .....	45
3.4.1	Principe .....	45
3.4.2	Choix de la grandeur à mesurer .....	45
3.5	Prototype .....	46
3.5.1	Le code source .....	46
3.5.2	La maquette didactique .....	48
3.6	Déroulement des essais .....	49
3.6.1	Montage de l'accéléromètre .....	49
3.6.2	Mesure du RMS .....	49
3.6.2.1	Essai sans défauts de balourds .....	49
3.6.2.2	Essai avec défaut de balourd .....	51
3.7	Conclusion .....	53
	Conclusion générale .....	55
	Références bibliographiques .....	57
	Annexe .....	59
	Résumé .....	60

---

## LISTE DES FIGURES

Numéro	Titre	Page
Figure 1.1	<i>Variables qui influencent la réponse vibratoire d'un système mécanique</i>	8
Figure 1.2	<i>Réponse vibratoire d'une poutre à une excitation harmonique</i>	10
Figure 1.3	<i>Réponse impulsionnelle acoustique d'une salle</i>	10
Figure 1.4	<i>Vibration apériodique</i>	11
Figure 1.5	<i>Représentation temporelle d'une réponse vibratoire simple</i>	11
Figure 1.6	<i>Représentation fréquentielle d'une réponse vibratoire simple</i>	12
Figure 1.7	<i>Représentation vectorielle d'une réponse vibratoire simple</i>	12
Figure 1.8	<i>Représentation complexe d'une réponse vibratoire simple</i>	12
Figure 1.9	<i>Représentation graphique de diagramme de Bode</i>	13
Figure 1.10	<i>Représentation graphique de diagramme de Nyquist</i>	14
Figure 1.11	<i>Représentation graphique des fréquences harmoniques</i>	16
Figure 1.12	<i>La décomposition d'une vibration harmonique périodique par FFT</i>	16
Figure 1.13	<i>Représentation graphique d'une vibration transitoire</i>	17
Figure 1.14	<i>Représentation graphique de la périodicité d'un signal</i>	18
Figure 2.1	<i>Place du système d'acquisition de données dans la chaîne d'acquisition</i>	21
Figure 2.2	<i>Principe de la chaîne d'acquisition analogique</i>	23
Figure 2.3	<i>Principe de la chaîne d'acquisition numérique</i>	24
Figure 2.4	<i>Architecture d'une chaîne d'acquisitions de données type A</i>	24
Figure 2.5	<i>Architecture d'une chaîne d'acquisitions de données type B</i>	25
Figure 2.6	<i>Architecture d'une chaîne d'acquisitions de données type C</i>	25
Figure 2.7	<i>Architecture d'une chaîne d'acquisitions de données type D</i>	26
Figure 2.8	<i>Schéma d'un système de conversion d'énergie</i>	27
Figure 2.9	<i>Montage d'un proximètre</i>	29
Figure 2.10	<i>Coupe longitudinale d'un vélocimètre</i>	30
Figure 2.11	<i>Coupe longitudinale d'un accéléromètre</i>	31
Figure 2.12	<i>Courbe de réponse d'un accéléromètre</i>	31
Figure 2.13	<i>Fixation du capteur sur palier</i>	32
Figure 2.14	<i>Choix directionnel pour la prise de mesure</i>	32
Figure 2.15	<i>Direction favorisée pour transmission par liens flexibles</i>	33
Figure 3.1	<i>Le modèle de ventilateur</i>	35
Figure 3.2	<i>Créateurs du projet Arduino</i>	36
Figure 3.3	<i>La famille des platines Arduino</i>	37
Figure 3.4	<i>Aperçu d'une Arduino Uno à micro-contrôleur DIP et SMD</i>	38
Figure 3.5	<i>Description d'une Arduino Uno SMD</i>	39
Figure 3.6	<i>Schéma simplifié d'une Arduino Uno SMD</i>	40
Figure 3.7	<i>Quelques shields pour module Arduino Uno</i>	41
Figure 3.8	<i>Caractéristiques du module d'accéléromètre GY-61ADXL 335 3-axes</i>	42
Figure 3.9	<i>Diagramme blocs fonctionnel du ADXL335-3axes</i>	43
Figure 3.10	<i>Vue d'ensemble du logiciel Arduino</i>	44

---

Figure 3.11	<i>Interface du logiciel Arduino</i>	44
Figure 3.12	<i>Montage de la maquette</i>	48
Figure 3.13	<i>Montage et localisation du capteur ADXL</i>	49
Figure 3.14	<i>L'affichage des valeurs RMS</i>	50
Figure 3.15	<i>Valeurs RMS de l'essai sans défauts</i>	50
Figure 3.16	<i>L'affichage des valeurs RMS</i>	51
Figure 3.17	<i>Valeurs RMS de l'essai avec balourd (cas 1)</i>	51
Figure 3.18	<i>Valeurs RMS de l'essai avec balourd (cas 2)</i>	52

---

# Liste des tableaux

<b>Numéro</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
Tableau1.1	<i>les différentes formes de signaux vibratoires</i>	10
Tableau1.2	<i>Techniques de mesure du niveau global</i>	19
Tableau2.1	<i>Caractéristiques métrologiques en fonction des conditions imposées</i>	28
Tableau3.1	<i>Caractéristiques techniques du ventilateur</i>	35
Tableau3.2	<i>Choix d'une platine Arduino en fonction des objectifs recherchés</i>	38
Tableau3.3	<i>Caractéristiques d'une Arduino Uno SMD</i>	39
Tableau3.4	<i>Domaine de surveillance des indicateurs vibratoires</i>	46

---

---

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

---

---

Les machines tournantes jouent un rôle souvent stratégique dans notre vie. A l'image d'une presse dans une papeterie ou d'une turbine dans une centrale électrique, elles font partie de ces équipements que l'on ne peut pas se permettre d'immobiliser à tout moment. Pour prévenir les défaillances, il existe heureusement des outils de surveillance puissants, tels que l'analyse vibratoire.

Notre travail s'intègre dans un contexte pédagogique, en relation avec la spécialité de la maintenance prédictive et plus particulièrement celui de l'analyse vibratoire

Le présent mémoire s'inscrit dans le cadre de notre projet de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de master en Génie mécanique filière électromécanique option Maintenance Industrielle.

L'analyse des vibrations est un outil puissant et complexe .C'est l'un des piliers de la maintenance; l'analyse des vibrations est sans doute la technique la plus diversifiée, la mieux codifiée et celle qui permet, sur les machines tournantes, d'aller de plus loin dans le diagnostic. Dans ce travail, nous proposons la conception et la réalisation d'une maquette didactique pour analyse vibratoire des machines tournantes au niveau global .Notre système est constitué à base d'une carte Arduino UNO et elle est programmable selon la puissance de chaque machine (moyenne machine pour notre cas ).

Pour ce faire, notre mémoire a été structuré en trois chapitres. Le premier chapitre est consacré aux vibrations mécaniques et ses différents domaines d'applications ainsi que ses sources. .Le deuxième chapitre présente la chaine d'acquisition et ses différentes étapes. Enfin dans le troisième chapitre nous présentons notre maquette didactique réalisée à base d'une carte Arduino UNO en décrivant ses différentes parties et leur fonctionnement.

---

*Chapitre 01*

---

VIBRATIONS MÉCANIQUES  
ET  
APPLICATIONS

---

## 1.1. INTRODUCTION

Pour un ingénieur en maintenance industrielle, l'état opérationnel d'une machine ayant des organes et des pièces mobiles, est influencé par des effets dynamiques internes, qui se caractérisent par des niveaux plus ou moins importants. D'une manière générale, le problème le plus courant qui se pose à l'ingénieur de maintenance, concerne l'étude des effets dynamiques inhérents aux systèmes mécaniques.

Parmi les effets dynamiques, il y a les vibrations mécaniques. Ces dernières, se manifestent lors de la dynamique des pièces et des organes mobiles de la machine et qui se propagent dans les structures qui sont reliées ou avoisines cette machine. Dans les secteurs tels que l'industrie, les services et de la recherche, les phénomènes vibratoires sont toujours au cœur des préoccupations des ingénieurs et des techniciens des bureaux d'études, qui ont pour activité la conception et la mise en œuvre des machines et des circuits pulsés.

En pratique, une bonne conception fournira de faibles niveaux vibratoires dans une machine. Cependant, en vieillissant, les fondations de la machine travaillent, les pièces se déforment et s'usent, et de légers changements dans ses propriétés dynamiques apparaissent. Alors, les arbres se désalignent, les paliers s'usent, les rotors se déséquilibrent, les courroies se détendent, les jeux augmentent. Tous ces facteurs se traduisent par une augmentation de l'énergie vibratoire qui excite les résonances et ajoute une charge dynamique considérable aux différents organes de la machine.

Pour caractériser l'état de bon fonctionnement de certains composants mécaniques constituant le système mécanique analysé, on a besoin de recueillir lors des campagnes de mesures leurs réponses vibratoires. Ces dernières sont porteuses d'informations capitales sur l'état de santé des différents composants, pièces ou organes du système mécanique. Les réponses vibratoires font ensuite l'objet d'une analyse vibratoire grâce à la quelle il est possible de détecter les composants défectueux et éventuellement de les localiser. Lorsqu'un certain seuil (correspondant à un niveau de vibration limite) fixé est atteint, il est possible d'estimer la durée de vie résiduelle du composant dans les conditions de fonctionnement données à partir de la connaissance des lois de dégradation et d'endommagement.

## 1.2. APPLICATIONS DES VIBRATIONS MECANIQUES

Les vibrations Mécaniques sont mesurées à des fins très diverses. En général, toute vibration non contrôlée est un phénomène indésirable qui augmente le bruit ou cause des défaillances mécaniques prématurées. Huit grands domaines de mesure vibratoire peuvent être distingués:

### 1°. Analyse structurale[4]

Il s'agit d'une méthode expérimentale performante se basant sur les mesures des vibrations pour déterminer le comportement dynamique d'une structure, allant des petites pales de turbine aux grands ponts. En utilisant un capteur de force et un accéléromètre, le signal d'excitation et la réponse vibratoire de la structure sont mesurés simultanément à l'aide d'un analyseur bi-canal ou multivoie.

### 2°. Test de vibration[4]

Pour valider la tenue réelle d'un produit à l'environnement et donc sa conception, le test de vibration est pratiqué en soumettant une structure (une caisse automobile par exemple) à de hauts niveaux vibratoires avec un excitateur vibratoire. Le niveau de vibrations est maintenu constant dans des gammes de fréquence définies. Les informations sur la réponse fréquentielle de la structure sont obtenues.

### 3°. Surveillance de l'état des machines et diagnostic des défauts[4]

Dans sa forme la plus simple, une mesure du niveau global de vibration d'une machine est utilisée afin de signaler tout problème imminent. En effet, les forces internes d'une machine se caractérisent par des niveaux plus ou moins importants suivant son état (déséquilibre par exemple). Cependant, de plus amples informations sont souvent requises pour une détection fiable et précoce d'un grand nombre de défauts : Signatures fréquentielles de base et avancées. Cette technique (décrite plus loin) consiste en la mesure du spectre fréquentiel caractéristique des vibrations d'une machine en bon état, et de la surveillance de tout changement concernant les composantes spectrales. De tels changements sont le reflet d'une modification tant des éléments tournants que de la structure, et permettent le diagnostic de défauts.

### 4°. Mesure des vibrations appliquées à l'homme[4]

Ce domaine concerne la mesure des vibrations transmises à l'homme. Ces vibrations peuvent provenir, par exemple de véhicules ou d'outils à main portatifs. Les niveaux de vibrations mesurées sont ainsi modifiés pour satisfaire au confort humain et aux critères de santé stipulés dans les normes internationales (ISO 2631, UIC 513).

**5°. Détection de pièces perdues ou de corps étrangers[5]**

L'analyse vibratoire est utile comme outil de diagnostic pour la localisation de pièce perdue ou de corps étranger dans les conduites, les viroles, les processus en ligne, etc.. Cette technique a été utilisée avec succès dans les industries nucléaires et non nucléaires.

**6° Contrôle du bruit[5]**

Les normes industrielles attachent une très grande importance concernant les niveaux acceptable du bruit à l'intérieur d'une installation. L'analyse vibratoire peut être effectuée afin d'isoler la source du bruit généré par les équipements de l'installation industrielle. La capacité à isoler la source du bruit anormal, permet de diminuer la pollution sonore et préserver la santé des travailleurs.

**7°. Détection des fuites [5]**

Dans beaucoup d'industries, les fuites dans les cuves, les réservoirs, les accumulateurs ainsi que dans les dispositifs tel que les soupapes et les valves constituent un sérieux problème. Le changement et la variation des vibrations, peuvent être utilisé pour détecter les fuite et isoler leur source. Le système de détection des fuites utilise un accéléromètre monté à l'extérieur de la structure à surveiller. Ceci permet au profile de vibration d'être surveillé afin de détecter seulement les fréquences générées par l'écoulement ou la fuite.

**8°. Ingénierie et conception de machine [5]**

Les données de vibrations sont devenues une partie importante dans l'ingénierie et la conception de nouvelles machines et de nouveaux systèmes mécaniques. Les données issues à partir de machines existantes, peuvent être extrapoler pour former la base d'une nouvelle conception préliminaire. Les essais sur prototype d'une nouvelle machine ou d'un nouveau système mécanique, permet à cette conception préliminaire d'être achevée et finalisée, et les données de vibrations obtenues à partir des essais seront ajoutés à la base de données existante.

### 1.3. SOURCES DES VIBRATIONS MECANIQUES

Les vibrations mécaniques peuvent être générées par différents mécanismes excitateurs ayant comme source différentes formes d'énergie [2] :

#### 1. Mécanismes excitateurs d'origine mécanique:

Ce type de mécanismes excitateurs, est retrouvé généralement dans les systèmes de transmission de puissance des systèmes techniques à dominante mécanique tels que les machines outils, les moteurs thermiques, les concasseurs, les broyeurs, etc..... Ces excitateurs ont pour origine les phénomènes suivants:

- *Le balourd,*
- *Le désalignement des arbres et des paliers*
- *L'engrènement des roues dentées,*
- *Les roulements,*
- *Les transmission par courroies, et par chaînes*
- *Le desserrage*

#### 2. Mécanismes excitateurs d'origine électrique

Ce type de mécanismes excitateurs est retrouvé dans les machines électriques tels que les alternateurs ou génératrices de courant, les moteurs électriques, pneumatiques et hydrauliques. Ces excitateurs ont pour origine les phénomènes suivants:

- *vibration des stators,*
- *Excentricité du rotor*
- *transformateurs...*

#### 3. Mécanismes excitateurs d'origine hydraulique

Ce type de mécanismes excitateurs, se retrouve dans les pompes volumétriques et turbopompes, les compresseurs volumétriques et turbocompresseurs, les moteurs électriques, pneumatiques et hydrauliques, les turbines à gaz et à vapeur, etc.... Ces excitateurs ont pour origine les phénomènes suivants:

- *pulsation de pression,*
- *cavitation,*
- *turbulences...*

#### 4. Mécanisme excitateurs d'origine aéraulique

Ce type de mécanismes excitateurs, se retrouve dans les ventilateurs, les éoliennes, les turbosoufflantes.. etc. Ces excitateurs ont pour origine les phénomènes suivants:

- *tourbillons de Von Karman,*
- *turbulences aérodynamiques ...*

## 1.4 VIBRATIONS MECANIQUES

### 1.4.1. Définition [3]

La norme ISO 2041 " Vibrations 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.

### 1.4.2. Réponse vibratoire

#### 1.4.2.1. position du problème

Tous système mécanique sollicité à des chargements dynamiques, sera le siège de vibrations mécaniques. Son comportement dynamique est une réponse vibratoire caractérisée par une amplitude qui est en fonction des caractéristiques suivantes (**Figure 1.1**):

#### 1. Caractéristiques des chargements dynamiques excitateurs, à savoir:

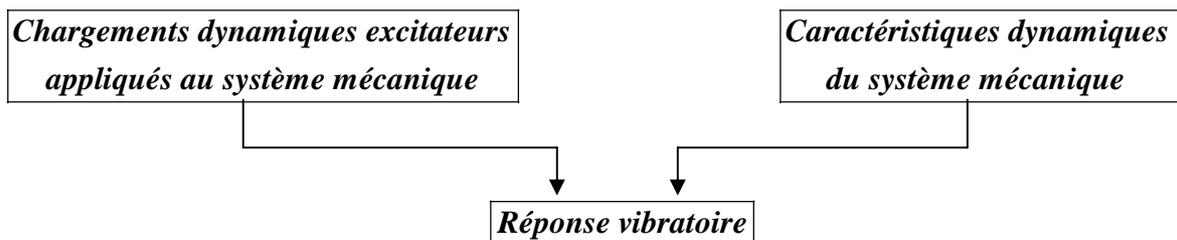
- *amplitude du chargement*
- *fréquence du chargement*

Ces caractéristiques du chargement permettent de définir les fréquences vibratoires du système mécanique.

#### 2. Caractéristiques dynamiques du système mécanique, à savoir:

- *répartition des masses;*
- *répartition des raideurs;*
- *répartition des amortissements.*

Les caractéristiques dynamiques permettent de définir les modes vibratoires du système mécanique. C'est-à-dire l'état privilégié dans lequel le travail des forces de déformation élastique est compensé exactement par le travail des forces d'inertie créée par la dynamique des masses.



**Fig 1.1:** variables qui influencent la réponse vibratoire d'un système mécanique [1]

Pour étudier le comportement dynamique d'un système mécanique et pouvoir prévoir la tenue mécanique des matériaux utilisés ainsi que les déformations dynamiques générées, il est capital de déterminer [1] :

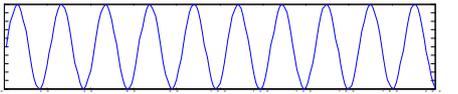
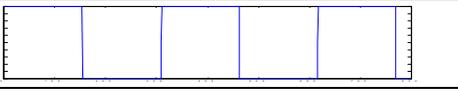
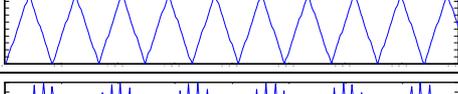
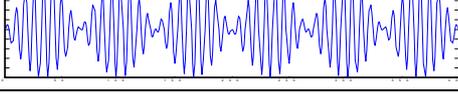
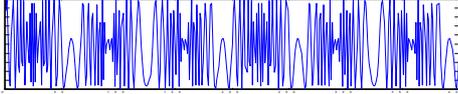
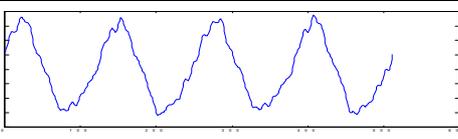
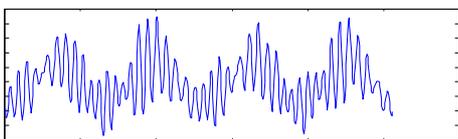
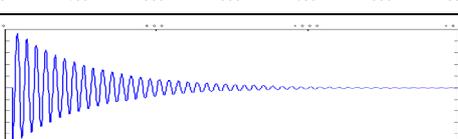
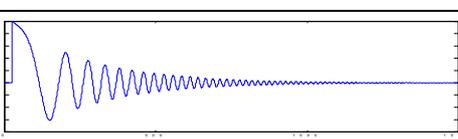
1. les fréquences vibratoires propres
2. les modes vibratoires propres qui donnent l'image du système en vibration sur chaque fréquence propre particulière.
3. la réponse vibratoire temporelle et/ou fréquentielle du système.

