

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**

**FACULTE DE TECHNOLOGIE**

**DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**

**Présentée en vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT en Electrotechnique**

**Thème**

**Contribution à l'amélioration des performances de  
l'accéléromètre piézoélectrique**

**CANDIDATE**

**REGUIEG Salima Khaoula**

**DIRECTEUR DE THESE : Zine Ghemari (Prof), Université de M'sila**

**LE CO-ENCADREUR : Tarek Benslimene (Prof), Université de M'sila**

**Devant le jury:**

**Président : Sabir MESSALTI (Prof), Université de M'sila**

**Examineur : Loutfi BENYETTOU (MCA), Université de M'sila**

**Abdelaziz LAKEHAL (MCA), Université de Souk-Ahras**

*Je dédie ce travail à la mémoire de mon père*

## Remerciement

Je tiens à remercier en premier lieu, mon directeur de thèse Prof. Zine Ghemari à l'université de M'sila, pour la confiance dont il m'a gratifié, pour ses conseils, sa disponibilité ainsi que son soutien, quand tout allait bien, mais surtout quand ça allait moins bien, qui au-delà d'être un excellent mentor, auprès de qui j'ai fait mes premiers pas en vibration; Merci de m'avoir offert la possibilité d'orienter mes recherches avec une grande liberté.

Mes remerciements vont également à mon Co-encadreur Prof. Tarek Benslimane à l'université de M'sila, Je tiens spécialement à remercier Prof. Salah Saad à l'université Badji Mokhtar, Annaba, qui malgré la distance, a su être très présent et influant sur la qualité de ce travail, avec ses conseils.

Je tiens spécialement à remercier Mr. Sabir MESSALTI professeurs à l'université de M'sila, Mr. Loutfi BENYETTOU maitre de conférence à l'université de M'sila et Mr. Abdelaziz LAKEHAL maitre de conférence à l'université de Souk-Ahras, pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

Je tiens également à exprimer ma gratitude aux membres du laboratoire génie électrique université de M'sila, et tous les professeurs du département de génie électrique, université de M'sila.

Un gros merci à ma mère, mes sœurs et ma famille. Finalement, Je remercie beaucoup mon marié pour leur soutien moral.

# Table de matières

<b>Résumé.....</b>	<b>i</b>
<b>Table de matières .....</b>	<b>ii</b>
<b>Listedes figures .....</b>	
<b>Listedes tableaux .....</b>	
<b>Nomenclature .....</b>	
<b>Introduction générale .....</b>	
<b>Chapitre I: L'analysevibratoire.....</b>	<b>1</b>
I.1. Introduction .....	1
I.2. La maintenance et ses types.....	1
I.2.1 Définition .....	1
I.2.2 Evolution de la maintenance .....	2
I.2.3 Les méthodes de maintenance.....	2
I.3. Machines tournantes.....	6
I.4. Les principaux défauts des machines tournantes.....	8
I.5 La surveillance vibratoire de machines tournantes.....	11
I.5.1 La chaine de mesure de vibration.....	11
I.5.2 Les caractéristiques et types de capteurs.....	17
I.5.3 Le choix d'un accéléromètre.....	19
I.6. Les signaux vibratoires.....	20
I.6.1 La vibration.....	20
I.6.2. La nature des vibrations.....	21
I.6.3. Caractéristiques de vibration.....	22
I.6.4. Valeurs de vibrations admissibles.....	23
I.7. Etat de l'art des accéléromètres piézoélectriques.....	27
I.8. Conclusion.....	29
<b>Chapitre II:La piézoélectricité.....</b>	<b>26</b>
II.1. Introduction.....	26
II.2. La piézoélectricité.....	27
II.2.1. Historique.....	27
II.3. Principe de l'effet piézoélectrique .....	28
II.4. La Ferroélectricité.....	29
II.5. Obtention des matériaux piézoélectrique.....	30
II.5.1. Procédéélectrique.....	30

II.5.2. Procédé thermique.....	32
II.6. Les matériaux piézoélectriques.....	33
II.6.1. Les cristaux.....	33
II.6.2. Les céramiques.....	33
II.6.3. Les polymères.....	34
II.6.4. Les composites.....	34
II.7. Matériaux ferroélectriques de types pérovskite.....	35
II.7.1. Le PZT (Structure de la maille pérovskite ABO <sub>3</sub> ).....	35
II.7.2. Les paramètres de la maille pérovskite de PZT.....	37
II.7.3. Les directions et les domaines ferroélectriques dans les PZT.....	38
II.7.4. Loi de comportement d'un matériau piézoélectrique.....	39
II.8. Modes de réponse dominant.....	41
II.9. Les domaines d'application des piézomatériaux.....	42
II.10. Conclusion.....	43
<b>Chapitre III: L'accéléromètrepiézoélectrique.....</b>	<b>44</b>
III.1. Introduction.....	44
III.2. L'accéléromètrepiézoélectrique.....	44
III.2.1. Les avantage des capteurs piézoélectriques.....	45
III.2.2. Principe de fonctionnement.....	45
III.3. Modèles d'accéléromètres.....	47
III.4. Les caractéristiques métrologiques.....	50
III.5. Les grandeurs d'influence .....	56
III.6. Conclusions.....	58
<b>Chapitre IV: Optimisation des performances de l'accéléromètre piézoélectrique</b>	<b>59</b>
IV.1 Introduction.....	59
IV.2. La modélisation et son objectif .....	59
IV.2.1. Le modèle .....	59
IV.2.2. Les différents types de modèles .....	61
IV.2.3. Les deux techniques de la modélisation.....	61
IV.2.4. Les méthodes de la modélisation .....	62
IV.2.5. L'outil de simulation.....	64
IV.2.6. Le logiciel de simulation (MATLAB).....	64

IV.3. Modélisation du comportement physique de l'accéléromètre piézoélectrique.....	64
IV.4 Simulation et interprétation des résultats.....	69
IV.5. Traitement du signal (les opérations de traitement de signal).....	74
IV.5.1. Décomposition d'un signal en série de Fourier.....	74
IV.5.2. La génération des signaux.....	77
IV.5.3. L'approximation des signaux.....	82
IV.5.4.Échantillonnage des signaux.....	83
IV.5.5. Calcul du spectre de signal.....	85
IV.5.6.La pondération des signaux par différentes fenêtres de pondération .....	86
IV.6. Recommandations pour le choix du type de fenêtre.....	91
IV.7.Effet du fenêtrage dans l'analyse de Fourier.....	94
IV.8.Conclusions.....	95

## **CONCLUSIONSGENERALE**

## **REFERENCES**

## **ANNEXE**

# Liste des figures

## Chapitre I : L'analyse vibratoire

Fig.I.1. Evolution de la maintenance depuis 1940.....	2
Fig.I.2. Courbe de baignoire.....	4
Fig.I.3. Les différents types de maintenance .....	6
Fig.I.4. Structure de la machine tournante.....	7
Fig.I.5. Tolérances d'usinage sur un rotor.....	8
Fig.I.6. Points de mesure pour un défaut de balourd.....	9
Fig.I.7. Défauts d'alignement d'arbres.....	9
Fig.I.8. Image vibratoire théorique d'un défaut de transmission par courrois.....	10
Fig.I.9. Différents types d'engrenage.....	10
Fig.I.10. La constitution de la chaîne de mesure.....	12
Fig.I.11. Transformée de Fourier.....	13
Fig.I.12. Exemple de sous-échantillonnage.....	14
Fig.I.13. Le principe du fenêtrage.....	15
Fig.I.14. Conversion d'une forme d'onde en domaine fréquentiel à l'aide de la FFT.....	16
Fig.I.15. FFT data processor.....	17
Fig.I.16. Principe du capteur inductif à courants de Foucault.....	18
Fig.I.17. Schéma de principe d'un vélocimètre.....	18
Fig.I.18. Schéma électrique d'un accéléromètre capacitif.....	19
Fig.I.19. Les vibrations.....	21
Fig.I.20. Onde harmonique simple.....	22
Fig.I.21. Forme d'onde d'accélération, de vitesse et de déplacement de masse en mouvement harmonique simple.....	22

## Chapitre II: La piézoélectricité

Fig.II.1. L'effet d'un matériau piézoélectrique.....	27
Fig.II.2. Matériaux piézoélectriques.....	28
Fig.II.3. Organigramme des différentes classes cristallines.....	29
Fig.II.4. Polarisation d'un matériau ferroélectrique.....	30
Fig.II.5. Cycle d'hystérésis de la polarisation d'un matériau ferroélectrique.....	31
Fig.II.6. Diagramme des différentes phases cristallines du PZT.....	32
Fig.II.7. Les céramiques .....	33
Fig.II.8. Matériaux composites.....	34
Fig.II.9. Maille cubique de PZT.....	35