**1.4.2.2 Classification des réponses vibratoires**

En mécanique vibratoire, une fois un système mécanique excité par un chargement dynamique, sa réponse vibratoire nous parvient sous la forme de signaux vibratoires qui peuvent être classés en différents signaux temporels. On distingue (Tab 1.1) :

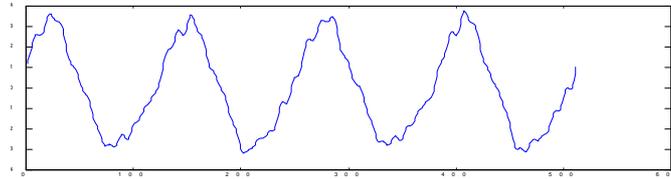
- Signaux déterministes
- Signaux aléatoires

*Tab 1.1: Les différents formes de signaux vibratoires*

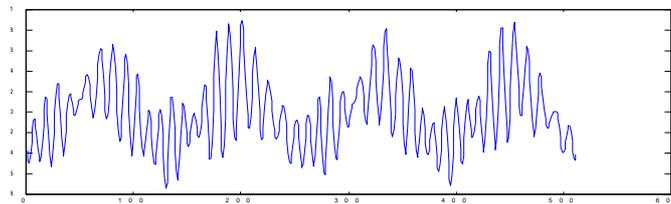
PERIODIQUE SIMPLE	Sinusoïdal	
	Carré	
	Triangulaire	
PERIODIQUE Modulé	Modulation En Amplitude	
	Modulation En Phase	
QUASI-PERIODIQUE		
		
APERIODIQUE	Linéaire	
	Non linéaire	

**1°. Réponse vibratoire déterministe**

On dit qu'un signal est déterministe si on peut prédire avec une certaine précision l'évolution temporelle des signaux mesurés. En vibration et acoustique, un signal déterministe est un signal dont on peut connaître à coup sûr la valeur à chaque instant. Il faut pour cela connaître avec une certaine précision la physique qui les régit, ou disposer d'observations antérieures. Exemples en vibration (**Figure 1.2**) et acoustique (**Figure 1.3**) :



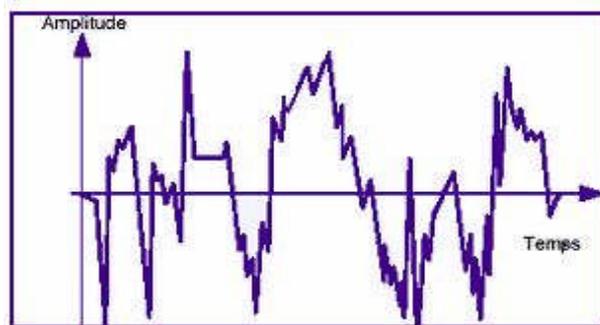
*Fig 1.2: Réponse vibratoire d'une poutre à une excitation harmonique*



*Fig 1.3 : Réponse impulsionnelle acoustique d'une salle*

**2°. Réponse vibratoire aléatoire**

On dit qu'une réponse vibratoire est aléatoire si a priori on ne peut rien dire et dont chaque nouvel enregistrement est différent du précédent.



*Fig 1.4: Vibration apériodique*

**1.4.2.3 Représentation graphique [2]**

Une réponse vibratoire étant un phénomène oscillatoire qui se répète identiquement à lui-même dans un intervalle régulier, la fonction sinusoïdale donnée par la relation peut être représentée graphiquement par de multiples façons:

- Représentation temporelle	- Représentation complexe
- Représentation fréquentielle	- Représentation en diagramme de BODE
- Représentation vectorielle	- Représentation en diagramme de NYQUIST

1°. Représentation temporelle

En représentation temporelle (Figure 1.5), la fonction sinusoïdale est représentée graphiquement par une sinusoïde. Une sinusoïde est une courbe alternative, de valeur moyenne nulle.

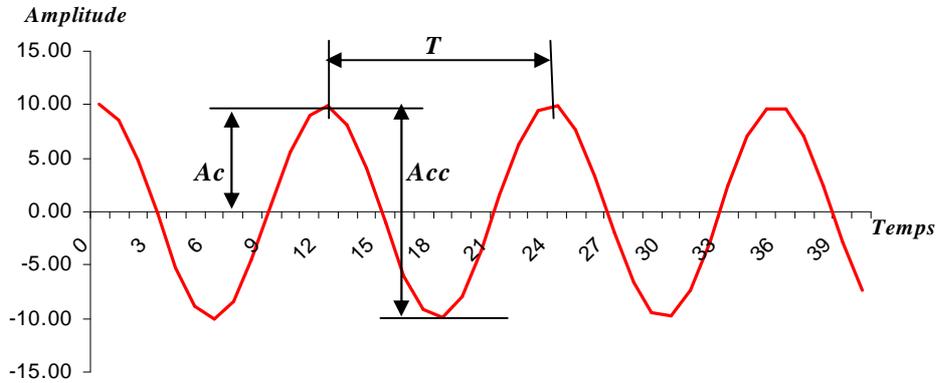


Fig 1.5: Représentation temporelle d'une réponse vibratoire simple

2°. Représentation fréquentielle

En représentation fréquentielle (Figure 1.6), on porte sur l'axe des abscisses la fréquence et sur l'axe des ordonnées l'amplitude  $A$  ou l'amplitude efficace  $A/\sqrt{2}$ . Dans ce type de représentation, l'information phase qui dépend de l'origine des temps n'apparaît pas.

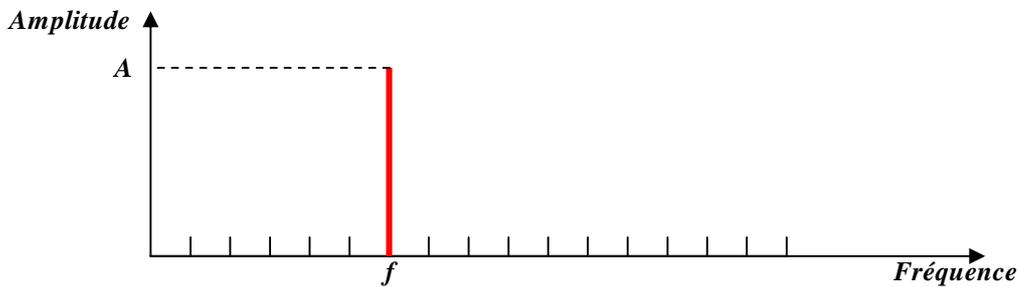


Fig 1.6: Représentation fréquentielle d'une réponse vibratoire simple

3°. Représentation vectorielle

En représentation vectorielle (Figure 1.7), on utilise un vecteur  $\overline{OM}$  ayant pour module l'amplitude  $A$  et pour angle d'orientation la quantité  $(\omega t - \varphi)$ . La réponse vibratoire est la projection du vecteur  $\overline{OM}$  sur l'axe des temps.

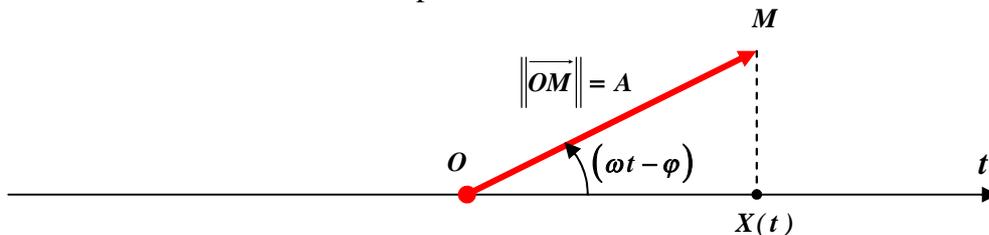
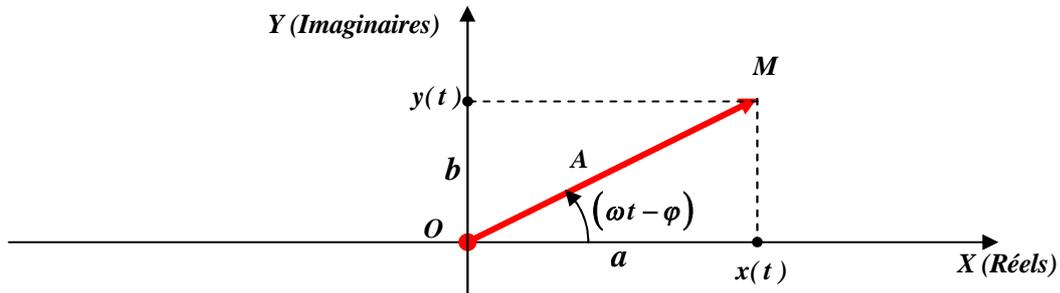


Fig 1.7: Représentation vectorielle d'une réponse vibratoire simple

#### 4°. Représentation complexe

En représentation complexe (**Figure 1.8**) le vecteur  $\overline{OM}$  est représenté dans un plan complexe, avec une partie réelle  $a$  et une partie imaginaire  $b$ .



**Fig 1.8:** Représentation complexe d'une réponse vibratoire simple

En projetant le vecteur  $\overline{OM}$  sur deux axes, réel et imaginaire, le signal est représenté par une fonction complexe  $Z(t)$ . Tel que:

$$Z(t) = a + i b \quad [1.1]$$

Où:

- $a = x(t)$  : partie réelle de la fonction  $Z(t)$ .
- $b = y(t)$  : partie imaginaire de la fonction  $Z(t)$ .

Compte tenu de la relation d'Euler:

$$e^{i(\omega t - \varphi)} = \cos(\omega t - \varphi) + i \sin(\omega t - \varphi) \quad [1.2]$$

La relation [1.1] peut s'écrire sous la forme:

$$Z(t) = A e^{i(\omega t - \varphi)} \quad [1.3]$$

#### 5°. Représentation en diagramme de BODE

Le diagramme de BODE est un moyen de représenter le comportement fréquentiel d'un système. On dit un diagramme de BODE d'un système de réponse fréquentielle  $T(\omega)$  est ainsi une représentation graphique composée de deux traces :

- Le gain (ou amplitude) en décibels (dB). Sa valeur est calculée à partir de  $20 \log_{10} (T(j\omega))$
- la phase en degré, donnée par  $\arg(T(j\omega))$

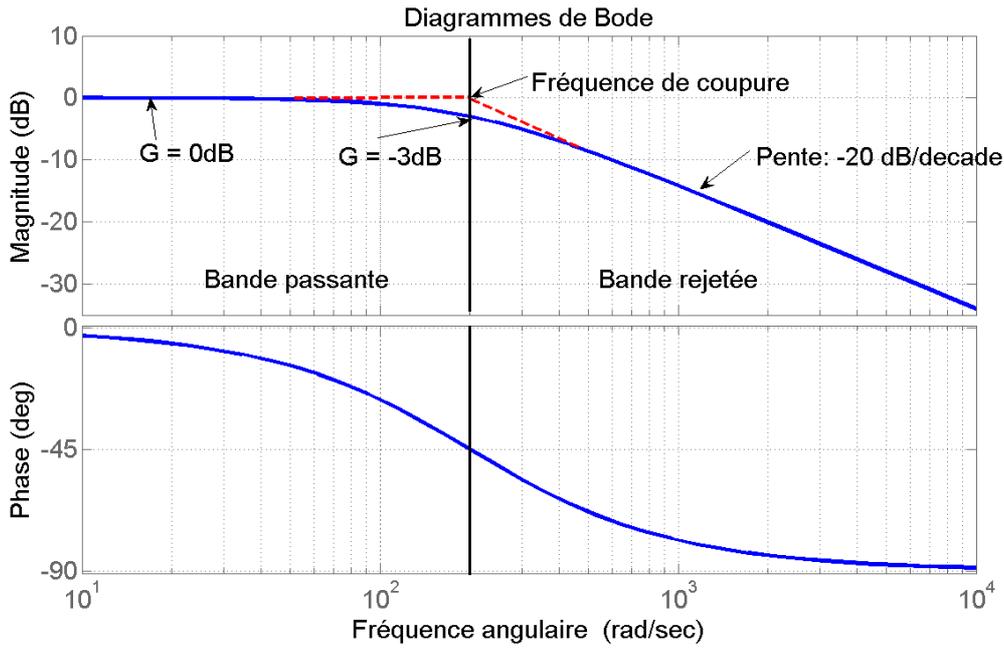


Fig 1.9: Représentation graphique de diagramme de BODE

6°. Représentation en diagramme de NYQUIST

Le diagramme de NYQUIST est un graphe utilisé en électronique et en automatique pour évaluer la stabilité d'un système en boucle fermée. Il représente dans le plan complexe, la réponse harmonique du système en boucle ouverte correspondante.

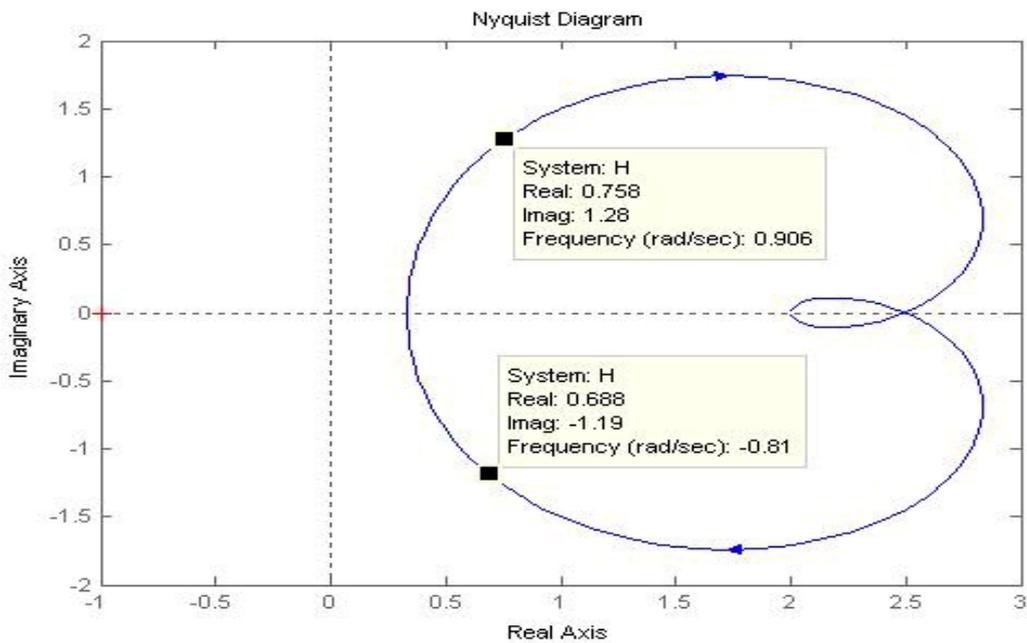


Fig 1.10: Représentation graphique de diagramme de NYQUIST

Les réponses vibratoires couramment rencontrés en ingénierie sont généralement mesurés sous forme d'amplitude en translation ou en rotation d'un déplacement, d'une accélération, d'une vitesse ou d'une force variant en fonction du temps.

A cet effet, deux échelles sont à considérer :

- **Echelle de l'amplitude** : l'axe de l'amplitude instantanée du signal qui peut représenter toute quantité physique, tel que:
  - Accélération,
  - Vitesse,
  - Déplacement,
  - Force
- **Echelle du 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 (ex : degré vilebrequin sur les moteurs)

### 1.5.1 Réponse vibratoire simple [2]

#### 1°. Définition

Une réponse vibratoire simple est définie mathématiquement par une fonction sinusoïdale de la forme:

$$X(t) = A \cos(\omega t - \varphi) = A \cos(2\pi f t - \varphi) \quad [1.1]$$

#### 2°. Caractéristiques

- $X(t)$ : Elongation du signal vibratoire (grandeur vibratoire: déplacement, vitesse ou accélération)
- $A$ : Amplitude du signal vibratoire. Son rôle est de définir le degré de sévérité du problème.

On distingue:

- $A_c$ : amplitude **valeur de crête (Peack)**, si l'amplitude est prise comme distance entre le point d'équilibre et l'élongation maximale atteinte par le mouvement vibratoire.
- $A_{cc}$ : amplitude **valeur crête à crête (Peack-Peack)**, si l'amplitude est prise comme distance entre les élongations extrêmes atteintes par le mouvement vibratoire.
- On exprime souvent l'amplitude de la vibration par une valeur moyenne de l'accélération du mouvement oscillatoire, généralement la valeur efficace de l'accélération ( $m/s^2$  efficace).
- Pour un mouvement sinusoïdal (fréquence unique), la valeur efficace correspond à la valeur de crête divisée par  $\sqrt{2}$ .

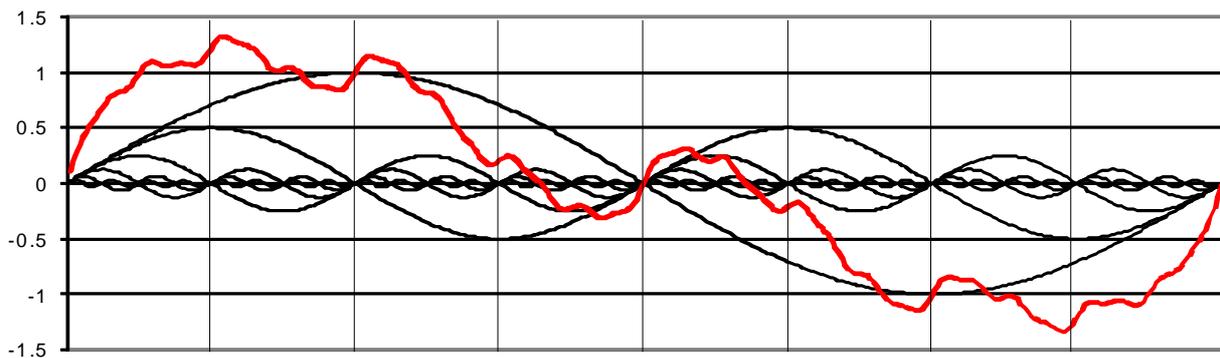
- Pour un mouvement sinusoïdal, l'accélération  $a$  (en  $\text{m/s}^2$ ) peut se calculer à partir de la fréquence  $f$  (en cycles par seconde) et du déplacement  $d$  (en mètres):

$$a = (2\pi f)^2 d$$

- On a parfois recours à des échelles logarithmiques pour quantifier l'amplitude vibratoire en décibels (dB).
- Si l'on applique la norme internationale 1683 (ISO, 1983), le niveau d'accélération  $L_a$  s'exprime par  $L_a = 20 \log_{10}(a/a_0)$ , où  $a$  est l'accélération mesurée (en  $\text{m/s}^2$  efficace) et  $a_0$  le niveau de référence de  $10^{-6} \text{ m/s}^2$ .
- Certains pays emploient des niveaux de référence différents.
- $\omega$  : pulsation de la vibration [ $\text{rad/s}$ ].  $\omega = 2\pi f$
- $f$  : fréquence de la vibration [ $\text{Hz}$ ]
- $\varphi$  : phase à l'origine des temps. Elle caractérise l'amplitude du signal à l'instant  $t = 0$

### 1.5.2 Réponse vibratoire périodique composée [2]

Si deux ou plusieurs réponses vibratoires périodiques se superposent ils en résultent une réponse vibratoire périodique composée. L'allure de cette dernière est la superposition, d'une vibration fondamentale et de plusieurs vibrations harmoniques. Les fréquences des harmoniques sont des multiples entiers de celle du fondamental (**Figure 1.11**).



**Fig 1.11:** Représentation graphique des fréquences harmoniques

La méthode analytique qui permet la décomposition d'une vibration harmonique périodique en ses composantes est : la série de Fourier (Jean-Baptiste Fourier 1768-1830). Le calcul qui permet cette décomposition est : la transformation de Fourier .

La transformée de Fourier est un des outils utilisés à cet effet. Cette fonction mathématique réalise une transposition du signal du domaine temporel vers le domaine fréquentiel. La représentation du signal obtenue est appelée un spectre en fréquences (ou spectre fréquentiel). La Transformée de

Fourier est implémentée dans les analyseurs de spectres sous une forme appelée FFT (Fast Fourier Transform). Le spectre final contient l'ensemble des fréquences sinusoïdales (raies discrètes) constituant le signal vibratoire d'origine.

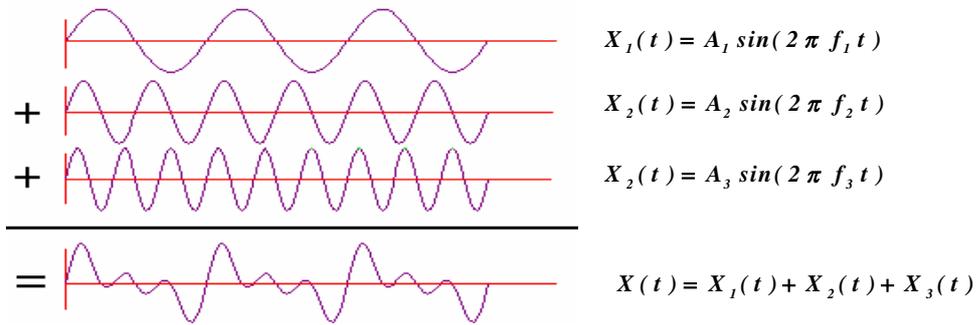


Fig 1.12: la décomposition d'une vibration harmonique périodique par FFT

1.5.3 Réponse vibratoire aperiodique transitoire [2]

1°. Définition :

Ils sont générées par des forces discontinues (choc).elles peuvent présenter ou non un aspect oscillatoire revenant à une position d'équilibre après amortissement. Lorsqu'il existe des oscillations, comme pour une structure qui vibre après un choc et pour laquelle le coefficient d'amortissement est faible, on dit qu'il y a amortissement sub-critique, et le mouvement est pseudopériodique, si l'amortissement est très important, la structure revient à sa position d'équilibre sans oscillation, on dit alors que l'amortissement est sur-critique et le mouvement est aperiodique.

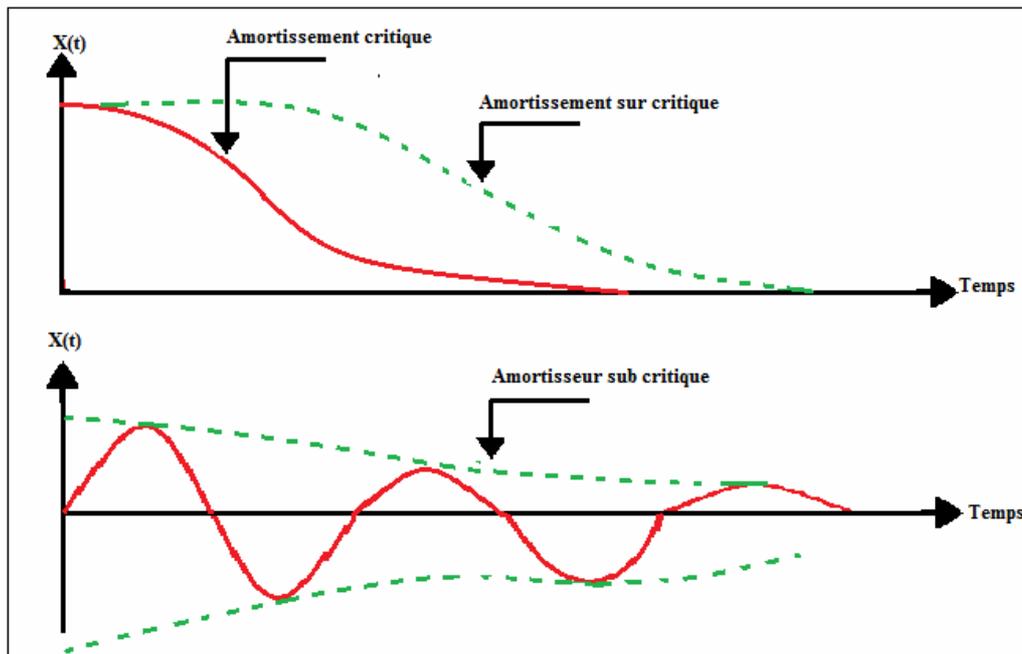
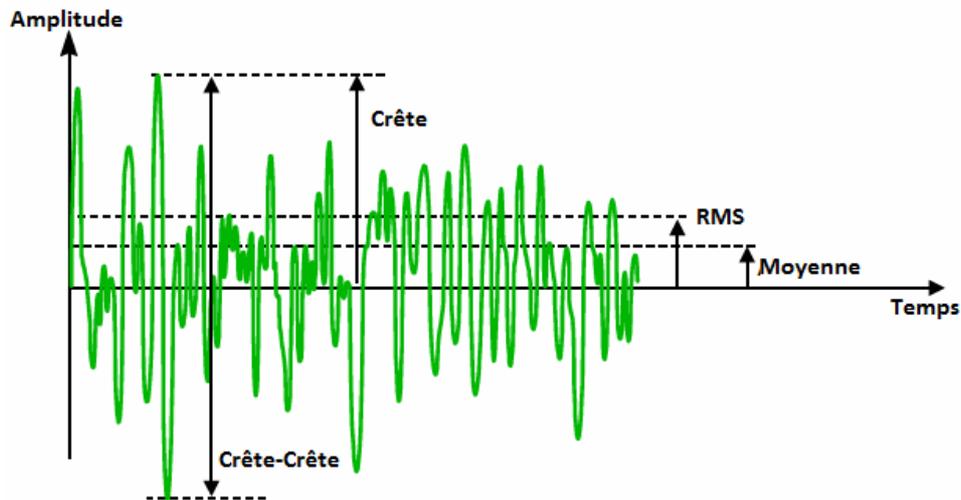


Fig 1.13:: Représentation graphique d'une vibration transitoire

### 1.5.4 Réponse vibratoire aperiodique aléatoire [2]

#### 1°. Définition

les réponses vibratoires aléatoires sont le résultat des vibrations dont la forme du signal vibratoire évolue constamment en fonction du temps de manière aléatoire et quelconque. Dans ce cas on ne peut pas distinguer la périodicité du signal (**Figure 1.14**).



**Fig 1.14 :** Représentation graphique d'une réponse vibratoire aperiodique

#### 2°. Caractéristiques

- $A_c$  : amplitude **valeur de crête (Peack)**, si l'amplitude est prise comme distance entre le point d'équilibre et l'élongation maximale atteinte par le mouvement vibratoire.
- $A_{cc}$  : amplitude **valeur crête à crête (Peack-Peack)**, si l'amplitude est prise comme distance entre les élongations extrêmes atteintes par le mouvement vibratoire.

Cependant, sachant que  $A_c$  et  $A_{cc}$  ne tiennent pas compte de l'évolution de la vibration dans le temps, on fait intervenir d'autres amplitudes:

- $A_{moy}$  : Amplitude moyenne qui tient compte de l'évolution de la vibration dans le temps. Mais elle n'a aucune relation avec une grandeur physique quelconque.

$$A_{moy} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T |x| dt} \quad [1.2]$$

- $A_{eff}$  ( $A_{RMS}$  ou  $RMS$ ) : Amplitude efficace ou  $RMS$  (Root Mean Square), qui tient compte de l'évolution de la vibration dans le temps et en relation avec une grandeur physique.

$$A_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad [1.3]$$

La valeur efficace ou valeur moyenne quadratique (RMS - *Root Mean Square*) est la mesure la plus intéressante des amplitudes de vibration. En plus de tenir compte de l'évolution du signal dans le temps, le calcul de la valeur efficace est lié à l'énergie vibratoire et donc au "potentiel de détérioration" de la vibration.

Tab 1.2: Techniques de mesure du niveau global

ANGLAIS	FRANÇAIS	
Peak	Crête	$V_{Moy} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T  x  dt}$
Peak-Peak	Crête à crête	
Average	Moyenne	
Root Mean Square (RMS)	Valeur efficace	$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$
Crest Factor	Facteur de crête	
Periodicity / Repitition Rate	Périodicité/Taux de répétition	
Duration	Durée	

---

*Chapitre 02*

---

**CHAÎNE D'ACQUISITION  
DES  
REPONSES VIBRATOIRES**

---

## 2.1 INTRODUCTION

Dans son évolution, l'état d'un milieu ou d'un processus est caractérisé à chaque instant par les valeurs d'un certain **nombre de grandeurs physiques** variables. Ces grandeurs physiques peuvent être classées en six familles:

- **Mécanique** : déplacement, vitesse, accélération, force, masse, débit etc...
- **Thermique** : température, capacité thermique, flux thermique etc...
- **Electrique** : courant, tension, charge, impédance, diélectrique etc...
- **Magnétique** : champ magnétique, perméabilité, moment magnétique etc...
- **Radiatif** : lumière visible, rayons X, micro-ondes etc...
- **(Bio)Chimique** : humidité, gaz, sucre, hormone etc...

L'assignation d'une valeur à une grandeur physique est une **opération de mesure** et la grandeur physique qui fait l'objet de la mesure est appelée le **mesurande**. Le but de la mesure est de faire correspondre, au **mesurande** que l'on désire connaître, une grandeur compréhensible par un observateur donné. Pour obtenir une image du mesurande, on fait appel à un système d'instrumentation qui peut faire intervenir plusieurs phénomènes différents. [7]

**Exemple:** la mesure d'un débit peut se faire en plusieurs étapes :

- *transformation du débit en une pression différentielle,*
- *transformation de la pression différentielle en la déformation mécanique d'une membrane,*
- *transformation via un circuit électronique associé à l'aide d'un composant piézo-électrique, de la déformation mécanique en une grandeur électrique (Tension ou courant).*

## UNE CHAÎNE DE MESURE OU CHAÎNE D'ACQUISITION [6]

La chaîne d'acquisition a pour fonction de recueillir et transformer la grandeur à mesurer sous une forme adaptée à son exploitation. Le capteur peut à la fois réaliser la mesure et faire partie du conditionnement (comme dans un montage en pont de Wheatstone) ou bien être dissocié (comme schématisé). Prenons l'exemple d'une mesure de température  $T$  via une thermistance, dipôle résistif dont la résistance électrique  $R$  varie en fonction la température  $R(T) = R_0 + \Delta R(T)$ . La mesure directe de la tension  $V$  inclut deux termes : une composante continue  $V_0$  et une variation de tension due à la variation de température,  $V = V_0 + \Delta V$ . Il est possible de réaliser la mesure de température via la tension aux bornes d'une seule thermistance mais cette méthode présente des inconvénients, en particulier celui de délivrer un signal de sortie dont seule une faible proportion est dépendante du mesurande.

La chaîne d'acquisition peut assurer plusieurs rôles par le truchement de divers dispositifs. Le capteur, placé en tête de la chaîne d'acquisition, transforme le mesurande en signal électrique (en général une tension). Le circuit de conditionnement optimise les caractéristiques du signal de sortie du capteur (filtrage du bruit, amplification, suppression de composante continue...). Une conversion analogique/numérique du signal peut également être faite afin par exemple de rendre la mesure exploitable par un ordinateur.

## 2.2. CHAÎNE D'ACQUISITION DE DONNEES [7]

### 2.2.1 Définition

Un système d'acquisition de données a pour fonction globale d'extraire à partir d'un milieu ou d'un processus qui nous intéresse, une information ou une donnée concernant une **grandeur physique** mesurable et communique cette information ou cette donnée mesurée à **un observateur** [1]. Une chaîne d'acquisition recueille les informations nécessaires à la connaissance et au contrôle d'un processus ou d'un milieu; elle délivre ces informations sous une forme appropriée à leur exploitation (**figure 2.1**).

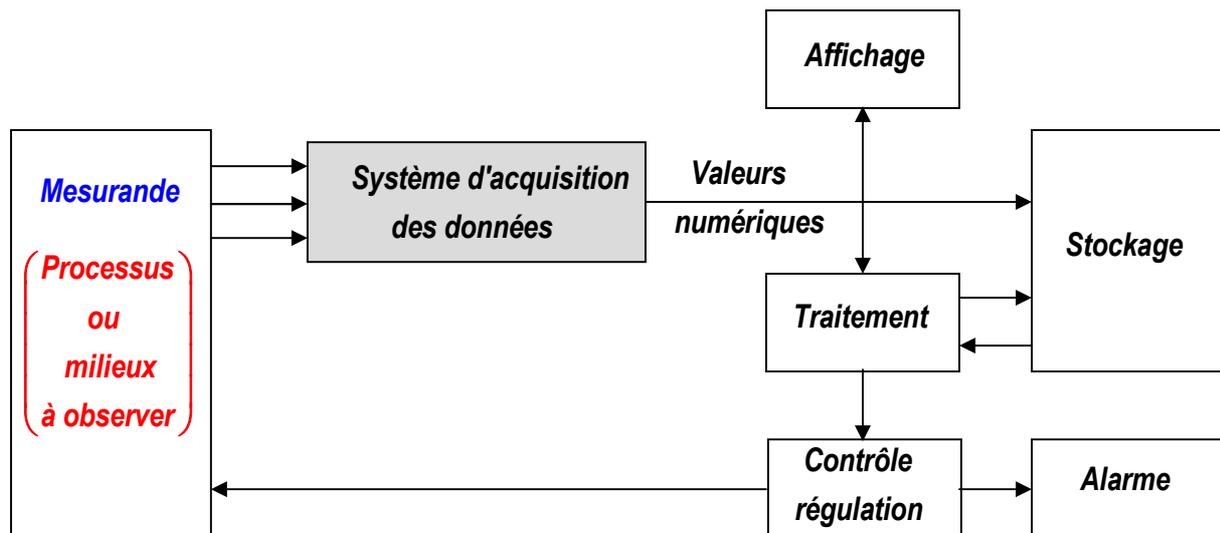


Fig 2.1 : Place du système d'acquisition de données dans la chaîne d'acquisition

### 2.2.2 Structure de base d'une chaîne d'acquisition

Un processus étant constitué d'un ensemble complexe d'interactions, l'analyse des grandeurs fondamentales provenant de ces interactions, s'obtient par une succession d'opérations instrumentées ayant chacune une fonction propre. Ainsi, dans sa structure de base, la chaîne d'acquisition est formé par un ensemble ordonné et coordonné de composants électriques, électroniques et électromagnétiques qui sont deux grandes fonctions principales:

- Fonction **EXTRACTION** de l'information
- Fonction **TRAITEMENT** de l'information

**1. Extraction de l'information:**

- Traduire les grandeurs physiques relatives aux mesurandes en signal électrique.
- Elle est assurée par : les **CAPTEURS** et les **CONDITIONNEURS**.

**2. Traitement analogique du signal:**

- Eviter la dégradation du signal par le bruit et les parasites.
- Elle est assurée par: les **AMPLIFICATEURS** et les **FILTRES**.

**3. Sélection du signal approprié**

- Sélectionner parmi les signaux disponible , le signal voulu
- Elle est assurée par: les **DETECTEURS** et les **CIRCUITS EGALISEURS**.

**4. Conversion du signal analogique en signal numérique**

- Traduire une grandeur analogique en une valeur numérique
- Elle est assurée par : les **CAN** (convertisseur analogique-numérique)

**2.2 3 Classification des chaînes d'acquisition****2.2.3.1 Système d'acquisition analogique**

Le terme analogique veut dire que la loi qui lie l'information provenant du capteur à la grandeur mesurée est continue. Il s'agit de signaux électriques qui ont remplacé les systèmes mécaniques et optiques. Le système d'acquisition analogique traite un courant électrique dont l'intensité est directement reliée à l'amplitude du phénomène vu par le capteur et cela quel que soit le type de ce capteur. Dans une chaîne d'acquisition analogique (**figure 2.2**), le capteur délivre un signal qui est amplifié et converti généralement en volts par un conditionneur qui comprend généralement les éléments suivants :

1. **les capteurs** : premier élément de la chaîne d'acquisition, ils sont chargés de la mesure proprement dite. Leurs caractéristiques autant physiques que fonctionnelles offrent une large gamme de choix permettant leur emploi dans les différents types d'applications.
2. **les conditionneurs** : après le capteur, ils ont un rôle très important sur la qualité de la mesure. Il assure les fonctions suivantes:
  - **la conversion du signal**: il transforme généralement le signal en une grandeur électrique facile à transporter.
  - **l'amplificateur du signal**: elle a pour but d'augmenter l'intensité du signal et de le rendre moins sensible au bruit de fond ambiant.
  - **Le traitement du signal**: en fonction des objectifs fixés par l'utilisateur, il comprend le contrôle, le filtrage, la compression de données, la transmission de données, le débruitage, la déconvolution, la prédiction, l'identification, la classification, etc...

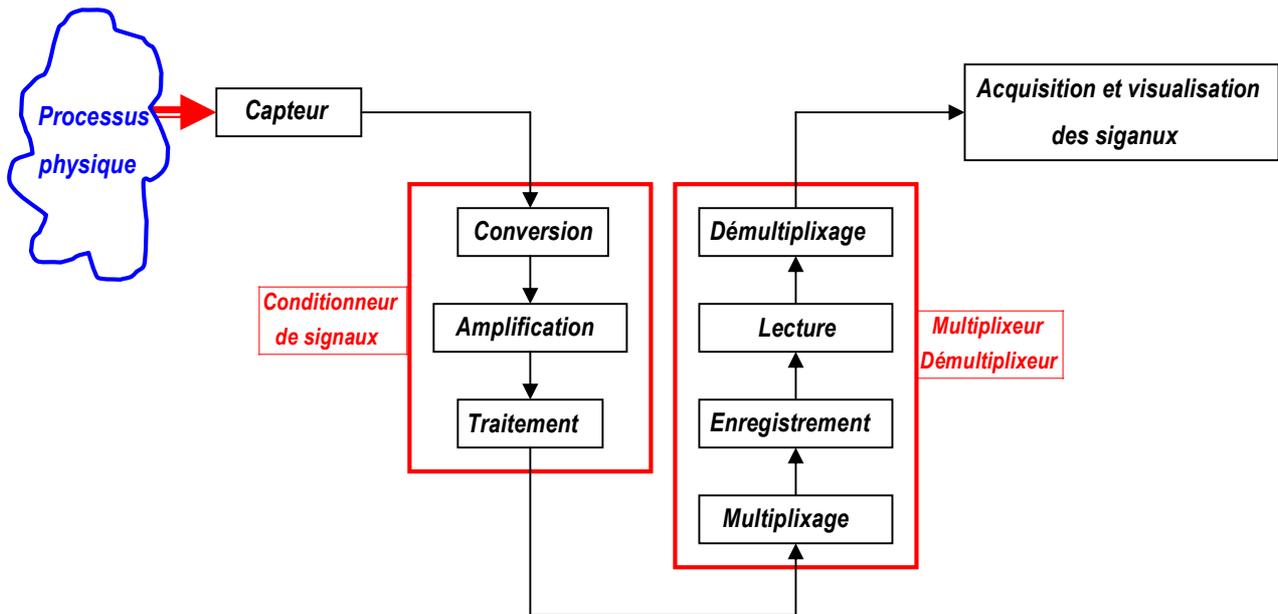


Fig 2.2: Principe de la chaîne d'acquisition analogique

### 2.2.3.2 Système d'acquisition numérique

La chaîne d'acquisition numérique (figure 2.3), possède les mêmes éléments que la chaîne de mesure analogique. En sortie du conditionneur de signaux, le signal est échantillonné et numérisé par les éléments suivants :

- **l'Echantillonneur-Bloqueur (E/B)** a pour mission, au moment indiqué par le système logique de commande, de figer la valeur instantanée du signal au moins le temps que le convertisseur analogique-numérique effectue sa conversion ;
- **le Convertisseur Analogique-Numérique (CAN)** a pour rôle de coder la valeur instantanée du signal en entrée en un nombre. Son fonctionnement est géré par le système logique de commande qui peut être un microprocesseur.

les principaux composants des chaînes d'acquisition utilisées dans les essais de vibrations

- **les capteurs** : ils sont chargés de la mesure proprement dite. Leurs caractéristiques autant physiques que fonctionnelles offrent une large gamme de choix permettant leur emploi dans les différents types d'essais de vibrations ;
- **les conditionneurs** : premier élément de la chaîne d'acquisition après le capteur, ils ont un rôle très important sur la qualité de la mesure.

Dans le cas de plusieurs voies d'acquisition, un multiplexeur peut venir s'intercaler dans la chaîne numérique soit entre le conditionneur et l'Echantillonneur-Bloqueur, soit entre ce dernier et le convertisseur Analogique-Numérique.