Fig.II.10. Diagramme de phase de l'oxyde ternaire $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$ .....	36
Fig.II.11. Directions de polarisation possible pour une maille quadratique ou Rhomboédrique et monoclinique.....	37
Fig.II.12. Les paramètres de la maille pérovskite de PZT.....	38
Fig.II.13. Les directions et les domaines ferroélectriques dans les PZT.....	38
Fig.II.14. Structure et direction de polarisation en fonction de la température.....	39
Fig.II.15. Différents modes de couplage d'un élément piézo-électrique.....	42

### **Chapitre III : L'accéléromètre piézoélectrique**

Fig.III.1 Effet piézoélectrique, calculs de base.....	45
Fig.III.2. Principe d'un accéléromètre piézoélectrique.....	46
Fig.III.3. Structure de l'accéléromètre piézoélectrique.....	46
Fig.III.4. Accéléromètres piézoélectriques à compression.....	47
Fig.III.5. Principe d'un accéléromètre piézoélectrique à montage en porte-à-faux.....	48
Fig.III.6. Accéléromètre à cisaillement.....	49
Figure.III.7. Réponse à une force statique.....	52
Fig.III.8. Réponse en fréquence.....	53
Fig.III.9. Pic de réponse fréquentielle à la fréquence de résonance.....	54
Fig.III.10. Exemple de courbe de température / sensibilité non linéaire.....	56

### **Chapitre IV : Optimisation des performances de l'accéléromètre piézoélectrique**

Fig.IV.1. Système masse, ressort et amortisseur.....	65
Fig.IV.2. Générateur du courant du matériau piézoélectrique.....	68
Fig.IV.3. Le schéma équivalent de Thévenin.....	68
Fig.IV.4. Le mouvement relative en fonction de fréquence relative pour diverses valeurs du taux d'amortissement.....	70
Fig.IV.5.L'erreur de mesure en fonction de fréquence relative pour diverses valeurs du taux d'amortissement.....	72
La fig.IV.6. La sensibilité relative de l'accéléromètre en fonction de fréquence relative pour diverses valeurs du taux d'amortissement.....	74
La Fig.IV.7 Signal périodique (résultat de simulation).....	76
La Fig.IV.8 Décomposition des signaux (résultat de simulation).....	76
La Fig.IV.9. Un signal d'entrée sur la forme d'harmonique pure.....	79
La Fig.IV.10. Un signal d'entrée sous la forme d'une somme d'harmoniques.....	80
La Fig.IV.11. Un signal d'entrée sous forme d'onde rectangulaire.....	80

La Fig.IV.12. Un signal d'entrée sous forme d'onde en dents de scie.....	81
La Fig.IV.13. Un signal d'entrée sur la forme d'une vibration libre sous l'effet de conditions initiales.....	81
La Fig.IV.15. Approximation en série de Fourier d'une onde triangulaire.....	83
La Fig.IV.16. Échantillonnage d'un signal (résultat de simulation).....	84
La Fig.IV.17. Spectre fréquentiel d'un signal (résultats de simulation).....	86
La Fig.IV.18. Le signal temporel d'entrée (résultat de simulation).....	88
La Fig.IV.19. Le signal pondéré par la fenêtre rectangulaire (résultat de simulation).....	89
La Fig.IV.20. Le spectre de signal pondéré par la fenêtre rectangulaire (résultat de simulation).....	89

## Liste des tableaux

### Chapitre I : L'analyse vibratoire

Tableau I.1. Les avantages et les inconvénients de la maintenance corrective.....	3
Tableau I.2. Les avantages et les inconvénients de la maintenance préventive.....	5
Tableau I.3. Unités d'amplitude.....	24
Tableau I.4. Valeurs de vibration admissibles selon ISO 10816: 1995.....	24
Tableau I.5. Classification des machines selon ISO 10816: 1995.....	25

### Chapitre II: La piézoélectricité

Tableau.II.1. les équations d'état du couplage piézoélectrique.....	40
Tableau II.2. Les constants piézoélectrique.....	40
Tableau II.3. Domaine d'application des piézomatériaux.....	43

### Chapitre III : L'accéléromètre piézoélectrique

Tableau III.1. Les avantages et les inconvénients des trois modèles d'accéléromètre piézoélectrique.....	49
--	----

### Chapitre IV : Optimisation des performances de l'accéléromètre piézoélectrique

Tableau.IV.1. Paramètres du matériau piézoélectrique PZT (PZ27).....	69
Tableau. IV.2. Paramètres de simulation.....	69
Tableau. IV.3. Résultats de simulation du mouvement relative.....	70
Tableau. IV.4. Résultats de simulation de l'erreur de mesure.....	71
Tableau. IV.5. Résultats de simulation de la sensibilité relative.....	73
Tableau.IV.6. Paramètres d'entrée d'un signal périodique et d'un signal décomposé.....	75
Tableau. IV.7. Les paramètres d'entrée de chaque forme des signaux.....	78
Tableau. IV.8. Paramètres d'entrées du programme d'approximation des signaux.....	82
Tableau.IV.9. Paramètres d'entrées du programme d'échantillonnage.....	84
Tableau. IV.9. Paramètres d'entrée du programme de calcul du spectre de signal.....	85
Tableau.IV.10. Paramètres d'entrée du programme de la pondération des signaux.....	88
Tableau. IV.11. Choix des fenêtres.....	90

# Nomenclature

<i>indice</i>	<i>Désignation</i>	<i>Unité</i>
<b>Chapitre I</b>		
$\lambda$	Taux de défaillance	s
$F_c$	La fréquence de passage des courroies	Hz
$X$	déplacement à tout instant donné t	m
$X_0$	déplacement maximum	m
$\omega$	La pulsation	Rad/s
$f$	fréquence	Hz
$t$	temps	s
$a$	l'accélération	(m/s) <sup>2</sup>
<b>RMS</b>	Root mean square (amplitude efficace)	m
<b>T</b>	La période	s
<b>Chapitre II</b>		
<b>P</b>	Polarisation	
<b>E</b>	Champ électrique	V/m
<b>E<sub>C</sub></b>	Champ coercitif	V/m
<b>P<sub>S</sub></b>	Polarisation saturée	C / m <sup>2</sup>
<b>P<sub>r</sub></b>	Polarisation rémanente	C / m <sup>2</sup>
<b>Z<sub>A</sub></b>	l'impédance acoustique	m <sup>2</sup> -kg/s
<b>K<sub>T</sub></b>	le coefficient de couplage électromécanique	
<b>FMP</b>	La frontière morphotropique de phase	
$\theta$	La température	C°
$\sum$	L'entropie	
$\sigma$	Le tenseur de contrainte	
$\epsilon$	Le tenseur de déformation	
<b>D</b>	Le vecteur déplacement électrique.	C/m <sup>2</sup>
<b>T</b>	contrainte mécanique	N/m <sup>2</sup>
<b>S</b>	La déformation	m <sup>2</sup>
$\epsilon$	Permittivité électrique	(F.m <sup>-1</sup> )
$\beta$	Imperméabilité électrique	(m.F <sup>-1</sup> )
<b>s</b>	Compliance ou souplesse	(m <sup>2</sup> .N <sup>-1</sup> )
<b>c</b>	Raideur ou rigidité élastique	(N.m <sup>-2</sup> )
<b>d</b>	Constante de charge	(C.N <sup>-1</sup> ou m.V)
<b>e</b>	Constante piézoélectrique	(C.m <sup>-2</sup> )
<b>g</b>	Constante de tension	(m <sup>2</sup> .C <sup>-1</sup> )
<b>h</b>	Constante piézoélectrique	(V.m <sup>-1</sup> ou N.C <sup>-1</sup> )
<b>Chapitre III</b>		
<b>A</b>	Zone d'électrode	
<b>d</b>	L'épaisseur	mm

<b>F</b>	La force	N
<b>q</b>	La charge	C
<b>u</b>	La tension	v
<b>d<sub>33</sub>, e<sub>33</sub></b>	Constants piézoélectrique	
<b>m</b>	La masse	g
<b>S</b>	La sensibilité	mV / g
<b>S<sub>1</sub></b>	Sensibilité mécanique du système à masse sismique	
<b>S<sub>2</sub></b>	Sensibilité électrique du capteur piézoélectrique	
<b><math>\gamma</math></b>	Accélération à laquelle est soumis le capteur	(m/s) <sup>2</sup>
<b>z</b>	Déplacement relatif de la masse sismique,	m
<b>Q</b>	Charge électrique résultante	C
<b>d</b>	Constante piézoélectrique	
<b>c</b>	Raideur de l'élément sensible	
<b><math>\omega_c</math></b>	pulsation de coupure basse de l'ensemble capteur + conditionneur	
<b>Chapitre IV</b>		
<b>m</b>	La masse	g
<b>k</b>	Le coefficient d'élasticité	
<b>c</b>	Le coefficient de frottement	
<b>z</b>	Le mouvement relatif	
<b><math>\omega_n</math></b>	La fréquence naturelle de l'accéléromètre	Hz
<b><math>\xi</math></b>	Le taux d'amortissement	
<b>Y</b>	L'amplitude de mouvement	m
<b>Z</b>	Le module de mouvement relatif	m
<b>E</b>	L'errer de mesure	

# **Introduction générale**

## **L'introduction générale**

L'indenté du système électromécanique connu par le signal vibratoire qui contient la signature cinématique du système reliée aux conditions de fonctionnement, si le signal vibratoire changé, un autre comportement de l'état de fonctionnement de ce système va apparaître.

Actuellement, la croissance des études sur la pathologie des systèmes, les conséquences des vibrations observées probablement reliés aux causes matérielles qui les engendrent. Le niveau vibratoire augmenté par la majorité des défauts enfante des pertes de fonctionnement des systèmes électromécaniques et des dégâts secondaires [1-2].

La dégradation précoce des pièces est provoquée par les vibrations générées par la fatigue qui elles sont souvent à l'origine de la rupture des éléments d'un système électromécanique. L'analyse de vibrations est la meilleure technique de maintenance préventive conditionnelle pour obtenir un diagnostic précis et précoce sur la plus part des défauts des équipements [3-4].

À partir des vibrations régulièrement recueillies sur un système électromécanique, l'analyse vibratoire consiste à détecter d'éventuels dysfonctionnements et à suivre leur évolution dans le but de planifier ou reporter une intervention mécanique.

La technique d'analyse vibratoire est composée par un accéléromètre, amplificateur et analyser FFT dont l'accéléromètre transforme le mouvement vibratoire en signal électrique temporel, l'amplificateur amplifie ce signal et analyseur FFT a pour but de convertir le signal électrique temporel en un signal électrique fréquentiel (information fréquentielle).

Dans notre travail, on va choisir l'accéléromètre piézoélectrique grâce à leurs avantages par rapport aux autres types des accéléromètres (capacitif, résistive, à effet tunnel...). L'accéléromètre piézoélectrique est basé sur l'effet piézoélectrique qui repose sur la propriété particulière de certains matériaux qui peuvent se polariser sous l'application d'une contrainte mécanique, et qui inversement se déforment lorsqu'ils sont soumis à un champ électrique. Dans certains matériaux, comme le quartz, cet effet est naturellement observable. L'application d'une force provoque l'apparition d'un champ électrique (effet piézoélectrique direct), tandis que l'application d'un champ électrique provoque la déformation du matériau (piézoélectrique inverse).

Plusieurs travaux de recherche ont été faits pour améliorer les performances de l'accéléromètre à détection piézoélectrique surtout dans la partie électrique [5-6]. Par contre, dans notre travail, on va modéliser l'accéléromètre piézoélectrique pour atteindre les objectifs suivants :

- Choisir la valeur appropriée du taux d'amortissement pour réduire l'erreur de mesure et augmenter la précision de l'accéléromètre piézoélectrique.
- Extraire une nouvelle expression de la sensibilité relative qui relie les paramètres électriques et mécaniques de l'accéléromètre piézoélectrique
- Optimisation des performances de l'accéléromètre

Pour atteindre ces objectifs, notre thèse est structurée en quatre chapitres sont donnés ci-après:

Le premier chapitre est consacré à l'analyse vibratoire des machines tournantes qui constitue un outil puissant de détection des défauts. Après une définition de la vibration, de sa nature et de ses amplitudes, on détermine le choix des grandeurs physiques à mesurer.

Le deuxième chapitre présentera un état de l'art sur la piézoélectricité et les matériaux piézoélectriques. Dans ce chapitre, on va étudier les notions de base sur la piézoélectricité et la ferroélectricité. Il comprend également une partie sur les différents types des matériaux piézoélectriques (céramiques, cristaux, polymères et composites) et une autre partie sur les matériaux ferroélectriques de types pérovskite (Les zircono-titanates de plomb (PZT)).

Le troisième chapitre illustrera le choix des accéléromètres, dans notre cas, on va choisir l'accéléromètre piézoélectrique, il est le plus utilisé dans les secteurs industriels car ces avantages par rapport les autres types des accéléromètres tels que la grande gamme fréquentielle, la bonne bande passante, la taille réduite, et la bonne robustesse. On va aussi étudier en détail les accéléromètres piézoélectriques surtout les différents types de ce capteur, ses caractéristiques et ses grandeurs d'influences.

Le quatrième chapitre est la partie spéciale de cette thèse, au cours ce chapitre, on va modéliser le comportement physique de l'accéléromètre piézoélectrique. Cette modélisation nous permettra d'exprimer une nouvelle équation de la sensibilité relative qui relie les paramètres électriques et mécaniques de l'accéléromètre. Le modèle développé sera validé par des tests de simulation puis on va choisir le taux d'amortissement approprié pour améliorer les performances de l'accéléromètre piézoélectrique.

Une conclusion générale qui résume les résultats obtenus et leur importance ainsi que des perspectives à envisager pour d'éventuelles suites de ce travail.

# Chapitre I

# **Chapitre I**

## **Etat de l'art sur l'analyse vibratoire et les capteurs de vibrations**

### **I.1. Introduction**

Les techniques de maintenance sont nées lors de la révolution industrielle, avec la mécanisation des différentes industries. Les pannes des machines ont commencé à être prises en compte, car elles provoquaient des arrêts dans le processus de production, ce qui a entraîné de grandes pertes de bénéfices.

Alors la maintenance a été toujours liée au développement technologique, ce qui signifie que les machines n'étaient réparées que lorsque la poursuite de son fonctionnement était impossible. En d'autres termes, l'entretien était considéré comme un dernier recours et pour éviter des arrêts de production, il faut surveiller en permanence ces équipements et traquer tous les signes précurseurs de défauts avant qu'il ne soit trop tard. Pour cela, il existe une grande variété de techniques d'analyse [7].

L'analyse vibratoire est la plus connue et la plus largement employée. Il faut dire qu'elle permet de détecter pratiquement tous les défauts susceptibles d'apparaître dans les machines tournantes.

Ce chapitre a pour but de présenter une explication générale sur la maintenance et ces types, une étude sur l'analyse vibratoire et les principaux défauts des machines tournante.

### **I.2. La maintenance et ses types**

#### **I.2.1 Définition**

La norme FD X 60-000 (AFNOR, 2002) définit « la maintenance l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise ». [8]

La mission principale de la fonction maintenance est le maintien par des actions préventives et correctives de la disponibilité de l'outil de production; c'est-à-dire de son aptitude à accomplir une fonction requise, dans des conditions d'utilisation données, pendant une période donnée. Autrement dit, la

mission principale de la maintenance est la gestion optimisée des équipements de production en fonction des objectifs propres à l'entreprise.

## I.2.2 Evolution de la maintenance

L'évolution de la maintenance depuis les années 1940 peut être tracée à travers trois générations [9], [10] comme il est montré sur la (figure I.1).

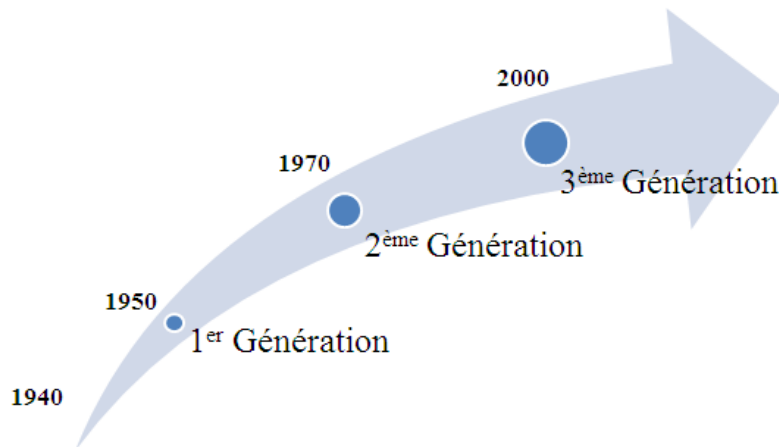


Fig.I.1. Evolution de la maintenance depuis 1940

### a. 1<sup>er</sup> génération

- Remplacement du composant lorsqu'il est détruit

### b. 2<sup>ème</sup> génération

- Le processus a une disponibilité supérieure.
- La durée de vie des composants est supérieure.
- Réflexion sur l'optimisation des coûts.