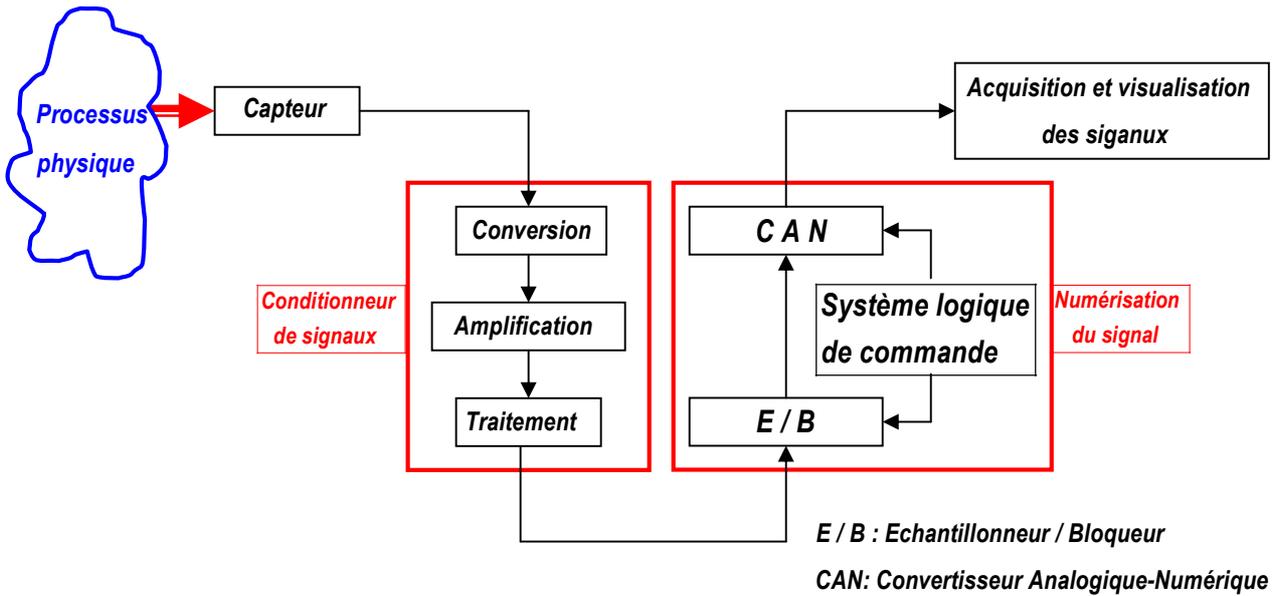


Fig 2.3: Principe de la chaîne d'acquisition numérique

### 2.2.4. Architecture des chaînes d'acquisition de données

D'une manière générale, une chaîne d'acquisitions de données peut avoir les architectures suivantes:

#### 1°. Architecture type A

Elle comprend:

- Des capteurs pour les grandeurs physiques;
- Petits conditionneurs déportés;
- Carte A/N multiplexée ou carte multi A/N connectée au bus interne du PC
- Un PC

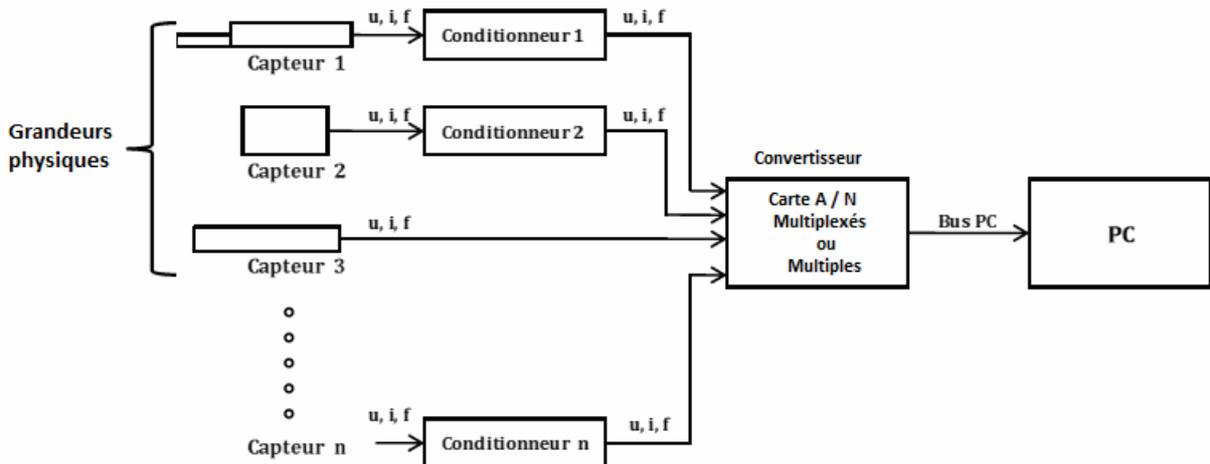


Fig 2.4: Architecture d'une chaîne d'acquisitions de données type A

## 2°. Architecture **type B**

Elle comprend:

- Des **capteurs** pour les grandeurs physiques;
- Petits **conditionneurs déportés**;
- **Module A/N** multiplexée ou **module** multi A/N connecté au PC par un bus sériel USB,

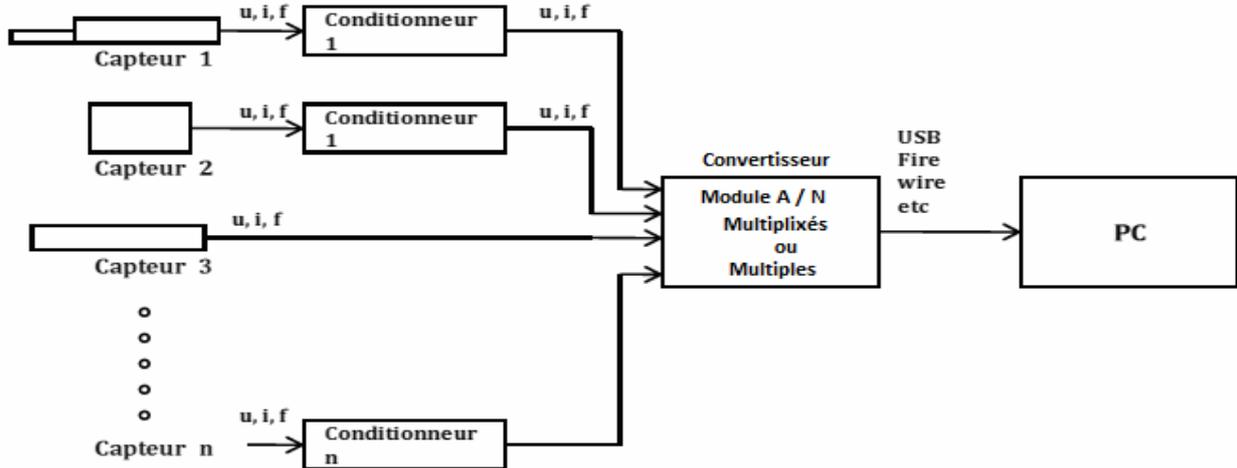


Fig 2.5: Architecture d'une chaîne d'acquisitions de données type B

## 3°. Architecture **type C**

Elle comprend:

- Des **capteurs** pour les grandeurs physiques;
- Une **centrale de mesure** qui intègre les divers conditionnements ainsi que les CAN. Elle communique par données numériques et protocole de haut niveau avec le PC

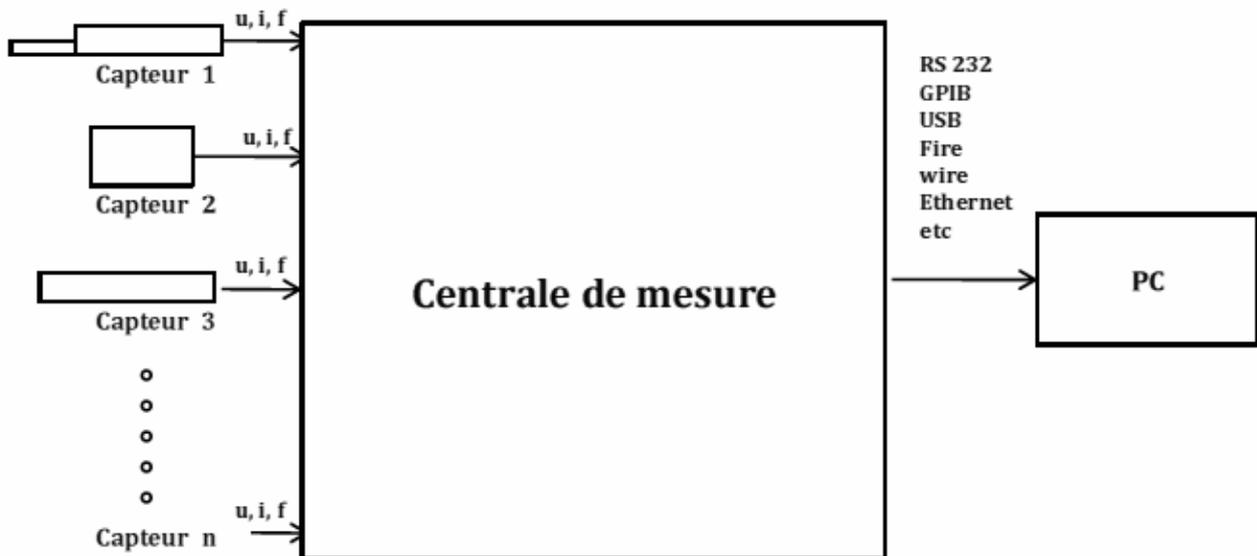


Fig 2.6: Architecture d'une chaîne d'acquisitions de données type C

4°. Architecture type D

C'est une combinaison des architectures précédentes. Dans ce cas, Il faut résoudre le problème de synchronisation des données provenant des divers équipements.

Exemple: Architecture A et C

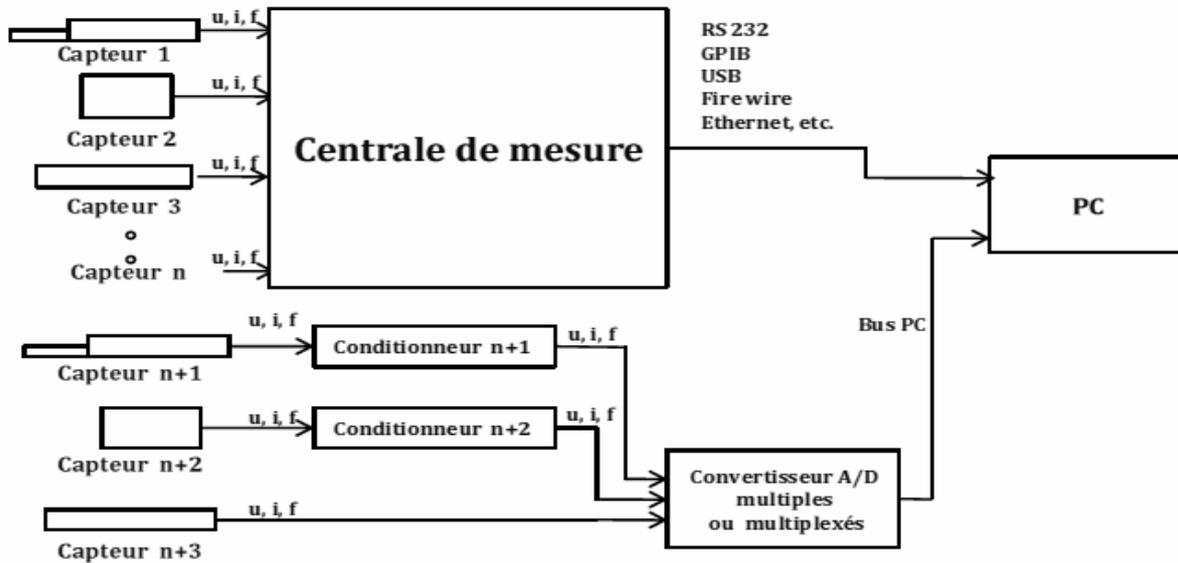


Fig 2.7: Architecture d'une chaîne d'acquisitions de données type D

2.3. CAPTEURS

La mesure de n'importe quelle grandeur physique variable est effectuée par un système d'instrumentation dont les premiers composants sont les capteurs.

2.3.1 Définition [3]

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. Ce sont des mini système de conversion d'énergie. Ils requière de l'énergie sous une certaine forme et la convertisse soit en force électromotrice, soit en courant, soit en charge électrique.

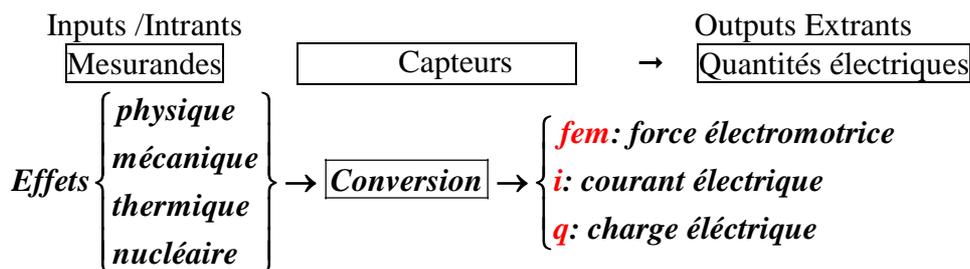


Fig 2.8: Schéma d'un système de conversion d'énergie

### 2.3.2. rôle des capteurs [1]

- Sachant qu'à chaque mesurande est associé un capteur, le rôle d'un capteur est de traduire la valeur  $m$  du mesurande en une grandeur électrique  $s(m)$ .
- $s(m)$  est une fonction connue du mesurande, en sorte qu'à chaque valeur  $s$  de cette grandeur électrique puisse être liée de façon univoque la valeur  $m$  du mesurande.
- La grandeur électrique  $s(m)$  est à l'origine du signal électrique qui sera traité par le système d'acquisition.

$$m \rightarrow \boxed{s(m)} \rightarrow s$$

### 2.3.3. Classification des capteurs [1]

D'après la nature de la grandeur électrique de sortie  $s(m)$ , une classification sommaire des divers types de capteurs peut être établie. On distingue:

#### 1°. Les capteurs générateurs

1. Capteurs générateur d'une fem → **Thermocouples**
2. Capteurs générateur de **courant électrique** → **Photodiodes**
3. Capteurs générateur de **charge électrique** → **Dynamomètres** et **accéléromètres** à quartz

#### 2°. Les capteur résistifs

1. Résistances thermométriques
2. Résistances métalliques
3. Thermistances
4. Jauges d'extensomètre

#### 3°. Capteurs inductifs

1. Capteurs à variation du coefficient d'auto-induction
2. Capteur à variation du coefficient d'induction mutuelle
3. Capteur à transformateur différentiel

#### 4°. Capteurs capacitifs

1. Capteur de composition gazeuse
2. Microphone capacitif
3. Capteur de pression différentielle
4. Jauge extenso-métrique capacitive

### 2.3.4. Choix d'un capteur [1]

Le choix d'un capteur s'effectue en vérifiant que ces caractéristiques métrologiques sont compatibles avec les conditions imposées par le cahier des charges. Ces conditions sont de deux types (**tableau 2.1**).

Tab 2.1: Caractéristiques métrologiques en fonction des conditions imposées

MESURANDE (Conditions imposées)	CAPTEUR (Caractéristiques métrologiques)
Plage de variation	- Etendue de mesure
Variation minimale à mesurer	- Résolution ou erreur de mobilité
Spectre de fréquences ou vitesse de variation	- Bande passante ou temps de réponse
Précision de mesure	- Erreur de linéarité - Erreur de mesure
Plage de température de fonctionnement	- Dérive thermique du zéro et la sensibilité - Tenue en température
Localisation	- Encombrement
Composition de l'atmosphère	- Inertie chimique - Protection
Parasites	- Blindage - Isolement ou non par rapport à la masse

### 2.3.5. LES CAPTEURS DE VIBRATIONS [7]

#### 2.3.5.1. Types de capteurs de vibrations

- La première étape conduisant à l'obtention d'une lecture de vibration consiste à convertir la vibration mécanique produite par une machine en un signal électrique équivalent.
- Cette opération est réalisée au moyen des capteurs de vibrations.
- On retrouve parmi les capteurs les plus couramment utilisés le **proximètre** (mesure de déplacement), le **vélocimètre** (mesure de vitesse) et l'**accéléromètre** (mesure d'accélération).

#### 2.3.5.2. Caractéristiques des capteurs de vibrations

Un capteur de vibration est caractérisé principalement par :

- **bande passante** (plage d'utilisation) : plage de fréquences à l'intérieur de laquelle l'amplitude mesurée par le capteur ne dépasse pas une marge d'erreur fixée par le constructeur (par exemple + 3 % ou + 3 dB de [3–8000] Hz).
- **gamme dynamique**: (gamme de mesure d'amplitude) gamme comprise entre la petite et la plus grande amplitude acceptée par capteur.
- **sensibilité** : relation entre la grandeur électrique délivrée à la sortie du capteur et l'amplitude du mouvement mécanique qui lui donne naissance ( exemple 8 mV par  $\mu\text{m}$ ). Elle est donnée généralement par le fabricant du capteur sous forme de courbe d'étalonnage qui devra faire l'objet d'une vérification périodique

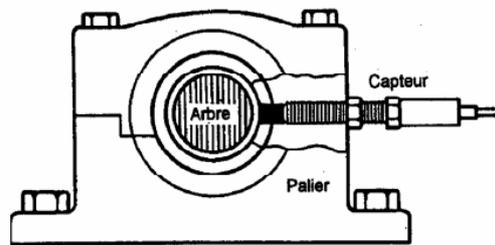
### 2.3.5.3. Capteurs en vibrations

Dans le domaine de la **surveillance des machines**, il y a trois (03) types de mesures intéressent principalement, ce sont:

- les mesures des déplacements
- les mesures des vitesses
- les mesures des accélérations

#### 2.3.5.3.1. Les proximètres (capteurs de déplacements) [1]

Le proximètre (**figure 2.9**), ou sonde de proximité est un capteur de déplacement sans contact qui produit un signal électrique directement proportionnel au déplacement relatif de la vibration d'un arbre ou d'un rotor. Les mesures en déplacement ne sont pas quantifiables dans toutes les gammes de fréquence. Ces mesures seront limitées aux basses fréquences ( $< 100$  Hz). Il est monté en permanence à l'intérieur du palier.



**Fig 2.9:** Montage d'un proximètre

Le capteur de déplacement est utilisé pour toutes les applications où la surveillance des jeux entre les arbres et les paliers s'avère s'essentielle. C'est pourquoi on retrouve des capteurs de déplacement installés sur la plupart des turbines hydroélectriques et turbomachines. A partir des connaissances des jeux radiaux réels d'un palier ou des jeux axiaux rotor-stator il est beaucoup plus facile de déterminer des seuils d'alerte et de danger en terme de déplacement qu'en terme de vitesse ou d'accélération

#### 2.3.5.3.2. Les vélocimètres (capteurs de vitesses) [1]

Les capteurs de vitesse (**figure 2.10**), ou vélocimètres, sont constitués d'une sonde à contact appelée sonde sismique qui mesure le mouvement absolu de l'organe sur lequel elle est fixée. Les vélocimètres les plus courants sont constitués d'une masse sismique reliée au boîtier par un ressort et solidaire d'une bobine qui se déplace dans un champ magnétique permanent créé par un barreau aimanté. La vibration du palier sur lequel est fixé le capteur, génère une tension électrique proportionnelle à la vitesse de mouvement de la bobine.

La fréquence de résonance de ce type de capteur se situe généralement entre  $8 \rightarrow 15 \text{ Hz}$  et la gamme dynamique s'étend de  $10 / 20 \rightarrow 2000 \text{ Hz}$

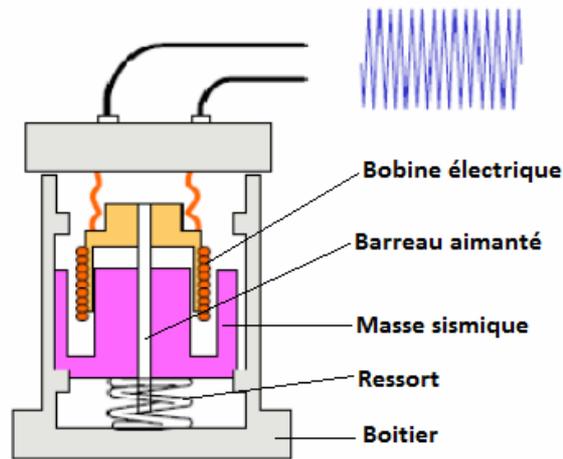


Fig 2.10: Coupe longitudinale d'un vélocimètre

### 2.3.5.3.3. Les accéléromètres (capteurs d'accélération) [1]

#### 1°. Principe:

- Un accéléromètre piézoélectrique (figure 2.11), est composé d'un disque en matériau piézoélectrique (ex Quartz), qui joue le rôle d'un ressort sur lequel repose une masse sismique précontrainte.
- Quand la masse sismique se déplace sous l'effet d'une accélération, elle exerce sur le disque piézoélectrique des contraintes, induisant à la surface de ce dernier une charge électrique proportionnelle à cette accélération.
- Les accéléromètres piézoélectriques tendent à devenir les capteurs de vibration absolue les plus utilisés pour la surveillance. Ils possèdent les propriétés suivantes :
  - Utilisables sur de très grandes gammes de fréquences
  - linéarité excellente sur une très grande gamme dynamique (140 dB)
  - Intégration électronique possible du signal d'accélération pour donner le déplacement et la vitesse.
  - Durabilité, car il n'y a aucun élément mobile.

**Remarque:** Les accéléromètres à électronique intégrée sont les mêmes que les accéléromètres piézoélectriques, à la différence qu'ils possèdent de manière incorporée ou intégrée un conditionnement de charge pour délivrer une tension proportionnelle à l'accélération

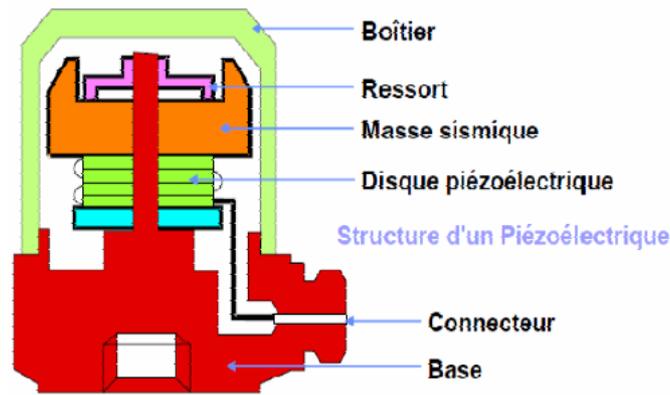


Fig 2.11: Coupe longitudinale d'un accéléromètre

## 2°. Réponse d'un accéléromètre

L'examen de la courbe de réponse d'un accéléromètre piézoélectrique, (figure 2.12), montre l'existence de 02 zones:

### 1. zone de linéarité:

- C'est la plage de fréquences à l'intérieur de laquelle la réponse du capteur correspond à l'amplitude mesurée du signal avec une bonne sensibilité.
- Cette zone définit la plage de fréquences pour une bonne utilisation du capteur.

### 2. Zone de résonance:

- C'est la zone qui englobe la résonance du capteur à l'intérieur de laquelle les mesures d'amplitude sont amplifiées, de façon non contrôlée.
- Cette zone sera évitée puisque la mesure est faussée.

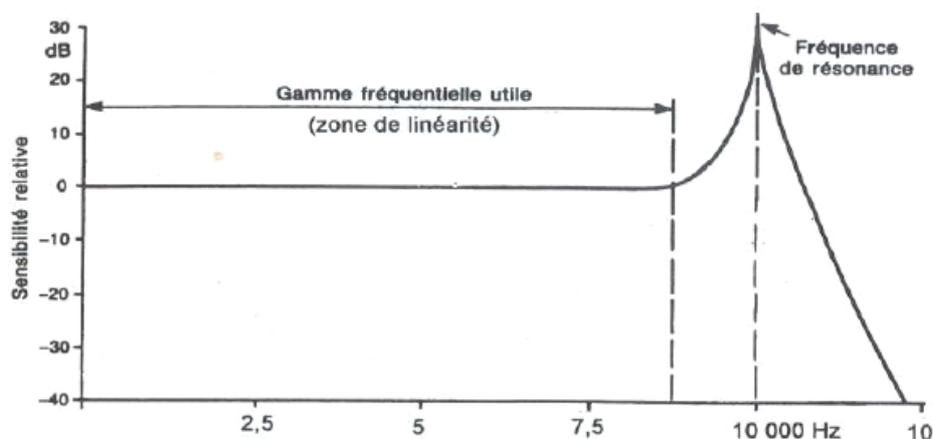


Fig 2.12: courbe de réponse d'un accéléromètre

### 2.3.5.4. Montage des capteurs de vibration [12]

#### 1°. Mise en position

Dans le cas des machines tournantes, les parties tournantes mobiles (ou rotors) sont guidés en rotation par des paliers qui peuvent être soit à roulements, hydrostatiques ou hydrodynamiques. Les paliers étant les parties qui sont sollicitées aux efforts statiques et dynamiques appliquées à la partie mobile, les principales mesures seront effectuées au niveau des paliers (**figure 2.14**).

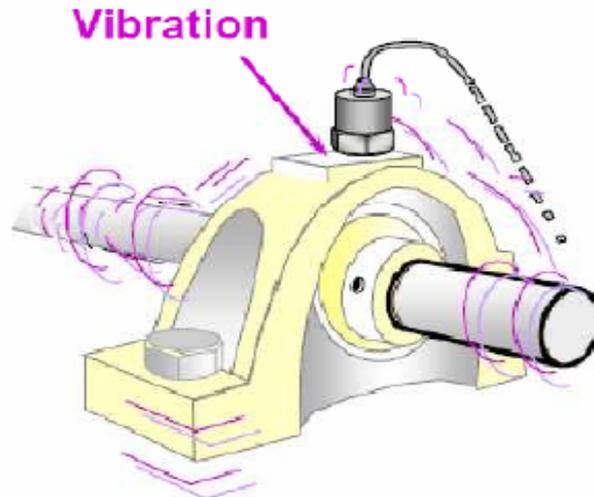


Fig 2.13: Fixation du capteur sur palier.

#### 2°. Type de chargements [8]

##### a. Charges tournantes

Ce sont les chargements liés aux **forces d'inertie** due à la rotation de l'arbre. Elles sont générés par un **déséquilibre** (balourd) ou un **désalignement**. L'amplitude des vibrations est mesurée dans un plan radial du palier (**figure 2.14**).

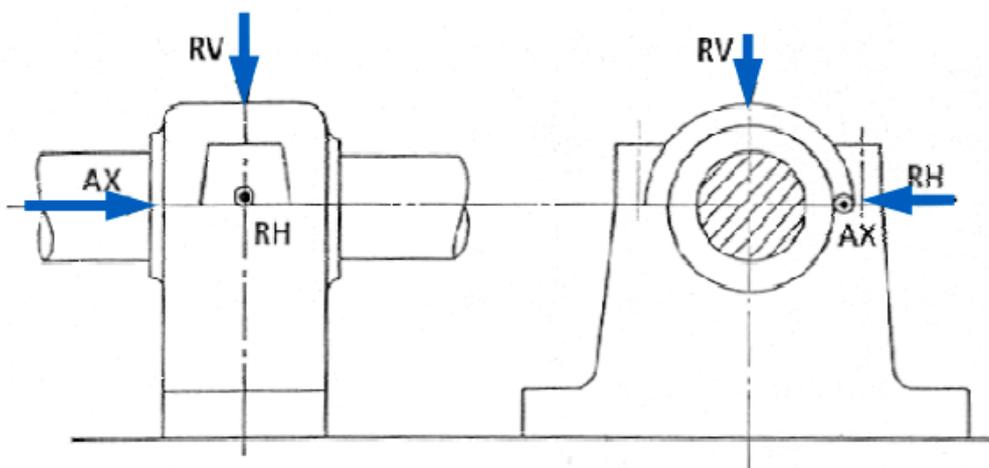
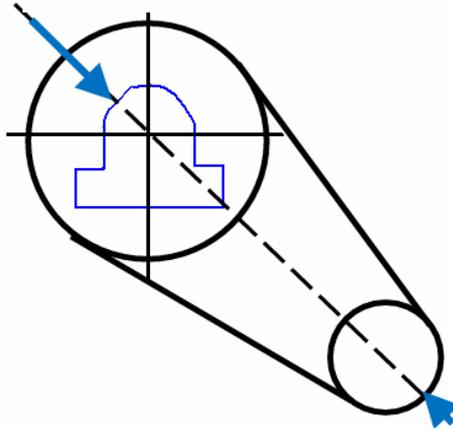


Fig2.14 : Choix directionnel pour la prise de mesure

**b. Charges directionnelles**

Ce sont les chargements liés à: l'existence d'une transmission:

- par liens flexibles (Courroie et chaînes) → Réaction Horizontale **RH** et réaction Verticale **RV**
- par engrenages → Réaction Horizontale **RH** et réaction Verticale **RV** et Poussée Axiale **AX**



**Fig 2.15 :** direction favorisée pour transmission par liens flexibles (Courroie et chaînes).

---

*Chapitre 03*

---

RÉALISATION PRATIQUE  
ET  
APPLICATION

---

### 3.1. INTRODUCTION

Généralement, dans une chaîne d'acquisition, on procède en premier lieu à l'acquisition des données, ensuite les faire importées manuellement dans un programme d'analyse. Seulement, à notre niveau, la réalisation des manipulations programmées dans les travaux pratiques de vibrations mécaniques, nécessite l'existence et la disponibilité d'un équipement ou d'un matériel dédié pour l'acquisition de données. Cependant, il faut savoir que cet équipement peut coûter relativement cher.

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 tel que celui implanté dans la carte électronique Arduino [1]. Ainsi l'utilisation de la plateforme Arduino, peut nous rendre service dans le montage des travaux pratiques en relation avec les sciences de l'ingénieur [2-4]. Cependant, il faut savoir que le logiciel Arduino ne contient pas tous les outils nécessaires pour le lissage des données ainsi que leur analyse. Ainsi, la solution qui est présentée dans ce chapitre et qui sera mise en oeuvre, permettra à un accéléromètre capacitif à base de *MEMS* et une carte électronique de la plateforme Arduino de procéder à l'acquisition des données, pour pouvoir ensuite les importer en temps réel dans un logiciel packagé dédié à l'analyse des données. Comme logiciels packagés dédiés à l'analyse des données on peut exploiter *MS – Excel*, *Matlab* et *LabView* qui peuvent importer directement les données à partir de la carte Arduino et autorisent en temps réel leur traçage et leur analyse. Parmi les objectifs de la plateforme Arduino, c'était d'utiliser une carte Arduino comme un macro-composant dans des applications de prototypage électronique pouvant être accessible à tout un chacun, dans le but de créer facilement des systèmes électroniques. Ainsi, avec un certain nombre d'avantages et d'inconvénients, le concepteur peut développer des interfaces et programmer le macro-composant pour réaliser ses applications.

#### Avantages

- *Platine simple et pas cher*
- *Multiplateforme : Windows, Macintosh et Linux.*
- *Environnement de développement clair, simple et évolutif avec logiciel de développement gratuit avec matériel open source et extensible.*
- *Beaucoup de bibliothèques disponibles avec diverses fonctions implémentées.*
- *Existence de cartes d'extension (shields) qui se connectent sur le module Arduino*
- *Conseils, tutoriaux et exemples en ligne (forums, site perso etc...)*
- *Large communauté de développeur et d'utilisateurs*

#### Inconvénients

- *Puissance de calcul limitée*
- *Processeur mono thread.*
- *Difficulté de gérer les modes sleep, wake up et interrupt.*

3.2. LE MATERIEL

3.2.1. Le système étudié

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 centrifuges 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. Pour notre réalisation, il s'agit du ventilateur illustré sur la **figure 3.1**.

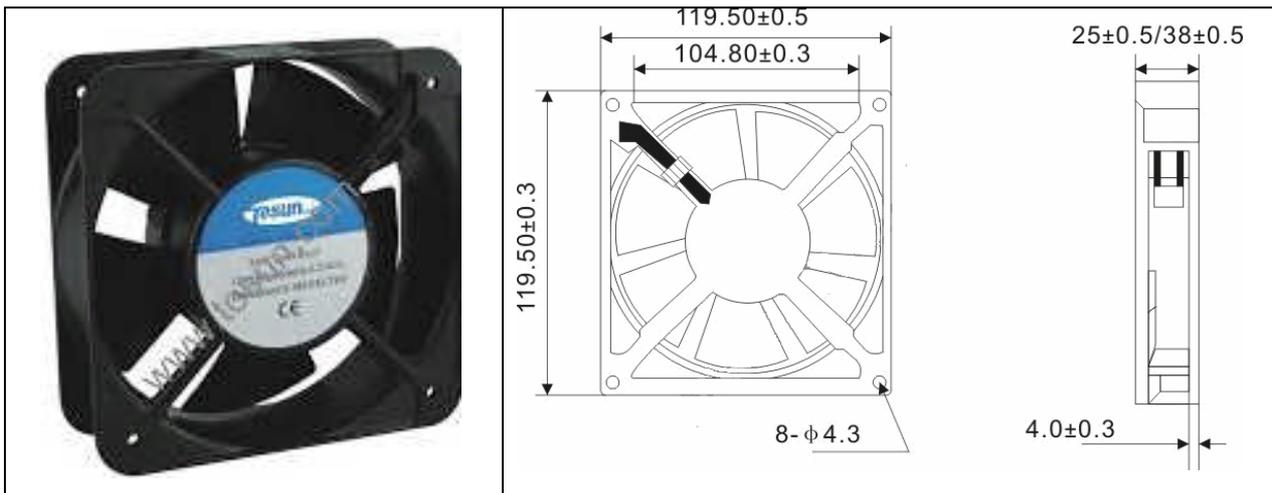


Fig 3.1: Le modèle de ventilateur (120 x 120 x 38mm) choisi pour l'étude de cas [www.tosun.com]

les principales caractéristiques techniques de cette gamme étant listées dans le **tableau 3.1**, notre choix s'est porté sur le modèle N° 03 vu sa disponibilité sur le marché local.

Tab 3.1: Caractéristiques techniques du ventilateur [www.tosun.com]

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

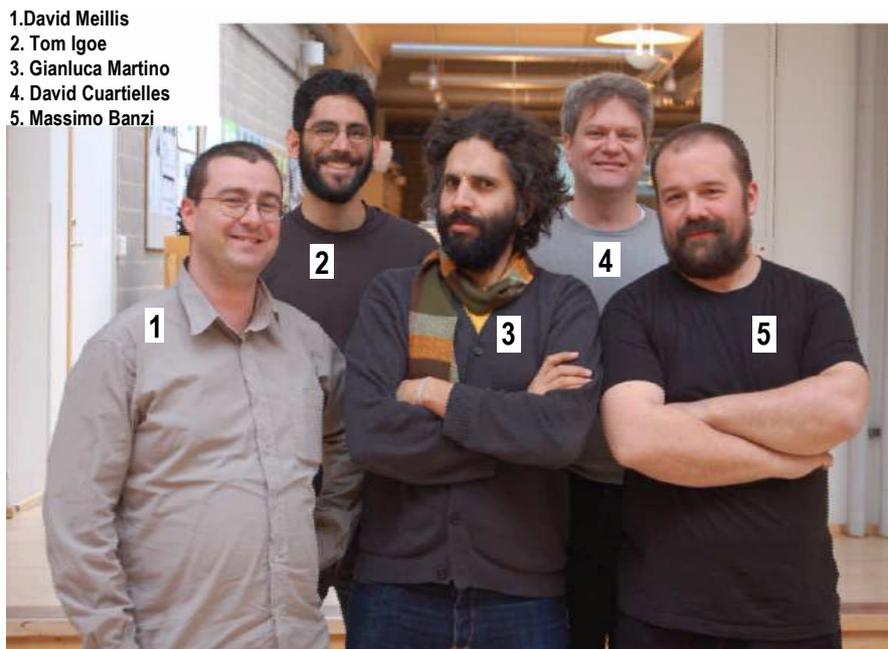
## .2.2. Plateforme Arduino

### 3.2.2.1 Le projet Arduino

Le projet Arduino a été développé par une équipe de professeurs et d'étudiants de l'école de Design d'Interaction d'Ivrea en Italie (**Figure 3.2**). Le nom Arduino trouve son origine dans le nom d'un bar (Bar di Re Arduino nommé ainsi en hommage à un roi italien, le roi **Arduin, marquis d'Ivrée** 955 -1015). C'est dans ce bar que l'équipe projet Arduino avait l'habitude de se retrouver. Au départ, la plateforme Arduino était un projet qui a été conçu à des fins pédagogiques. Etant située au croisement entre l'informatique, l'électronique et les travaux pratique elle devait être un avantages pour le monde éducatif avec pour objectifs:

1. être bon marché,
2. doté d'une grande quantité d'entrées et de sorties,
3. compatible les système d'exploitations Mac, Windows et Linux,
4. être programmable avec un langage très simple et open source.

Par la suite, elle s'est transformée au fur et à mesure en une plate-forme de prototypage d'objets interactifs à usage créatif constituée d'une platine de développement et d'un environnement de programmation. Ainsi, Arduino trouve son utilisation dans beaucoup de domaine tel que: L'électronique industrielle et embarquée ; donner une "intelligence" à un robot; permettre à un ordinateur de communiquer avec une carte électronique et différents capteurs; Le modélisme (télécommander un modèle réduit: voiture, avion, bateau, etc...); La domotique (Contrôler des appareils domestiques); L'art contemporain ou le spectacle ( réaliser des jeux de lumières), etc.



**Fig 3. 2:** Créateurs du projet Arduino

3.2.2.2 Les cartes Arduino

Arduino fait partie de la famille des platines de développement. Une platine de développement est en général un circuit imprimé équipé d'un microprocesseur ou d'un microcontrôleur. Sauf que contrairement aux platines Raspberry Pi et BeagleBone, elle ne possède pas d'un système d'exploitation basé sur Linux. Cependant, elle reste par contre l'une des cartes les plus abordables et des plus répandues.

Comme la carte Arduino est open source, il existe un grand nombre de clones et de cartes compatibles, tout comme il existe de nombreux modèles d'Arduino officiels, chacune avec des fonctions particulières. Les cartes Arduino ont été mise en œuvre dans le cadre du projet Arduino (Figure 3.3). C'est une famille de quatre cartes principales, conçues autour d'un microcontrôleur programmable associé à un logiciel multiplateformes gratuit:

- Arduino Nano,
- Arduino Uno,
- Arduino Leonardo
- Arduino Mega

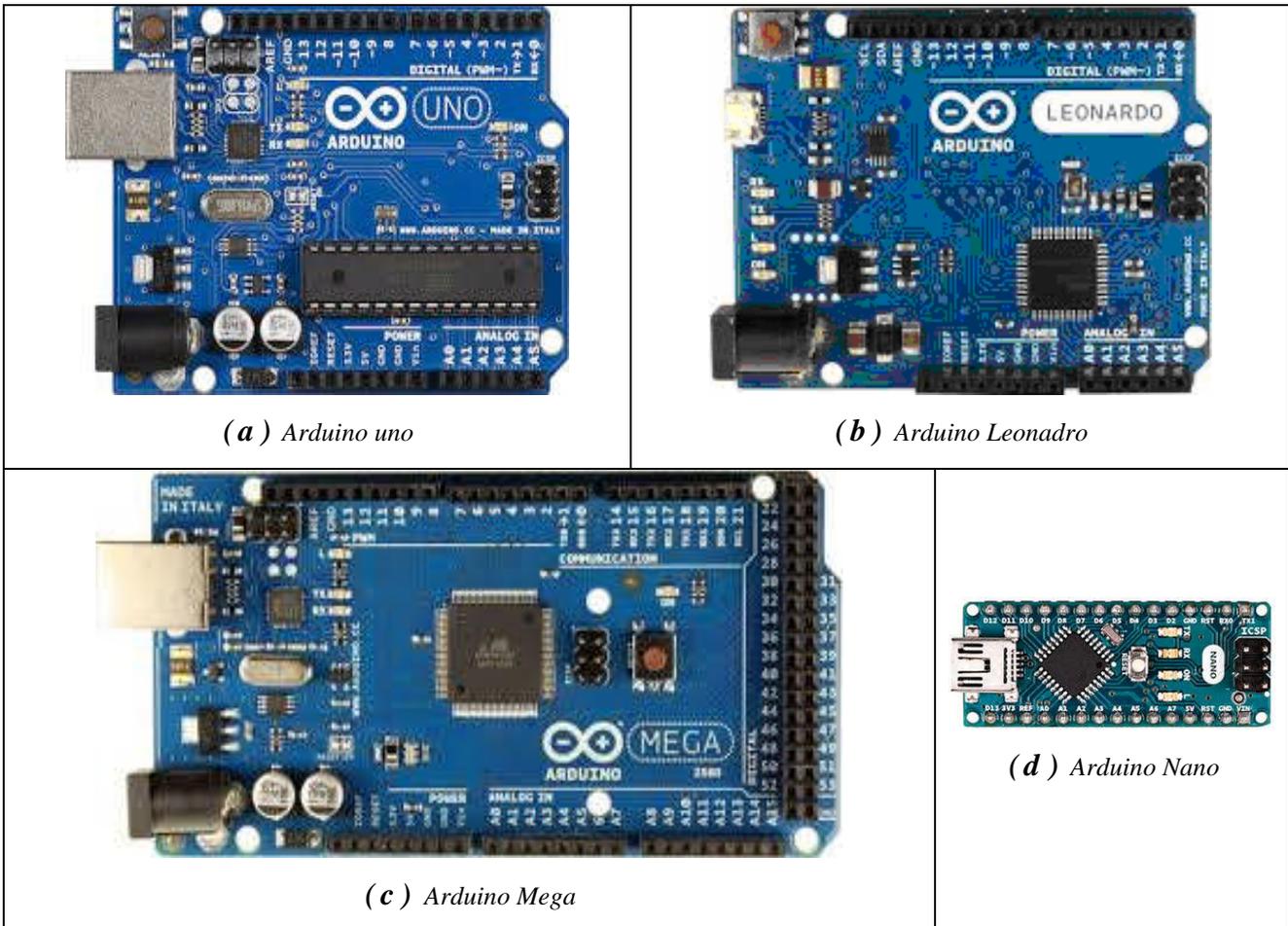


Fig 3.3: La famille des platines Arduino

3.2.2.3. Critère de choix d'une platine Arduino

L'intérêt principal des cartes Arduino est leur facilité de mise en oeuvre. Arduino fournit un environnement de développement s'appuyant sur des outils open source. Le chargement du programme dans la mémoire du microcontrôleur se fait de façon très simple par port USB. Le choix d'une platine de développement Arduino, est dicté par le besoin du concepteur du montage. **Le tableau 3.2** donne l'orientation du choix d'une platines Arduino en fonction des objectifs et les besoins recherchés [[www.txrobotic.com](http://www.txrobotic.com)]. Selon notre besoin, c'est-à-dire réalisation d'un montage pas cher pour mesure des vibrations , notre choix s'est orienté vers l'Arduino Uno. Cependant, un autre modèle ou un clone peut aussi faire l'affaire..