### c. 3<sup>ème</sup> génération

- Augmentation de la disponibilité et de la fiabilité dans une plus grande sécurité.
- Meilleure qualité des produits.
- Réflexion sur les dommages causés à l'environnement.
- Meilleur rapport cout efficacité.

## I.2.3 Les méthodes de maintenance

Les méthodes de maintenance peuvent être classées en deux grandes catégories: La maintenance corrective et la maintenance préventive. [11]

## 1. La maintenance corrective

Cette méthode est également appelée «maintenance de crise». La maintenance corrective est le type de maintenance le plus traditionnel et le premier appliqué dans les industries. Il consiste à réparer ou à remplacer un élément ou un équipement cassé lorsqu'il tombe en panne, afin qu'il puisse revenir en parfait état de fonctionnement dans les plus brefs délais.[7]

Le tableau I.1 montre les avantages et les inconvénients les plus remarquables de la maintenance corrective.

*Tableau I.1. Les avantages et les inconvénients de la maintenance corrective*

<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
Coûts à court terme réduits	Coûts élevés à long terme
Planification minimale	Imprévisibilité
Simplicité	Arrêts inattendus
Solution la plus appropriée (dans certains cas)	Préservation non efficace de la machine

### ✓ **Avantages**

Tout d'abord, il y a peu de planification impliquée, ce qui n'entraîne aucune perte de temps. En raison de la planification minimale, les coûts liés aux problèmes administratifs ou financiers sont faibles ou inexistantes. De plus, seules quelques techniques sont nécessaires.

En dehors de cela, le processus est assez simple car les réparations ne sont effectuées qu'en cas de défaillance.

En raison des avantages mentionnés, la maintenance corrective peut être parfois une meilleure alternative que la maintenance préventive, ce qui pourrait impliquer un investissement plus élevé d'actifs.

### ✓ **Inconvénients**

Comme l'état des machines n'est pas vérifié, les pannes sont imprévisibles. Cette situation peut conduire à des périodes d'inactivité indésirables dans le processus de fabrication, dont la durée peut augmenter en fonction de la disponibilité des matériaux. De plus, comme la machine n'est pas soignée, sa

durée de vie peut être remarquablement réduite. Ces faits entraînent des coûts à long terme plus élevés.[11]

La maintenance corrective est une option plus appropriée que la maintenance préventive, car les coûts qu'elle implique sont moindres. Cependant, de graves défaillances imprévisibles peuvent apparaître, auquel cas les mesures nécessaires à prendre pour y remédier peuvent être un processus très fastidieux. En conséquence, les périodes d'inactivité peuvent augmenter considérablement, entraînant une diminution des avantages et de la réputation. [14]

## 2. Maintenance préventive

La maintenance préventive est une méthode plus avancée que la maintenance corrective, et elle est également appelée «maintenance périodique» ou «maintenance historique». Cette activité technique consiste à favoriser un contrôle régulier et un réglage fin des équipements, afin d'augmenter la durée de vie utile des équipements. Ces réparations régulières sont programmées en tenant compte du dossier de panne des machines. [9]

De plus, il est pris en compte que la durée de vie de nombreux éléments évolue en fonction de «la courbe de la baignoire», ce qui montre une relation entre le nombre de défaillances et le temps de fonctionnement.[15]

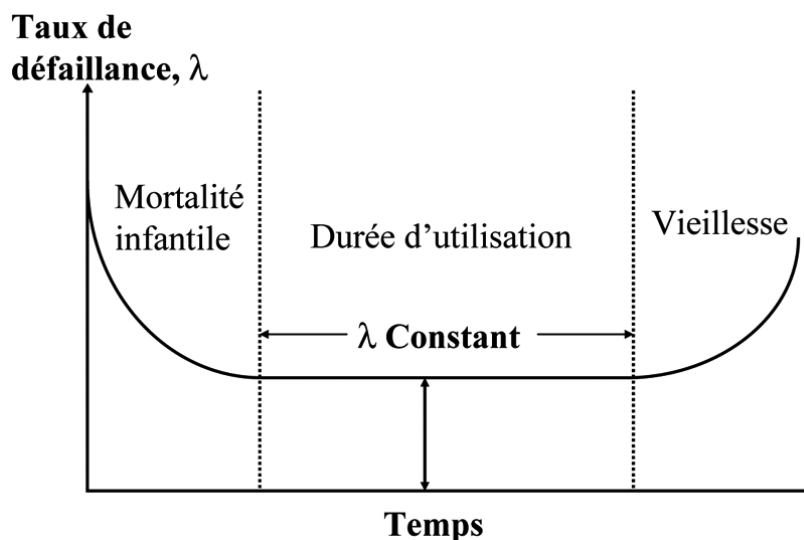


Fig.I.2. Courbe de baignoire

Les avantages et les inconvénients les plus importants sont répertoriés dans le tableau I.2.

**Tableau I.2. Les avantages et les inconvénients de la maintenance préventive**

<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
Coûts à long terme faibles	Coûts élevés à court terme
Augmentation de la durée de vie de l'équipement	Plus d'entretien
Moins de consommation d'énergie	Planification plus complexe
Moins de périodes d'inactivité	L'échec catastrophique reste un risque

### ✓ **Avantages**

Contrairement à la maintenance corrective, une inspection régulière de la machine est effectuée, ce qui entraîne une baisse des coûts à long terme car les pannes liées à des facteurs tels que la corrosion et l'usure, entre autres, sont dans la plupart des cas évitées. Grâce à cette maintenance programmée, la durée de vie de l'équipement est également augmentée, diminuant ainsi les pannes de dernière minute.

### ✓ **Inconvénients**

L'augmentation nécessaire des personnes chargées de la planification et des réparations régulières, les coûts à court terme sont plus élevés. De plus, l'utilisation de cette méthode peut conduire à une utilisation non efficace des actifs, car parfois une révision de l'équipement peut ne pas être nécessaire.

En dehors de cela et selon la courbe de la baignoire, la réparation régulière peut provoquer une réduction de la fiabilité des machines, car la probabilité de défaillance est plus élevée au début du temps de fonctionnement. De plus, une maintenance programmée n'élimine pas le risque de panne catastrophique. En dehors de cela, les actifs étant maintenus dans les meilleures conditions possibles, ceux-ci draineront moins d'énergie, un facteur très important à prendre en compte.[12]

La figure I.3 illustre les différentes méthodes de la maintenance industrielle.

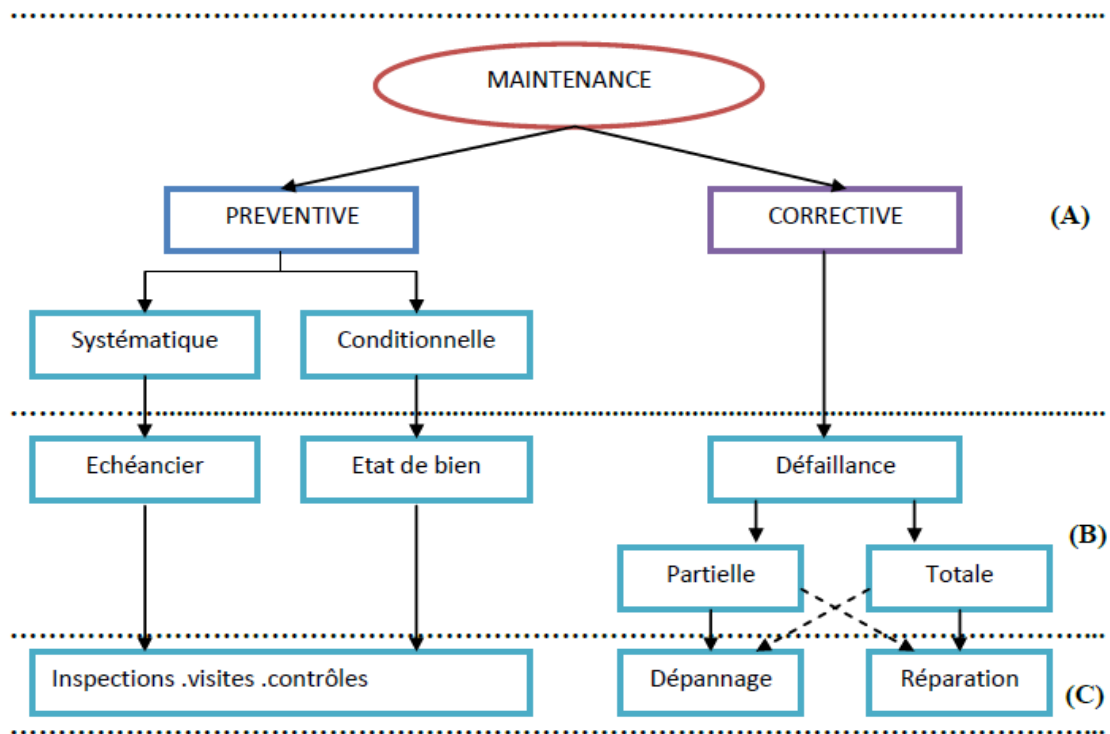


Fig.I.3. Les différents types de maintenance.[13]