Tab 3.2: Choix d'une platine Arduino en fonction des objectifs recherchés

Objectifs recherchés	Arduino
Commencer à programmer à <b>moindre coût</b>	Uno
Chercher à <b>brancher une multitude de capteurs, utiliser plusieurs périphériques en série</b>	Mega
Souhaiter les mêmes propriétés que l'Arduino Mega mais avec une <b>puissance de calcul supérieure</b>	DUE
Chercher à <b>miniaturiser le montage</b>	Mini.
Cherchez un véritable <b>ordinateur embarqué</b> comparable à une platine Raspberry™	Yun

3.2.2.4. Carte Arduino Uno

1°. Description et caractéristiques

Il existe deux modèles d'Arduino Uno: un modèle avec un microcontrôleur DIP (**figure 3.3a**), et un autre avec un microcontrôleur SMD (**figure 3.4b**). D'un point de vue utilisation, il n'y a pas de différence entre les deux types de platines. Les couleurs de l'Arduino peuvent varier du bleu au bleu-vert, en fonction des modèles et années de production.

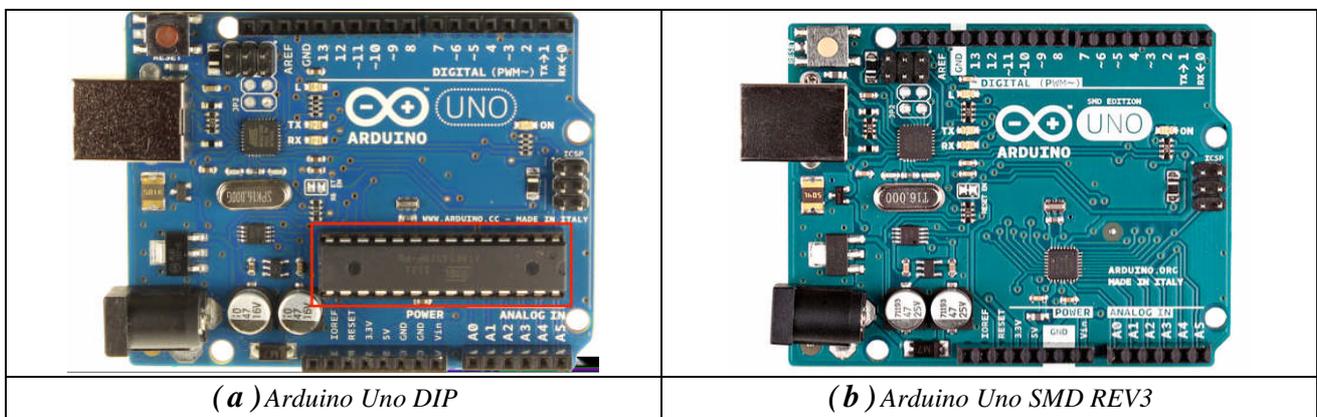


Fig 3.4: Aperçu d'une Arduino Uno à micro-contrôleur DIP et SMD

Pour notre projet on a opté pour la Arduino Uno SMD REV3. C'est une carte électronique dont le coeur est un microcontrôleur ATmega328 de l'entreprise ATMEL ( Fig 3.5 et Tab3.3). On peut l'avoir actuellement pour **3 600 DA** . Programmée en langage C son logiciel est gratuit, open source et elle peut être interfacée à un micro-ordinateur via un port USB. La carte Arduino Uno, peut interfacé avec pas mal de capteurs en dessous de **1 000 DA** . Entre autre le LM35 comme capteur de température, le TSL2561 comme capteur de luminosité et le ADXL-335 3 axes comme accéléromètre[5] . [5] <https://www.adafruit.com>

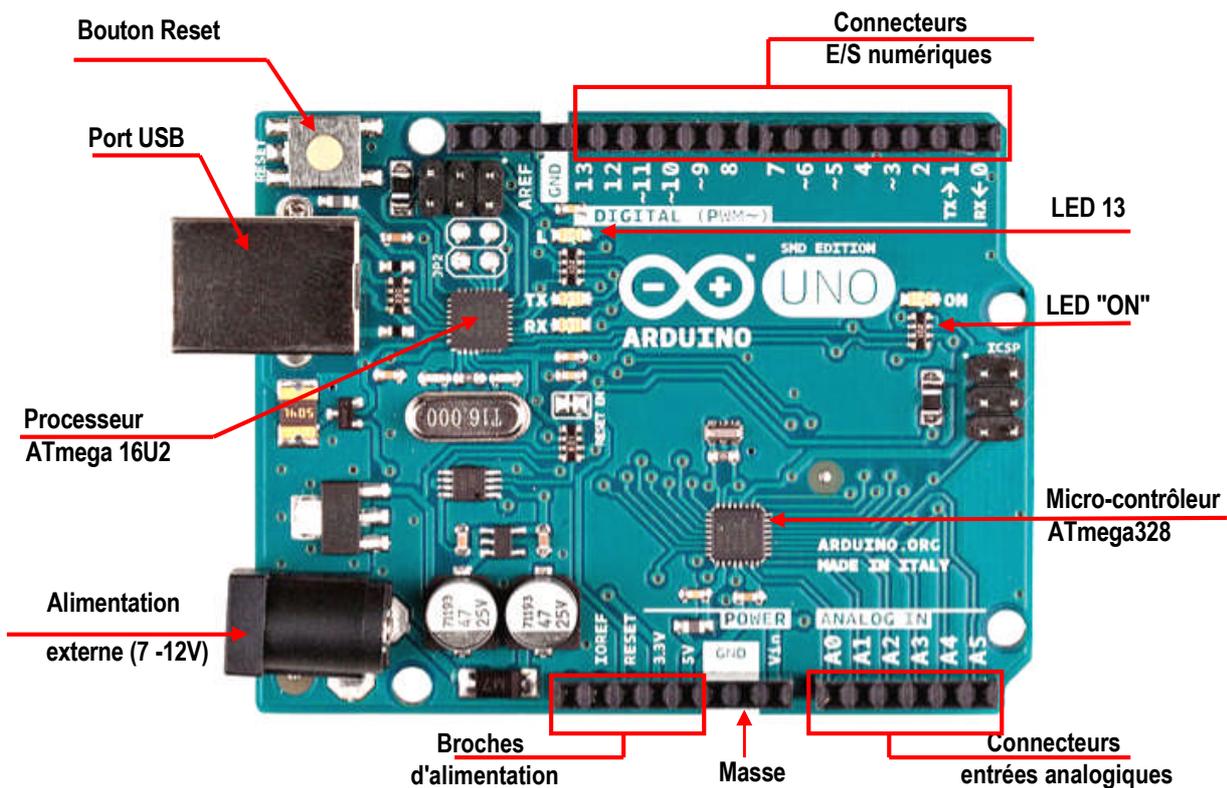


Fig 3.5: Description d'une Arduino Uno SMD

Caractéristiques de la carte Arduino uno			
Dimensions	<b>68.6 mm × 53.3 mm</b>	Courant max par broches E/S	<b>40 mA</b>
Micro-contrôleur	<b>ATmega328</b>	Courant max sur sortie 3.3V	<b>50 mA</b>
Tension d'alimentation interne	<b>5V</b>	Mémoire Flash	<b>32 ko</b> dont <b>0.5 ko</b> utilisée par le bootloader
tension d'alimentation	<b>7 à 12V</b>	Mémoire <b>SRAM</b>	<b>2 ko</b>
E/S numériques	<b>14</b> dont <b>6 sorties PWM</b>	Mémoire <b>EEPROM</b>	<b>1 ko</b>
Entrées analogiques	<b>6</b>	Fréquence horloge	<b>16 Mhz</b>

Tab 3.3 : Caractéristiques d'une Arduino Uno SMD

2°. Architecture

Globalement, la carte Arduino Uno SMD REV3 est un micro-contrôleur à **14** sorties digitales et **6** entrée analogiques [6] <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>. Les signaux d'entrée-sortie du microcontrôleur sont reliés à des connecteurs selon le schéma (figure 3.6)

Le microcontrôleur ATmega328 est un microcontrôleur 8 bits de la famille AVR dont la programmation peut être réalisée en langage C. Il dispose de **14** broches d'entrée / sortie numériques (dont **6** peuvent être utilisées comme sorties PWM), 6 entrées analogiques, un oscillateur à cristaux liquides de 16 MHz, une connexion USB, une prise de courant, un en-tête ICSP et un bouton de réinitialisation(Reset). Il contient tout le nécessaire pour supporter le microcontrôleur; Il suffit de le connecter à un ordinateur avec un câble USB ou de l'alimenter avec un adaptateur AC-DC ou une batterie pour démarrer.

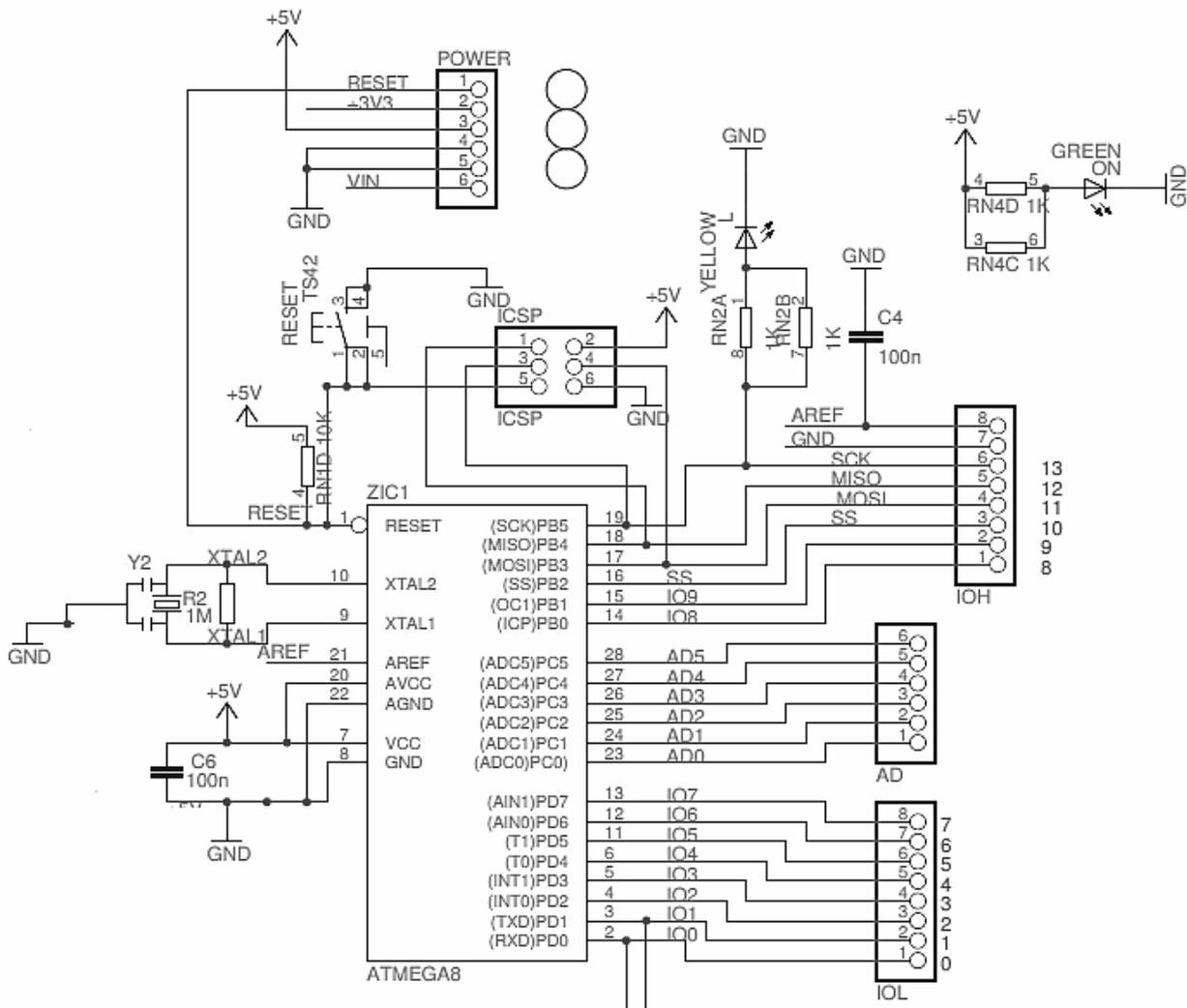


Fig 3.6: Schéma simplifié d'une Arduino Uno SMD

3°. Les shields (ou cartes d'extension)

Les shields sont des cartes supplémentaires qui se montent sur le module Arduino pour augmenter ses possibilités et étendre sa capacité . Parmi les principaux shields on a (figure 3.7):

- Module d' interface ethernet
- Module GSM
- Module WiFi
- Module de relais
- Afficheur graphique couleur LCD
- Commande de moteur-robotique
- Module GPS,
- etc...

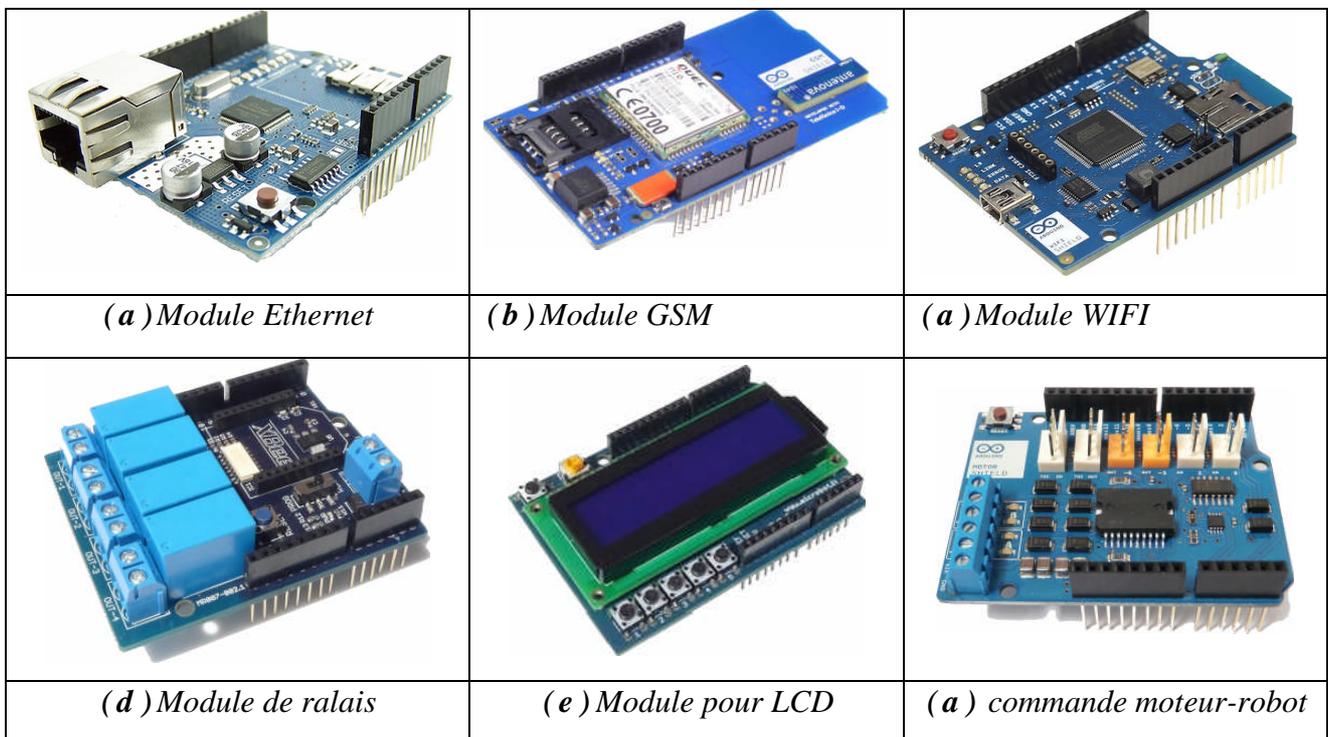


Fig 3.7: Quelques shields pour module Arduino Uno

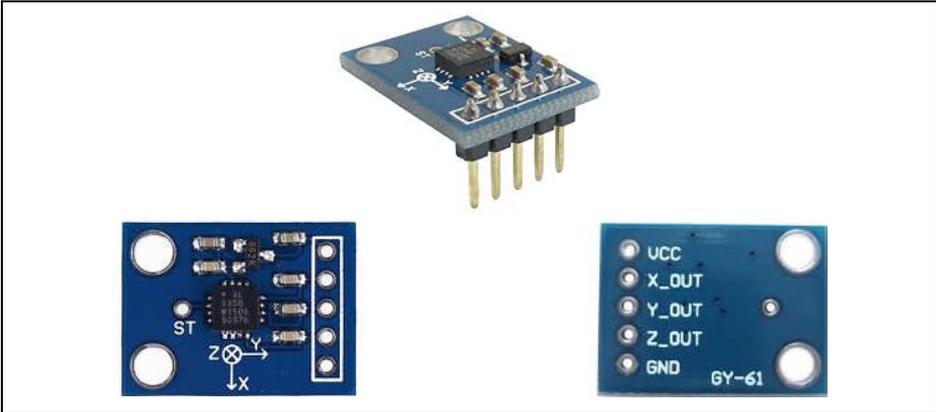
### 3.2.3. L'accéléromètre

Pour capter les réponses vibratoires on utilise des accéléromètres. Parmi les accéléromètres qu'on rencontre, il existe :

- des accéléromètres analogiques pour lesquels le signal devra être numérisé par le CAN du microcontrôleur. Dans ce cas, il reviendra au développeur de faire appliquer la loi régissant la mesure.
- des accéléromètres numériques qui ont leur propre CAN embarqué. Ces capteurs gèrent eux même la loi régissant la mesure. La communication avec ces accéléromètres se fait souvent selon un protocole particulier (I<sup>2</sup>C, OneWire, etc...).

#### 1°. Description et caractéristiques

Pour notre projet, et pour rester dans la logique des petits budgets, on a opté pour un accéléromètre capacitif numérique similaire à ceux utilisés dans les smartphones. Pour ce faire, le modèle d'accéléromètre utilisé dans notre cas est un module d'accéléromètre capacitif MEMS GY-61 ADXL 335 3-axes qui sera relié à une carte électronique Arduino Uno (**Figure 3.8**).



Tension carte: <b>3.3V</b>
Tension sortie analogique: <b>1.65V</b>
Tension d'alimentation: <b>3.3V → 5V</b>
Puce du capteur: <b>ADXL335</b>
Tension : <b>3V → 5V</b>
Intensité d'alimentation: <b>400 μA</b>
Interface: Sortie analogique
Plage de mesure: <b>± 3 g</b>
Température de fonctionnement: <b>-40°C → 85°C</b>
Sensibilité: <b>300 mV/g</b>
Précision <b>±10%</b>
Matériau/ <b>PCB – Cuivre</b>
Dimension: <b>21 × 16 × 10mm</b>
Poids: <b>2g</b>
Couleur: <b>Bleu</b>

**Fig 3.8 :** Caractéristiques du module d'accéléromètre GY-61ADXL 335 3-axes

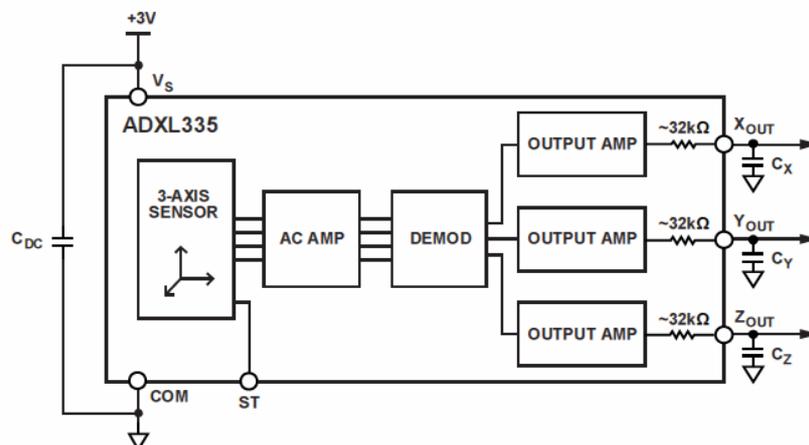
## 2°. Architecture

La plage de mesure de cet accéléromètre est  $\pm 3g$  dans les trois directions orthogonales  $X$ ,  $Y$  et  $Z$ . Pour les directions horizontales  $X$  et  $Y$ , il peut lire une plage de fréquences allant de  $0.5\text{ Hz}$  à  $1600\text{ Hz}$ . Et pour la direction verticale  $Z$ , il peut lire une plage de fréquences allant de  $0.5\text{ Hz}$  à  $550\text{ Hz}$ .

Pour fonctionner, l'accéléromètre a besoin entre  $1.8V$  et  $3.6V$ , la sortie  $5V$  de la carte Arduino peut être utilisée pour avoir  $3V$ . Cependant, cela signifie que le simple fait de brancher l'un des axes du module ADXL335 sur l'une des sortie analogique d'Arduino, cause problème. Pour résoudre cette contrainte, on branche la tension d'alimentation ainsi que l'accéléromètre sur le pin  $AREF$  de la carte Arduino et en lui déclare dans le programme, d'utiliser ce voltage comme voltage de référence au lieu du voltage par défaut de  $5V$ .

Le capteur de l'accéléromètre ADXL 335, est un capteur en poly silicône à surface micro usinée obtenu sur un silicône wafer, dont il y a une masse imperméable appelée masse sismique qui est attachée à des plaques déformables. Lorsqu'elles sont soumises à une accélération, les plaques sont déviées par la masse et cette déflexion est mesurée par un condensateur différentiel. Ce dernier est constitué de plaques fixées indépendamment et de plaques reliées à la masse sismique. Les plaques fixes sont entraînées par  $180$  degré, lorsque les plaques sont déviées, le condensateur différentiel se déséquilibre et donne un signal de sortie d'une onde carrée dont l'amplitude est proportionnelle à l'accélération. En utilisant des techniques de démodulation sensibles à l'amplitude de phase et à la direction de l'accélération, il est possible de le déterminer.

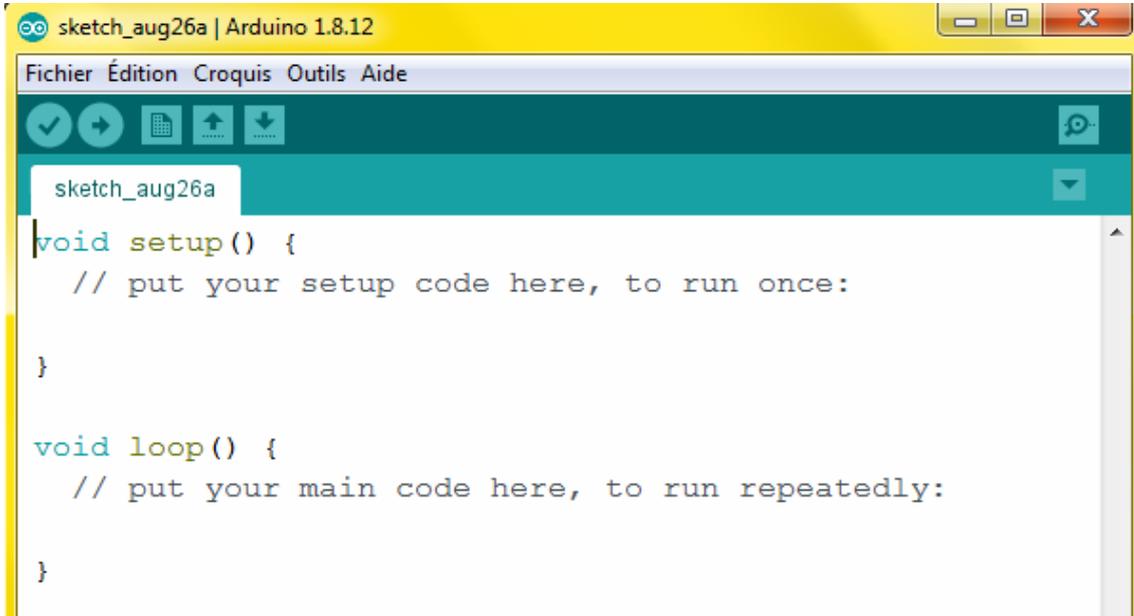
Le signal est ensuite amplifié et pris à travers une résistance de  $32\text{ kW}$  et donc un signal pour chaque axe sera disponible. Chaque signal passe ensuite par un condensateur de  $0,1\text{ }\mu\text{F}$  qui, comme cela a été mentionné précédemment, agit comme un filtre passe-bas. L'ADXL335 utilise une structure pour les axes  $X$ ,  $Y$  et  $Z$  qui donne à l'axe une orthogonalité élevée qui à son tour conduit à une faible sensibilité à l'axe transversal.



**Fig 3.9:** Diagramme blocs fonctionnel du ADXL335-3axes [<http://www.analog.com/en/parametricsearch/11175>]

### 3.3. LOGICIEL

Pour piloter la carte Arduino UNO on installe sur PC le logiciel du même nom Arduino (version 1.8.12 dans notre cas) qui est une application Java et qui a l'interface montré dans la **figure 3.10**.

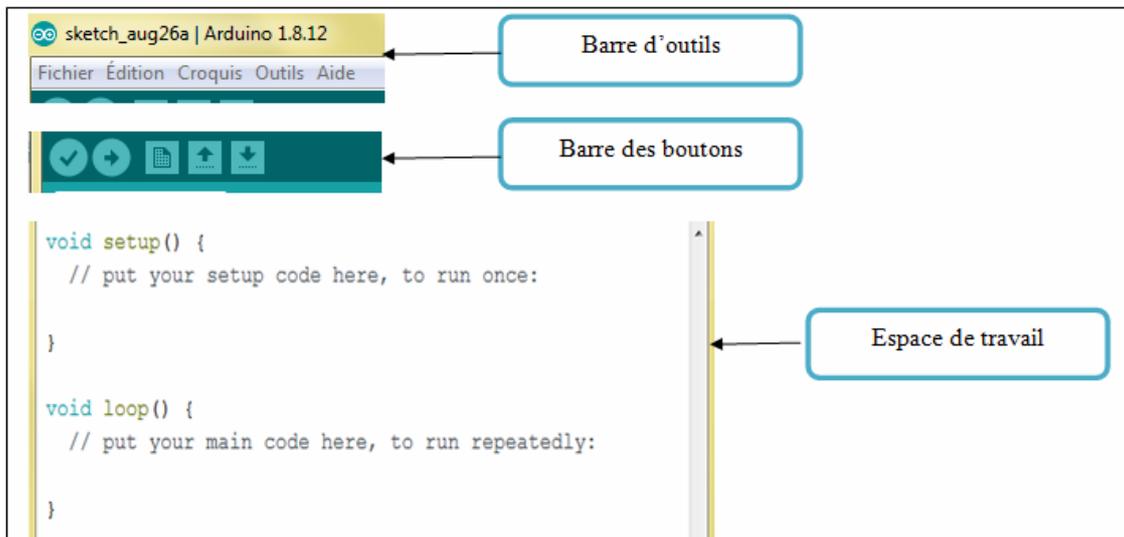


*Fig 3.10 : Vue d'ensemble du logiciel Arduino*

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.



*Fig 3.11 : Interface du logiciel Arduino*

Cet espace de développement intégré (IDE: Integrated Development Environment) 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 D'OUTILS** qui donne un accès direct aux fonctions essentielles du logiciel (Compiler, Télé-verser)
- Un **MONTEUR 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

### **3.4 MESURE VIBRATOIRE EN NIVEAU GLOBAL**

#### **3.4.1 Principe**

La mesure des vibrations en niveau global permet de qualifier l'état général d'une machine par comparaison à des normes ou des mesures précédentes. Cette stratégie de surveillance consiste en un suivi de l'évolution dans le temps d'un ou de plusieurs indicateurs (déplacement, vitesse ou accélération). Les vibrations mécaniques sont détectées par un capteur de vibrations, monté sur le palier de la machine, qui convertit le signal mécanique en un signal électrique qui sera acheminé à un mesureur de vibrations pour l'analyser et afficher la valeur globale.

Le suivi se fait de deux façons différentes : continue (en ligne), ou périodique sous forme de rondes plus ou moins espacées dans le temps. La périodicité des mesures est adaptée en fonction de l'évolution des indicateurs. Plus une augmentation est rapide, plus les contrôles doivent être rapprochés. Il est obligatoire que les conditions de fonctionnement de la machine ainsi que les conditions de mesure (vitesse, charge, températures etc.) doivent être rigoureusement identiques d'une mesure à l'autre.

#### **3.4.2 Choix de la grandeur à mesurer**

Le choix de la grandeur à mesurer (déplacement, vitesse ou accélération) pour la surveillance d'une machine tournante dépend essentiellement du défaut recherché et la plage de fréquences dans laquelle il est susceptible de s'exprimer. La grandeur retenue est appelée paramètre ou indicateur de surveillance (**Tableau 3.4**).

Tab 3.4: Domaine de surveillance des indicateurs vibratoires

Indicateurs (NG)	Domaine de surveillance
Déplacement ( $\mu\text{m c/c}$ )	<i>Phénomènes lents basses fréquences [2–100 Hz]: balourd, désalignement, instabilités de paliers etc.</i>
Vitesse (mm/s eff)	<i>Moyennes fréquences [1 000 Hz]: balourd, lignage, instabilités de paliers, cavitation, passage d'aubes, engrènement etc.</i>
Accélération (g eff)	<i>Phénomènes très rapides Hautes fréquences [20 000 Hz]: engrenages, roulements, passages d'ailettes, cavitation...</i>

### 3.5. PROTOTYPE

#### 3.5.1. Le code source

```

#include <LiquidCrystal.h>
LiquidCrystal lcd(7, 6, 5, 4, 3, 2);
#include <TrueRMS.h>
#include <math.h>
#define LPERIOD 1000 // loop period time in us. In this case 1.0ms
// #define ADC_INPUT 0,1,2 // define the used ADC input channel
#define RMS_WINDOW 40 // rms window of 40 samples, means 2 periods @50Hz
// #define RMS_WINDOW 50 // rms window of 50 samples, means 3 periods @60Hz
const int x_out = A0; /* connect x_out of module to A1 of UNO board */
const int y_out = A1; /* connect y_out of module to A2 of UNO board */
const int z_out = A2; /* connect z_out of module to A3 of UNO board */
unsigned long nextLoop;
int x_adc_value,y_adc_value,z_adc_value;
int cnt_x=0;
int cnt_y=0;
int cnt_z=0;
float VoltRange = 5.00; // The full scale value is set to 5.00 Volts but can be changed when using an
// input scaling circuit in front of the ADC.
double x_g_value, y_g_value, z_g_value;
Rms x_readRms ; // create an instance of Rms.
Rms y_readRms ; // create an instance of Rms.
Rms z_readRms ; // create an instance of Rms.

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  // run once:
  Serial.begin(9600);
  lcd.begin(16, 2);
  // Print a message to the LCD.
  lcd.print("start");
  delay(500);
  lcd.clear();
  // configure for automatic base-line restoration and continuous scan mode:
  x_readRms.begin(VoltRange, RMS_WINDOW, ADC_10BIT, BLR_ON, CNT_SCAN);
  y_readRms.begin(VoltRange, RMS_WINDOW, ADC_10BIT, BLR_ON, CNT_SCAN);
  z_readRms.begin(VoltRange, RMS_WINDOW, ADC_10BIT, BLR_ON, CNT_SCAN);
  // configure for no base-line restoration and single scan mode:
  //readRms.begin(VoltRange, RMS_WINDOW, ADC_10BIT, BLR_OFF, SGL_SCAN);
  x_readRms.start(); //start measuring
  y_readRms.start(); //start measuring
  z_readRms.start(); //start measuring
  nextLoop = micros() + LPERIOD; // Set the loop timer variable for the next loop interval.
}

```

```

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
  x_adc_value = analogRead(x_out); // read the ADC.
  y_adc_value = analogRead(y_out); // read the ADC.
  z_adc_value = analogRead(z_out); // read the ADC.
  x_g_value = ( ( (double)(x_adc_value * 5)/1024) - 1.64 ) / 0.300 *9.8; /* Acceleration in x-direction in g units */
  y_g_value = ( ( (double)(y_adc_value * 5)/1024) - 1.64 ) / 0.300 *9.8; /* Acceleration in y-direction in g units */
  z_g_value = ( ( (double)(z_adc_value * 5)/1024) - 2.00 ) / 0.300 *9.8; /* Acceleration in z-direction in g units */
  x_readRms.update(x_g_value); // update
  y_readRms.update(y_g_value); // update
  z_readRms.update(z_g_value); // update
  /*Serial.print("x en m/s2 = ");
  Serial.println(x_g_value );
  Serial.println("\t\t");
  Serial.print("y en m/s2 = ");
  Serial.println(y_g_value );
  Serial.println("\t\t");
  Serial.print("z en m/s2 = ");
  Serial.println(z_g_value );
  Serial.println("\t\t");
  delay(1000);*/
  cnt_x++;
  if(cnt_x >= 500) { // publish every 0.5s
    x_readRms.publish();
    y_readRms.publish();
    z_readRms.publish();
    Serial.print(x_readRms.rmsVal,4);
    Serial.println("rms ");
    lcd.println("xrms ");
    lcd.print(x_readRms.rmsVal,4);
    delay (1000);
    lcd.clear();
    Serial.print(y_readRms.rmsVal,4);
    Serial.println("rms ");
    lcd.println("yrms ");
    lcd.print(y_readRms.rmsVal,4);
    delay (1000);
    lcd.clear();
    Serial.print(z_readRms.rmsVal,4);
    Serial.println("rms ");
    lcd.println("zrms ");
    lcd.print(z_readRms.rmsVal,4);
    delay (1000);
    lcd.clear();
    cnt_x=0;
    cnt_y=0;
    cnt_z=0;
    /*float x_peak=x_readRms.rmsVal*sqrt(2); Serial.print(x_peak,3); Serial.println("peak "); lcd.println("peak ");
    lcd.print(x_peak,3); delay(100); cnt_x=0;*/
    x_readRms.start(); // Restart the acquisition after publishing if the mode is single scan.
    y_readRms.start();
    z_readRms.start();
    while(nextLoop > micros()); // wait until the end of the loop time interval
    nextLoop += LPERIOD; // set next loop time to current time + LOOP_PERIOD
  }
}

```

### 3.5.2 La maquette didactique

Le prototype réalisé est une maquette didactique alimentée par une batterie de **9V**. Elle est constituée des pièces suivantes:

- 01 Boîtier qu'on trouve dans le commerce;
- 01 Carte Arduino Uno abritée et fixée à l'intérieur du boîtier, .
- 01 Variateur de tension pour bien contrôler notre afficheur LCD,
- 01 Résistance pour protéger les trois LED
- 01 Capteur ADXL connecté à la carte.
- Fils de connexion entre la carte et les autres composants.(figure 3.12)



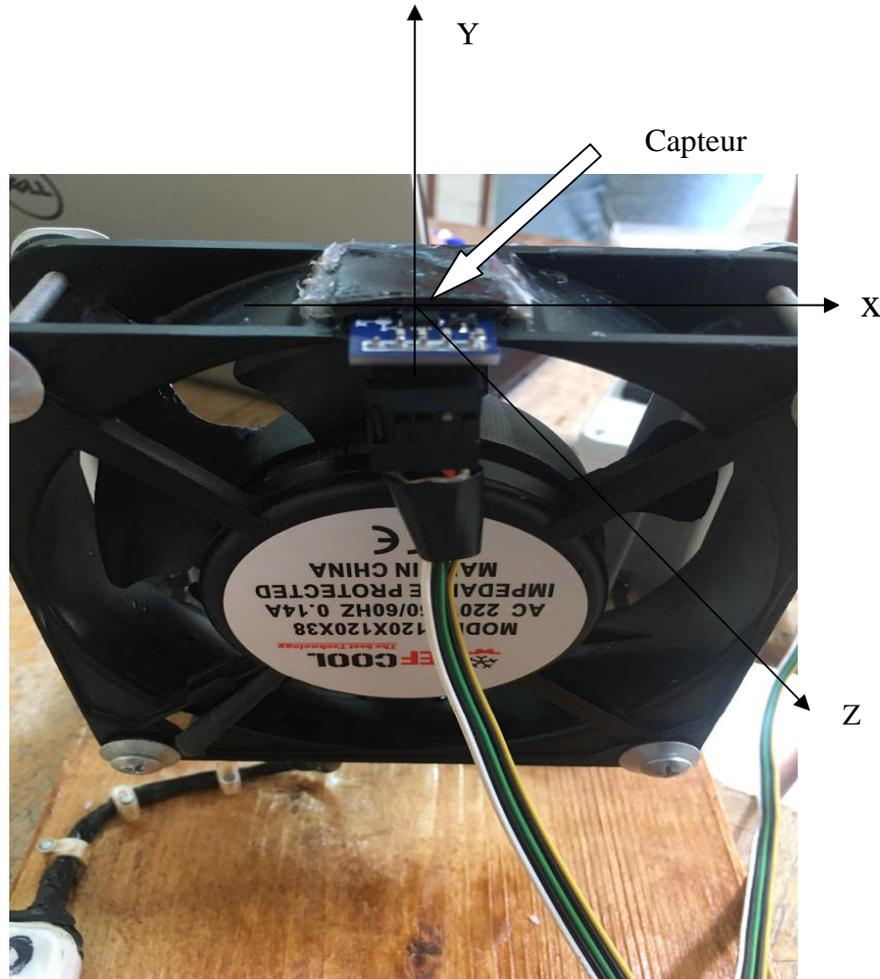
*Fig 3.12 : Montage de la maquette*

### 3.6 DEROULEMENT DES ESSAIS

Afin de mettre en pratique l'exploitation de notre maquette didactique, un certain nombre d'essais a été jugé nécessaire pour valider notre réalisation. Pour ce faire, trois essais de manipulation sont menés pour mesurer la valeur du RMS.