(A) : Méthodes de maintenance

(B) : Evènements

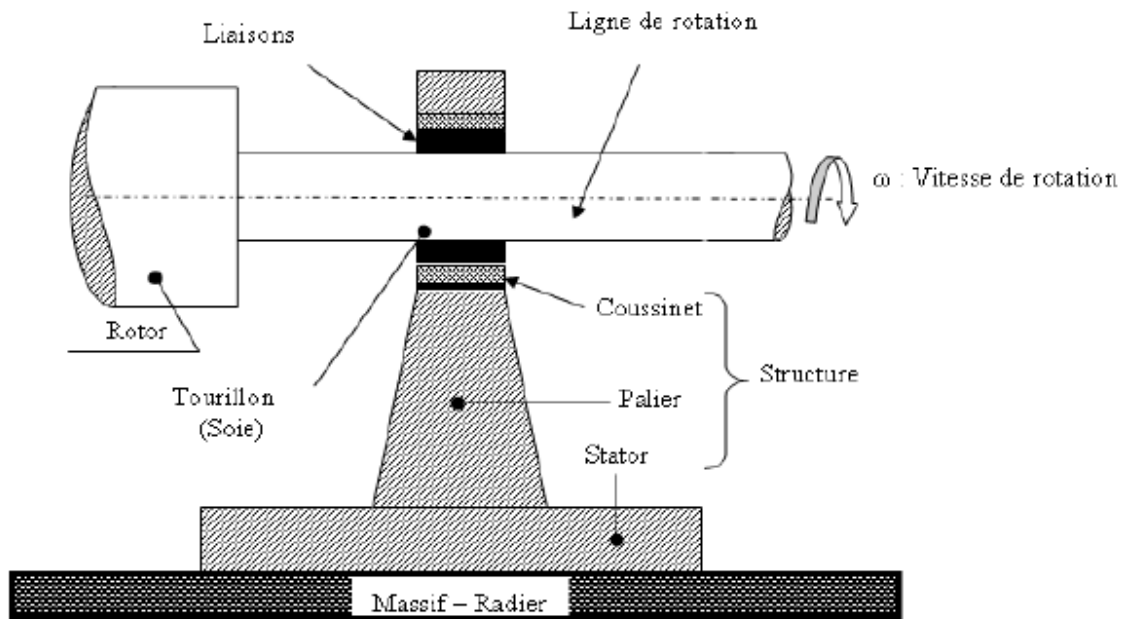
(C) : Opération de maintenance

D'après cette figure, on voit que la mise en place d'une opération corrective ne dépend que de l'occurrence d'une panne et la maintenance préventive peut être programmée en fonction de différents paramètres.

### I.3. Machines tournantes

Les machines tournantes sont des systèmes dans lesquels peut se distinguer[15][16](figure I.4):

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



*Fig.I.4. Structure de la machine tournante*

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

**c) Les liaisons :**

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

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

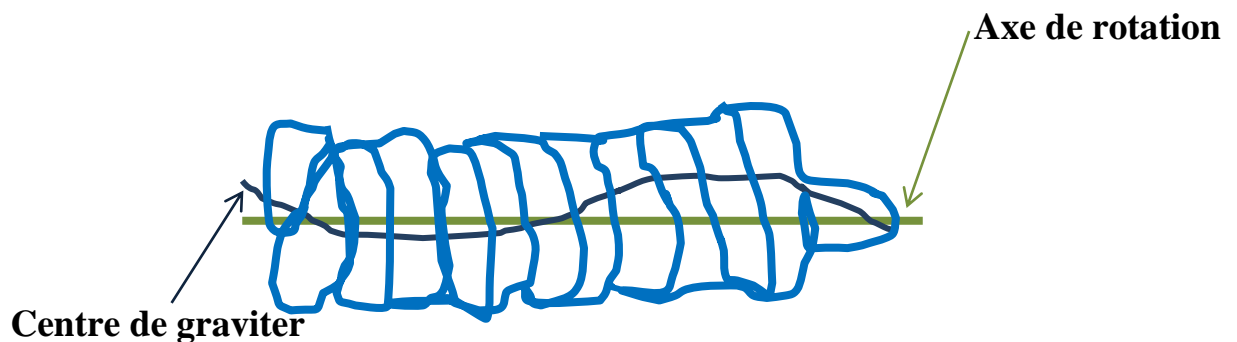
**I.4. Les principaux défauts des machines tournantes**

Il existe plusieurs types de défauts des machines tournantes tels que les défauts électriques, les défauts mécaniques et les défauts hydrauliques, dans la suite, on va citer les principaux défauts [17]:

**1) Défaut de balourd (déséquilibre)**

Les causes principales de déséquilibre du rotor (balourd) sont généralement les défauts d'usinage, d'assemblage et de montage, ou à cause des conséquences suivantes(figure I.5):

- d'une altération mécanique : perte d'ailette, érosion ou encrassement.
- d'une altération thermique : déformation suite à des dilatations différentes des matériaux constituant le rotor ou à des différences de température localisées ...



*Fig.I.5. Tolérances d'usinage sur un rotor.*

Généralement, le spectre est issu d'une mesure prise radialement (souvent dans la direction radiale horizontale) (figure I.6).[18,19]

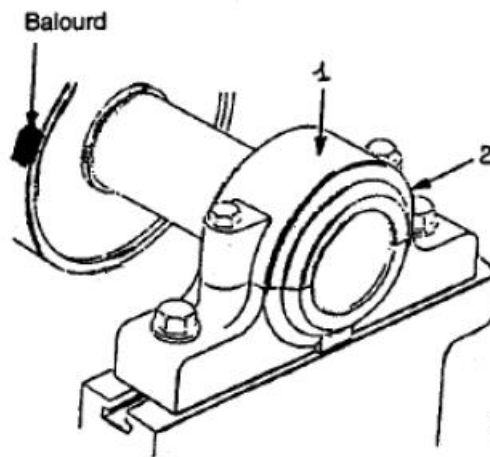


Fig.I.6. Points de mesure pour un défaut de balourd

## 2) Défaut d'alignement

Le défaut d'alignement est l'une des principales causes de réduction de la durée de vie des équipements. Il concerne soit deux arbres liés par un accouplement, soit deux paliers soutenant le même axe.[18,19]

### ❖ Désalignement d'arbres accouplés

Les axes des deux rotors peuvent présenter un *désalignement angulaire* au niveau de l'accouplement ou un *désalignement radial* (défaut de concentricité) ou la combinaison des deux (figure I.7).