#### 3.6.1 Montage de l'accéléromètre

La partie tournante du ventilateur (c'est-à-dire flasque + pales) étant les parties qui sont les plus sollicitées aux efforts dynamiques et aérodynamiques, le capteur sera monté et localisé suivant la **figure 3.13**.



**Fig 3.13:** Montage et localisation du capteur ADXL

#### 3.6.2 Mesure du RMS

##### 3.6.2.1 Essai sans défauts de balourds

##### 1°. Mesure du RMS

Lors de la mise en marche de notre maquette (capteur positionné sur ventilateur) une LED verte est allumée et les valeurs  $X_{RMS}$ ,  $Y_{RMS}$  et  $Z_{RMS}$  sont affichées (**Figure 3.14**).



Fig 3.14 : L'affichage des valeurs RMS

2°. Résultats et interprétation

Les valeurs obtenues nous ont permis de tracer la courbe de la figure 3.15. Elle représente les valeurs RMS captées selon les trois axes en fonction du temps dans un intervalle de 28s.

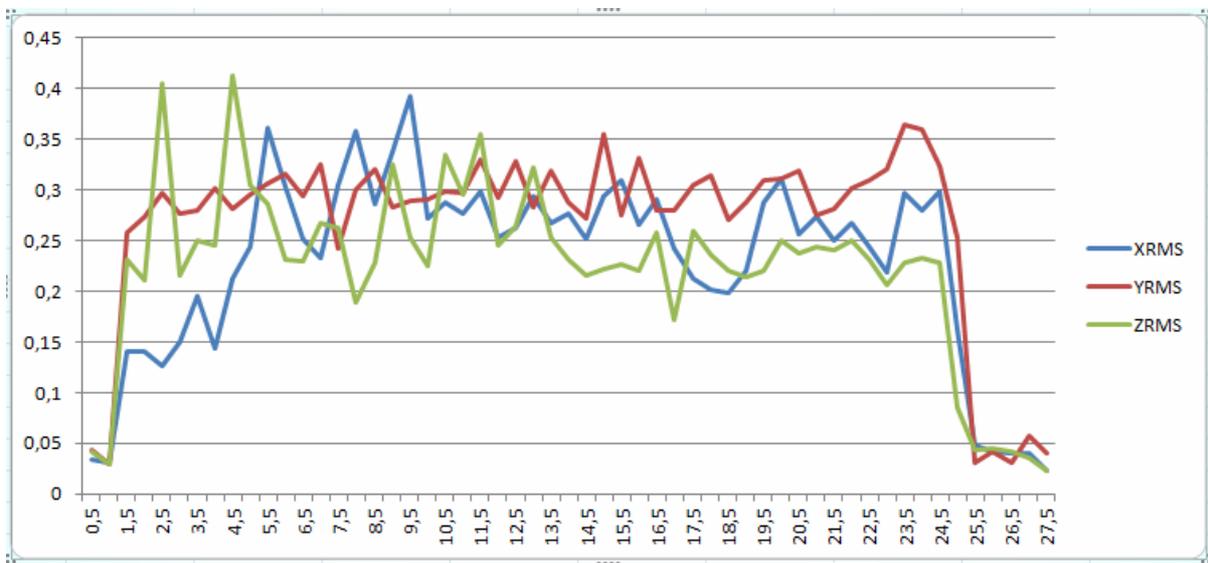


Fig 3.15 : Valeurs RMS de l'essai sans défauts

- **Sur l'intervalle de temps de [0s à 1.5s]:** phase de démarrage du ventilateur. Vu la réponse transitoire du capteur, on remarque que les différents RMS accroissent entre une valeur minimale de 0.04 et une valeur maximale de 0.41. On constate un pique de valeur (XRMS =0.14 ; YRMS =0.26 ; ZRMS =0.24 ).
- **Sur l'intervalle de temps de [1.5s à 24s]:** phase de fonctionnement du ventilateur. On constate que le signal vibratoire mesuré devient t stationnaire ; tel que : le XRMS fluctue entre 0.2 et 0.35, le YRMS fluctue entre 0.24 et 0.36 et le ZRMS varie progressivement de 0.4 pour atteindre 0.25
- **Sur l'intervalle de temps de [24s à 28s]:** phase d'arrêt du ventilateur. On assiste à une décroissance brutale des valeurs RMS des trois axes pour s'annuler vers la fin.

3.6.2.2 Essai avec défaut de balourd

Dans cet essai un défaut de balourd est provoqué afin de déstabiliser la dynamique du ventilateur. Pour ce faire, deux essais seront conduits en fixant successivement au niveau du flasque du ventilateur à une distance  $r = 25mm$  de l'axe de rotation de ventilateur deux petites masses supplémentaires  $m_1 = 0.2g$  et  $m_2 = 0.4g$ .

1°. Mesure du RMS

Une fois le ventilateur mis en marche, une LED jaune est allumée et les valeurs XRMS, YRMS et ZRMS sont affichées (Figure 3.16).



Fig 3.16 : L'affichage des valeurs RMS

2°. Résultats et interprétation

a. Cas 01:

Le premier cas d'essai on provoque un balourd en fixant sur flasque tournant une masse  $m_1 = 0.2g$  située par rapport à l'axe de rotation à une distance de  $r = 25mm$ . Une fois les données acquises, on obtient le graphique de la figure 3.17.

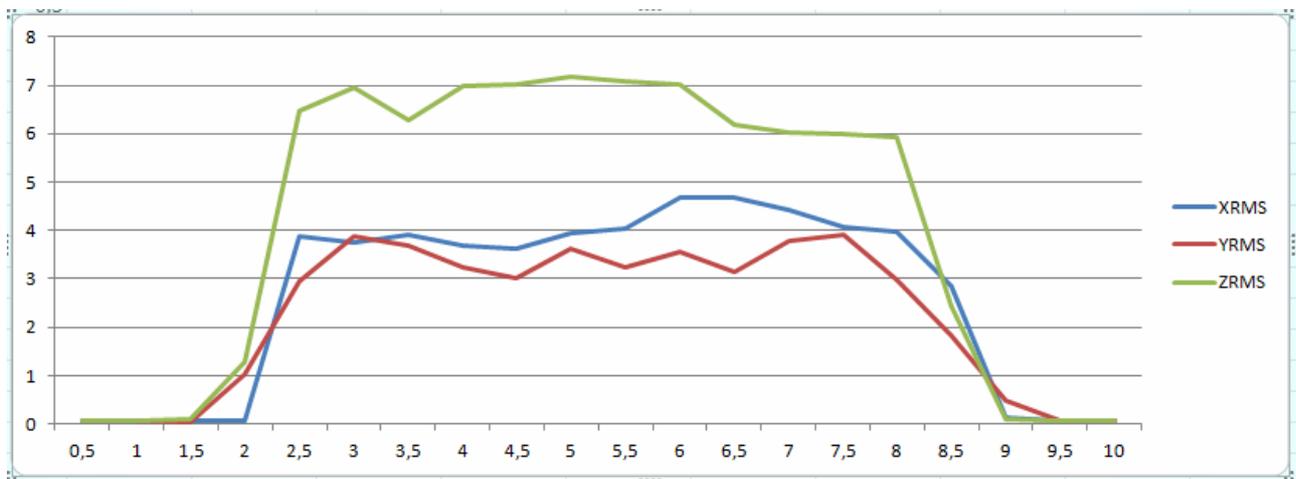
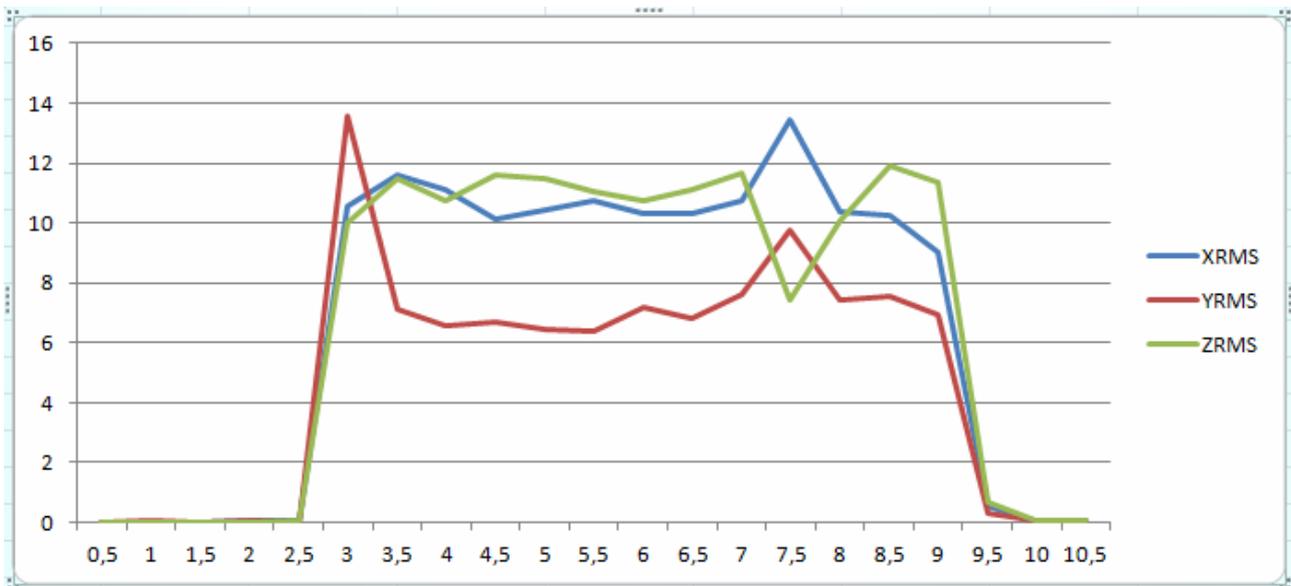


Fig 3.17 : Valeurs RMS de l'essai avec balourd

- **Sur l'intervalle de temps de [0s à 2.5s]:** On remarque un saut de pique de valeur  $XRMS=3.9$  ;  $YRMS=3.5$  et  $ZRMS =6.5$ . Cette variation exprime la réponse transitoire du capteur.
- **Sur l'intervalle de temps de [2.5s à 8.5s]:** Lors du fonctionnement du ventilateur .On remarque que le signal devient approximativement stable Or : le  $XRMS$  varie autour de 4.5 ; le  $YRMS$  varie autour de 4 et le  $ZRMS$  varie progressivement de 3 pour atteindre 7.2 ; Ces résultats peut se traduire par un fonctionnement anormal de notre machine.
- **Sur l'intervalle de temps de [8.5s à 10s]:** Le ventilateur s'est arrêté. Les valeurs RMS diminuent pour qu'elles atteignent leurs fins.

### **b. Cas 02:**

Le deuxième cas, d'essai on provoque un balourd en fixant sur flasque tournant une masse  $m_1 = 0.4g$  située par rapport à l'axe de rotation à une distance de  $r = 25mm$  . Une fois les données acquise, on obtient le graphique de la **figure 3.18**.



**Fig 3.18 :** Valeurs RMS de l'essai avec balourd

- **Sur l'intervalle de temps de [0s à 3s]:** Au démarrage du ventilateur, on constate un pique transitoire de valeur  $XRMS =10.5$  ;  $YRMS =13.5$  ;  $ZRMS =10$ .
- **Sur l'intervalle de temps de [3s à 9s]:** Lors du fonctionnement du ventilateur On constate que le signal vibratoire mesuré est oscillatoire ; Or : le  $XRMS$  fluctue entre 10 et 13.5, le  $YRMS$  fluctue entre 6.3 et 9.8 et le  $ZRMS$  fluctue entre 7.8 et 12. Cela explique l'absence de tout phénomène de vibration normal.
- **Sur l'intervalle de temps de [9s à 10.5s]:** Le ventilateur s'arrête .Les valeurs RMS suivant les trois axes baissent jusqu'à ce qu'elles s'éliminent.

**3.7 CONCLUSION**

Nous avons présenté la maquette didactique que nous avons réalisée avec ses différentes parties et le déroulement des essais. La réalisation pratique de ce système est effectuée principalement avec une carte Arduino UNO. La mise en marche du système a montré le bon fonctionnement de notre conception.

---

---

**CONCLUSION GÉNÉRALE  
ET  
PERSPECTIVES**

---

---

Toutes les machines vibrent et le spectre des fréquences de leurs vibrations a un profil particulier lorsqu'elles sont en état de "bon fonctionnement". Mais dès que les phénomènes d'usure, de fatigue, de vieillissement apparaissent, le profil de ce spectre se modifie. L'analyse des vibrations ouvre de réelles perspectives de diagnostic et devient par là un élément important de la maintenance industrielle.

Dans ce travail, nous avons opté à concevoir et réaliser une maquette didactique qui a pour but d'analyser les vibrations des machines tournantes. Notre système est à base d'une carte Arduino UNO qui constitue la maquette raccordée à un accéléromètre et un afficheur LCD et programmée pour fonctionner avec tout type de moyenne machines et que l'on peut programmer sur d'autres puissance plus petites ou plus grandes. La réalisation pratique a montré le bon fonctionnement de notre système. En termes de qualité et de prix, notre système assure une bonne performance tout en gardant un coût de fabrication très abordable.

Durant ce travail nous avons appris beaucoup de nouvelles surtout que c'est la première fois pour nous de toucher ce domaine devient petit à petit une nécessité, nous sommes très satisfaits de ce que nous avons acquis durant la préparation et la réalisation de ce travail qui est très bénéfique pour nous. Nous espérons que ce système soit affiné en termes de design afin qu'il soit commercialisé entant que produit algérien. Également nous espérons que ce travail va apporter une aide précieuse aux futurs étudiants en maintenance industrielle et à toute personne qui désire étudier, comprendre ou réaliser un projet pareil.

---

---

**RÉFÉRENCES  
BIBLIOGRAPHIQUES**

---

---

**Bibliographies**

- [1] **DROUIN.B, SENICOURT. J.M, LAVASTE.F, FEZANS.G,** " De la mécanique vibratoire classique à la méthode des éléments finis.- Volume 1", Edition AFNOR, 1993.
- [2] **CARACCILO .A,** "Comment aborder les défaillance d'origine vibratoire", CETIM, MIDEST 2010.
- [3] **BOURGAIN.L, DART.R, BOURGAIN.J,** " Machines tournantes et circuits pulsés", Edition Dunod,Paris 1988.
- [4] **DUMAS.J, BENNEVAULT.B,**" Débuter la mesure vibratoire",01dB-STELL, Groupe MVI technologies. 2001.
- [5] **R. Keith Mobley,** " plant engineering maintenance , Root Cause Failure Analysis", Butterworth–Heinemann,USA,1999.
- [6] **F.OLLIVIER,** "Analyse des signaux aléatoires et identification des systèmes linéaires en vibrations et acoustique", Cours Master électronique Université Pierre et Marie Curie –Sorbone université, Paris 2013.
- [7] **J.L.Hall, S.Sundararajan, M.Naim,** "Mechanical Engineers-Handbook: Instrumentation, Systems, Controls, and MEMS, Volume 2, Chapter 1: Instruments statics", Third Edition. Edited by Myer Kutz, 2006 by John Wiley & Sons, Inc.
- [8] **G.Asch** et al, "Acquisition de données - du capteur à l'ordinateur", Edition Dunod, 1999.
- [9] **F. Landalosi,** " Surveillance des machines par analyse vibratoire- Partie 1", cours de techniques de surveillance.
- [10] **CALIN GALERIU, CHERYL LETSON,** and **GEOFFREY ESPER,** "An Arduino investigation of the RC circuit," Phys. Teach. 53, 285 (May 2015).
- [11] **CALIN GALERIU, SCOTT EDWARDS,** and **GEOFFREY ESPER,** "An Arduino investigation of simple harmonic motion," Phys. Teach. 52, 157(March 2014).
- [12] **MARCO SCHWARTZ** and **OLIVER MANICKUM,** "Programming Arduino with LabVIEW" (Packt Publishing), ISBN: 978-1-84969-822-1
- [13] **M. JASKULA, M. LAZORYSZCZAK, S. PERYT,** "Fast MEMS application prototyping using Arduino/LabView pair measurement," Automation Monitoring 61 (12), (Dec. 2015).
- [14] <https://www.arduino.cc/>.
- [15] <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>
- [16] [www.arduino.cc/en/Main/Software](http://www.arduino.cc/en/Main/Software)
- [17] <https://www.adafruit.com>
- [18] <http://www.instructables.com/id/Sending-data-from-Arduino-to-Excel-and-plotting-it>
- [19] <https://www.mathworks.com/videos/using-matlab-and-arduino-to-acquire-analog-signals-100739.html>
- [20] <https://www.google.com/sheets/about/>
- [21] <https://zestedesavoir.com/tutoriels/686/arduino-premiers-pas-en-informatique-embarquee/>

---

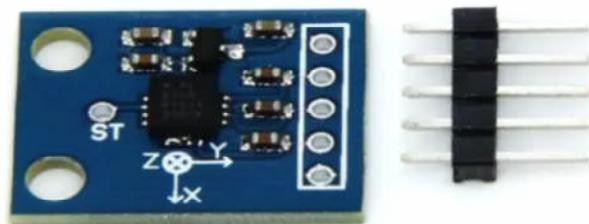
---

# **ANNEXE**

---

---

### A1: GY-61 ADXL335 3-Axis Accelerometer Module



GY-61 ADXL335 3-Axis Accelerometer Module is a three axis accelerometer sensor module based on ADXL335 integrated circuit. The ADXL335 is a triple axis accelerometer with extremely low noise and power consumption. The sensor has a full sensing range of  $\pm 3g$ . It can measure the static acceleration of gravity in tilt-sensing applications, as well as dynamic acceleration resulting from motion, shock, or vibration.

There is an on-board 3.3V voltage regulator to power the ADXL335 so power provided should be between 3.3V and 6V DC Model:

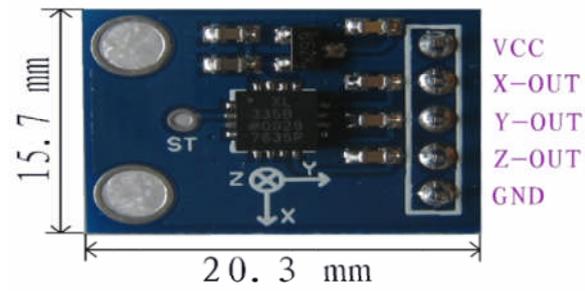
- GY-61
- Three-axis magnetic field accelerometer module
- Compact size, low power supply
- Used for game systems, mobile devices, etc

#### General Specifications

- ADXL335 3-axis Accelerometer
- On-board 3.3V Voltage Regulator
- Analog voltage output centered at 1.65V
- Suitable for connection to 5V and 3.3V systems

Technical Specifications	
Sensor Chip:	ADXL335
Operating Voltage Range:	3V ~ 5V
Supply Current:	400uA
Interface:	Analog quantity output
Full scale range:	$\pm 3g$
Operating Temperature :	$-40^{\circ}C \sim +85^{\circ}C$
Sensitivity	300mv /g
Sensitivity of accuracy (%)	$\pm 10$
Application	Various electronic products or DIY project
Material	PCB + Brass
Dimensions	21 x 16 x 10 mm / 0.83 x 0.63 x 0.39 inch
Weight	2 g / 0.07 oz
Color	Blue

## Dimensions



## Pin Definitions:

- 1.VCC:3.3V or 5V
- 2.X\_OUT:Analog Output
- 3.Y\_OUT:Analog Output
- 4.Z\_OUT:Analog Output
- 5.GND:Ground

## A2: NIVEAUX DE SEVERITE DES VIBRATIONS DES MACHINES

Classement par taille de machine					
Machine petite puissance ( P < 15kw)		Machine moyenne puissance ( 15kw < P < et 75kw)		Machine grande puissance ( P > 75kw)	
Vitesse mm/s RMS	L'état	Vitesse mm/s RMS	L'état	Vitesse mm/s RMS	L'état
0.28 0.45 0.71	A	0.28 0.45 0.71 1.12	A	0.28 0.45 0.71 1.12 1.80	A
1.12 1.80		1.80 2.80 4.50		2.80 4.50 7.10	
2.80 4.50 7.10 11.20	C	7.10 11.20 18.00	C	11.20 18.00	C
18.00 28.00 45.00		28.00 45.00		28.00 45.00	
	D		D		D