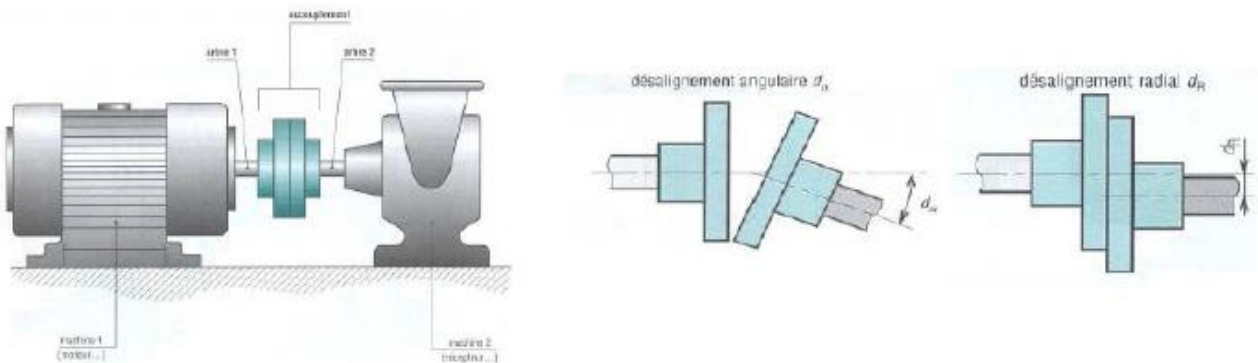


Fig.I.7. Défauts d'alignement d'arbres

## 3) Défauts de serrage

Le mauvais serrage de la structure de la machine génère des vibrations et un certain bruit. Le spectre typique mesuré sur une machine dans laquelle il existe un jeu contient un grand nombre de pics à des fréquences multiples de la fréquence de rotation.

Il est également parfois possible de retrouver des pics à l'harmonique. ( $1/2 \times$  la fréquence de rotation de l'arbre) et ses multiples.

#### 4) Défauts de transmission par courroies

Le principal défaut rencontré sur ce type de transmission est lié à une détérioration localisée d'une courroie : partie arrachée, défaut de jointure.

Généralement, le spectre est issu d'une mesure prise radialement dans la direction de l'effort de tension de la courroie. L'image vibratoire donne un pic d'amplitude importante à la fréquence de passage des courroies, et ses harmoniques (la figure I.8).[18,19]

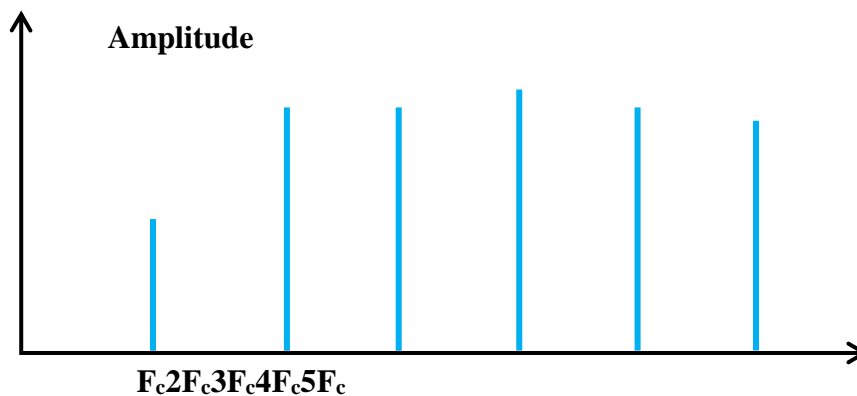


Fig.I.8. Image vibratoire théorique d'un défaut de transmission par courroies.

#### 5) Les défauts des engrenages

Un engrenage est composé de l'ensemble de deux roues dentées engrenant l'une avec l'autre, permettant de transmettre de la puissance entre deux arbres rapprochés avec un rapport de vitesse constant. Selon la position relative des deux arbres, on distingue trois classes d'engrenages (la figure I.9) :

- ✓ Les engrenages parallèles (les 2 arbres sont parallèles).
- ✓ Les engrenages concourants (les 2 arbres sont tels que leurs prolongements se coupent).
- ✓ Les engrenages gauches (les 2 arbres occupent une position relative quelconque).[18,19]

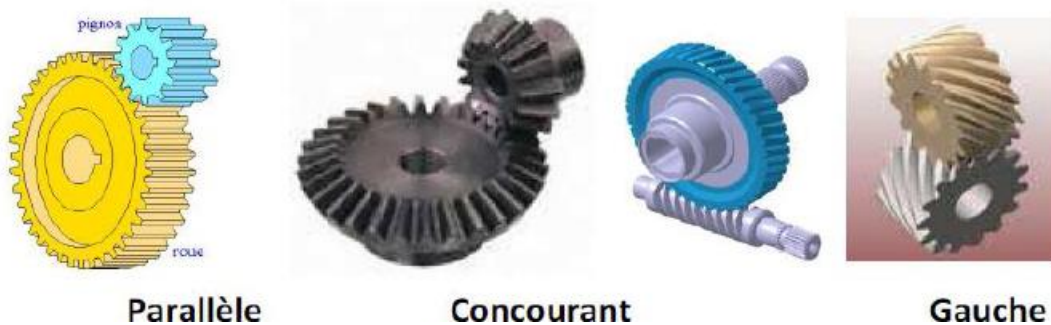


Fig.I.9. Différents types d'engrenage.

Les différentes causes de défaut d'engrenage sont les suivantes :

- Détérioration d'une dent
- Détérioration de deux dents sur les deux roues
- Détérioration de l'ensemble de dentures
- Entraxe insuffisant (jeu insuffisant au fond de denture)
- Jeu de fond de denture trop grand

## **6) Les défauts de roulements**

Les roulements sont parmi les composantes les plus sollicitées dans les machines et elles représentent une source de panne fréquente. Les défauts que l'on peut y rencontrer sont les suivants : écaillage, grippage, corrosion (qui entraîne l'écaillage), ...etc.[18,19]

Les différents types de défauts des roulements sont:

- ✓ Défaut de type écaillage affectant la bague externe
- ✓ Défaut de type écaillage affectant la bague interne
- ✓ Défaut de type écaillage sur un élément roulant
- ✓ Défauts de type déversement de bague

## **I.5 La surveillance vibratoire de machines tournantes**

La surveillance vibratoire des machines tournantes est une technique de la maintenance préventive. Cette technique considérée comme le moyen le plus efficace pour détecter la défaillance des éléments rotatifs.

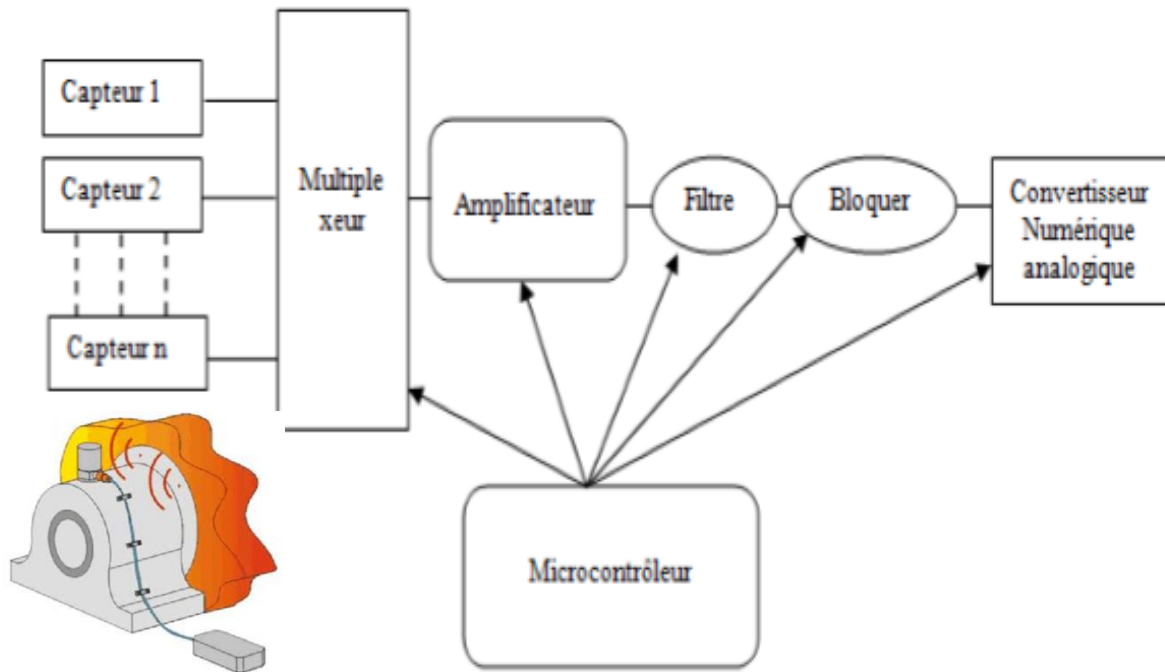
L'un des avantages les plus remarquables de cette technique est la capacité d'identifier les symptômes d'échec avant son apparition. Elle peut être utilisée pour détecter la détérioration des roulements et des engrenages, ainsi que les symptômes de désalignement et de déséquilibre, avant que ceux-ci ne provoquent une panne.[7]

Un système d'analyse de vibration se compose de quatre parties différenciées classifiées comme suit.

- a. Récepteurs de signaux
- b. Analyseur de signaux
- c. Logiciel d'analyse
- d. Un ordinateur pour analyser et enregistrer les mesures.

### **I.5.1 La chaîne de mesure de vibration**

La vibration d'une machine est un mouvement physique. Les capteurs de vibration convertissent ce mouvement en un signal électrique temporel. Ce signal est transformé en signal électrique fréquentiel par la suite de la chaîne de mesure (amplificateur et analyseur FFT). La figure I.10 illustre les composants de la chaîne de mesure. [13]



**Fig.I.10. La constitution de la chaîne de mesure**

Nous examinerons brièvement le traitement des signaux, qui nous fourniront enfin les informations nécessaires à la surveillance de l'état. Entrée de signal analogique

- ✓ L'échantillonnage
- ✓ Convertisseur A / N
- ✓ Overlap
- ✓ le fenêtrage
- ✓ FFT
- ✓ Moyennage
- ✓ Affichage / stockage.

Avant de pouvoir discuter des étapes de traitement du signal numérique susmentionnées, nous devons prendre note de quelques termes et concepts supplémentaires.[11]

## – Transformée de Fourier

Une vibration ou une réponse du système peut être représentée par des amplitudes de déplacement, de vitesse et d'accélération dans les domaines temporel et fréquentiel (figure suivante). Le domaine temporel consiste en une amplitude qui varie avec le temps. Ceci est communément appelé filtrage ou lecture globale.

Le domaine fréquentiel est le domaine où les amplitudes sont représentées par des séries d'ondes sinusoïdales et cosinusoïdales. Ces ondes ont une amplitude et une phase qui varient avec la fréquence. Les vibrations mesurées sont toujours sous forme analogique (domaine temporel) et doivent être transformées en domaine fréquentiel. C'est le but de la transformée de Fourier rapide (FFT). La FFT est donc un calcul sur un signal échantillonné. Si la FFT est un calcul sur un signal échantillonné, la première question qui se pose est: comment déterminer la fréquence d'échantillonnage ?

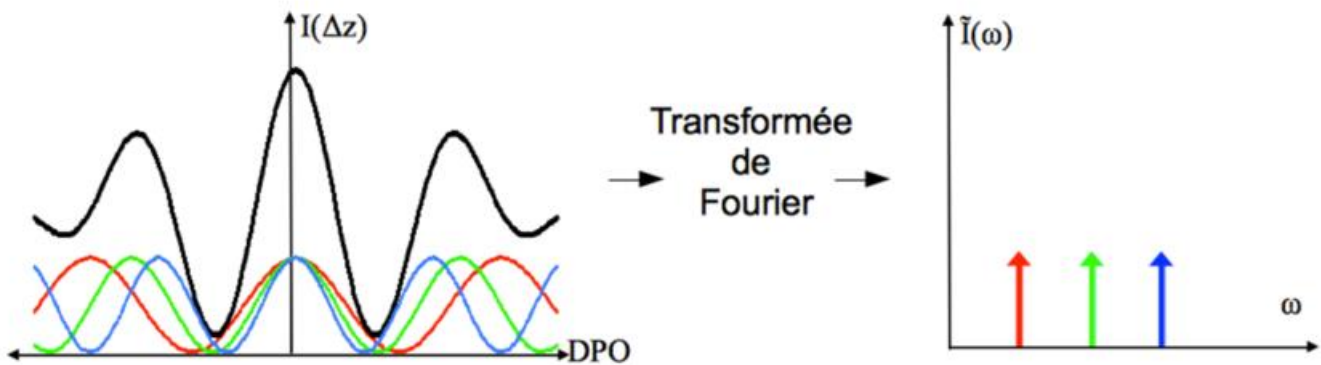


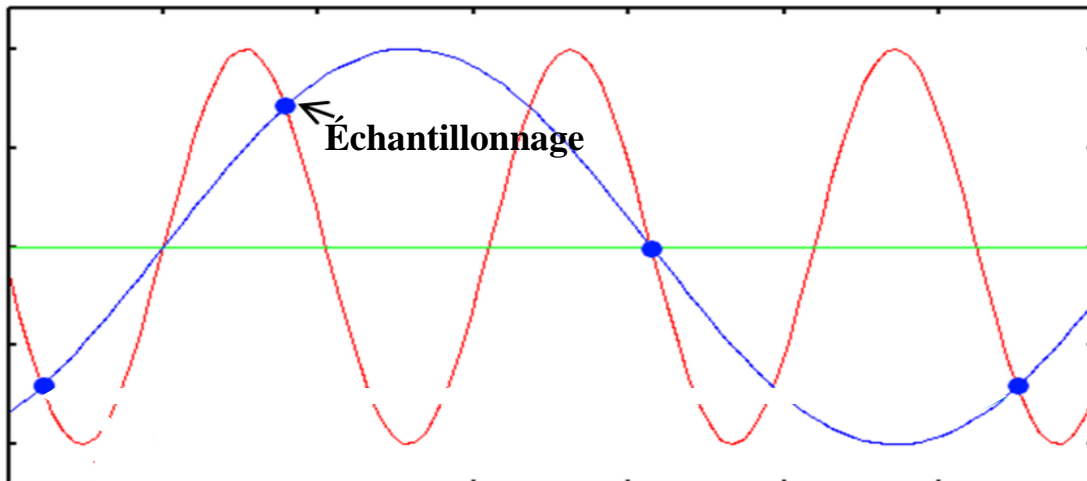
Fig.I.11. Transformée de Fourier

### – Taux d'échantillonnage

L'échantillonnage est le processus d'enregistrement de l'amplitude d'une onde à des instants donnés, puis de génération d'une courbe à partir des points enregistrés. Ainsi, les points de données échantillonnés discrets collectés (numériques) sont utilisés pour reconstruire l'onde, qui était à l'origine sous une forme analogique. Si l'onde numérique reconstruite doit ressembler à l'onde originale, à quelle vitesse devrions-nous enregistrer l'amplitude, ou en d'autres termes, prendre des échantillons pour que l'onde numérisée soit une réplique exacte de l'onde analogique d'origine?

La réponse réside dans le théorème d'échantillonnage de Nyquist, qui déclare: «Si nous ne perdons aucune information contenue dans un signal échantillonné, nous devons échantillonner à un taux de fréquence d'au moins deux fois la fréquence la plus élevée qui nous intéresse».

La figure suivante montre un cas où la fréquence d'échantillonnage est inférieure au double de la fréquence des ondes. Nous pouvons voir que quatre intervalles d'échantillonnage collectés en 3 ms se traduiront par une onde reconstruite (en pointillés) comme le montre la figure. Cette onde est d'une fréquence inférieure et pas du tout une vraie représentation de l'onde réelle.[11]



*Fig.I.12. Exemple de sous-échantillonnage*

Ce phénomène de formation d'une onde de fréquence inférieure due au sous-échantillonnage est appelé aliasing. Tous les collecteurs / analyseurs de données ont automatiquement sélectionné des taux d'échantillonnage intégrés pour garantir qu'aucun aliasage ne se produit. En théorie, il ne devrait pas y avoir de vibrations avec des fréquences supérieures à la moitié de ce taux d'échantillonnage. Cependant, cela ne peut jamais être assuré dans la pratique.

Par conséquent, tous les analyseurs sont équipés de filtres anti-aliasage. Ce sont des filtres électroniques passe-bas, qui permettent aux basses fréquences de passer mais bloquent les plus hautes. Les filtres éliminent toutes les vibrations du signal analogique qui ont des fréquences supérieures à la moitié du taux d'échantillonnage. Celles-ci les filtres sont automatiquement réglés sur les valeurs appropriées lorsque la fréquence d'échantillonnage est modifiée (cela se produit lorsque la plage de fréquences de l'analyseur est modifiée par l'utilisateur). Il est très important de noter que le filtrage doit avoir lieu avant le début de la numérisation de l'analogique.[11]

### – **Convertisseurs analogiques-numériques**

Les ondes de vibration collectées par les transducteurs sont des signaux analogiques. Les signaux analogiques doivent être convertis en valeurs numériques pour un traitement ultérieur. Cette conversion d'un signal analogique en un signal numérique est effectuée par un convertisseur analogique-numérique (A / D). La conversion A / N est essentiellement effectuée par des microprocesseurs. Comme tout processeur numérique, la conversion A / D fonctionne avec deux puissances (appelées nombres binaires). Un convertisseur A / N 12 bits fournit 4096 intervalles tandis qu'un convertisseur A / D 16 bits fournirait 65 536 intervalles discrets.

Plus le nombre d'intervalles est grand, meilleure est la résolution d'amplitude du signal. Un convertisseur A / N 12 bits entraînerait une résolution de 0,025% de la pleine échelle, tandis qu'un

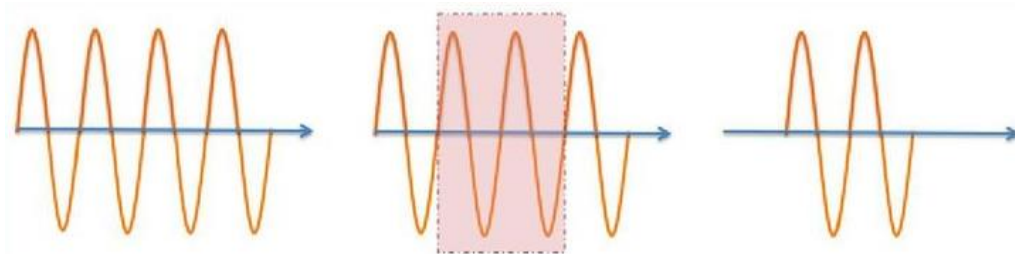
convertisseur A / N 16 bits donnerait une résolution de 0,0015%. Il est ainsi possible de collecter avec précision un signal de grandes et petites amplitudes.[11]

### – Fenêtrage

Après la numérisation du signal à l'aide d'un convertisseur A / N, l'étape suivante du processus (avant de pouvoir le soumettre à l'algorithme FFT) est appelée fenêtrage. Une «fenêtre» doit être appliquée aux données pour minimiser les effets de «fuite» du signal. Le fenêtrage équivaut à multiplier l'échantillon de signal par une fonction de fenêtre de même longueur.

Lorsqu'un signal analogique est capturé, il est échantillonné avec des intervalles de temps fixes. L'échantillonnage d'intervalles de temps fixes peut entraîner la troncature de la forme d'onde réelle à son début et à sa fin. Les résultats obtenus peuvent varier selon l'emplacement de l'échantillon par rapport à la période de la forme d'onde. Il en résulte des discontinuités dans la forme d'onde continue. Le fenêtrage comble les discontinuités dans les données en forçant les données échantillonnées à zéro au début et à la fin de la période d'échantillonnage.[11]

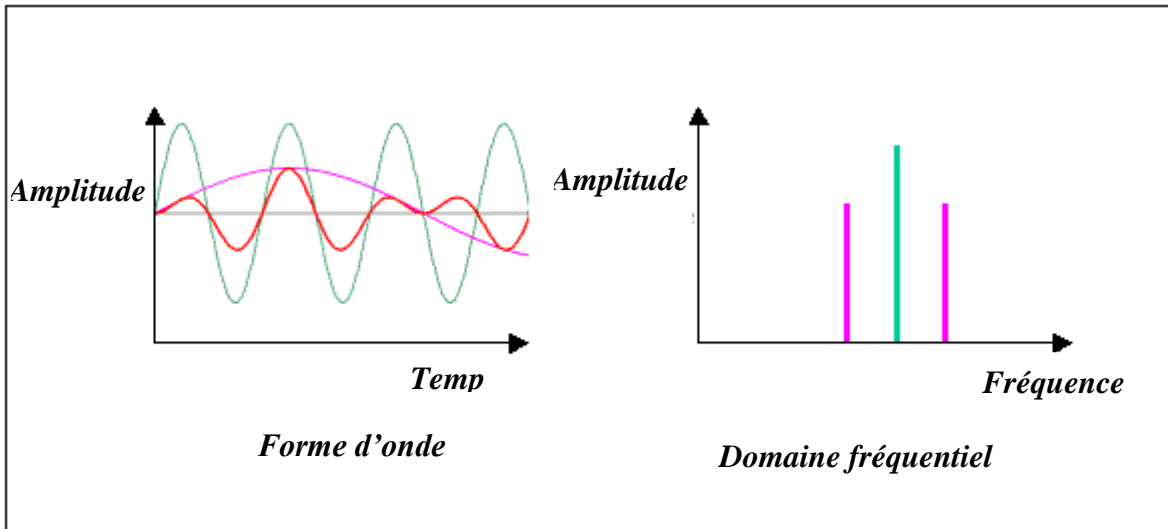
La figure suivante montre les effets du fenêtrage. Les fenêtres peuvent être considérées comme un moyen de remplir les discontinuités dans les données en forçant les données échantillonnées à zéro au début et à la fin de la période d'échantillonnage (ou fenêtre temporelle), faisant ainsi apparaître la période échantillonnée comme continue. Lorsque le signal n'est pas fenêtré et est discontinu, une «**perturbation**» se produit lorsque l'algorithme FFT est appliqué.



*Fig.I.13. Le principe du fenêtrage*

### – La transformée de Fourier rapide (FFT)

La transformée de Fourier rapide (FFT) est un algorithme dont la fonction est de calculer la transformée de Fourier discrète (DFT). L'analyse de Fourier est utilisée pour déconstruire les formes d'onde de vibration (difficiles à analyser) et les convertir en ondes sinusoïdales individuelles. En conséquence, l'amplitude est représentée en fonction de la fréquence. La figure suivante montre la conversion de la forme d'onde de vibration en spectre de fréquence.[11]



*Fig.I.14. Conversion d'une forme d'onde en domaine fréquentiel à l'aide de la FFT*

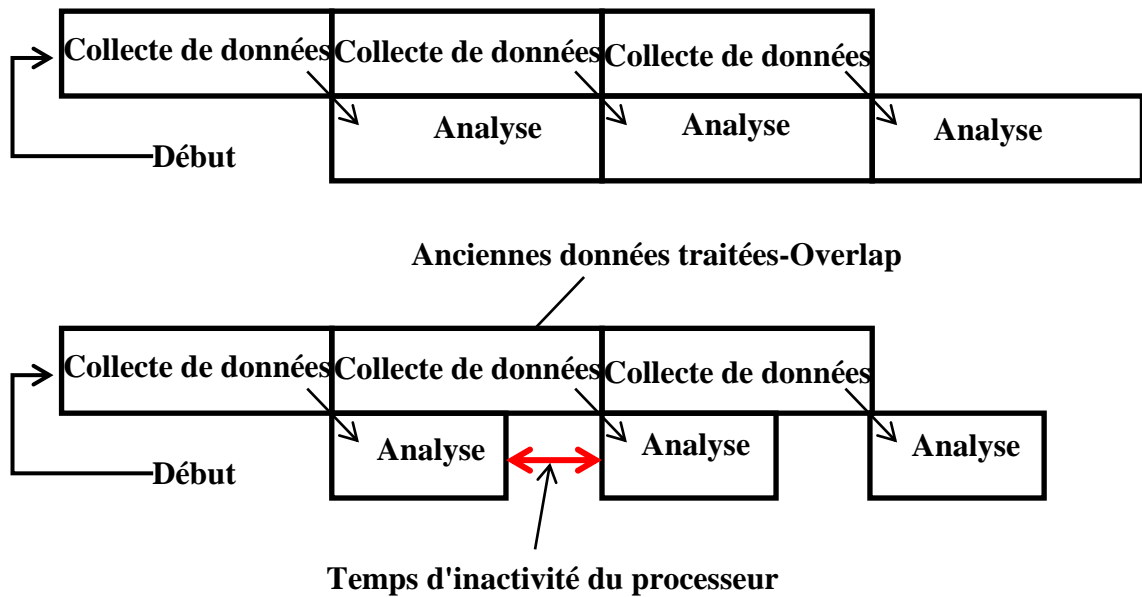
– **Moyennage**

La moyenne est une autre caractéristique des analyseurs / collecteurs de données. Le but est d'obtenir des résultats plus reproductibles et facilite également l'interprétation de signaux complexes et bruyants. Il existe différents types de moyennage:[11]

- ✓ Moyenne linéaire
- ✓ Maintien de crête
- ✓ Exponentielle
- ✓ Moyennage synchrone.

– **Overlap**

Prenons l'exemple suivant: s'il est nécessaire de collecter et d'analyser une plage de fréquences de 1 kHz, le temps de collecte des données (également connu sous le nom de fenêtre temporelle) pour collecter 1024 échantillons peut être exactement de 40 ms. Le processeur FFT (figure suivante) peut calculer et afficher un spectre en 10 ms, après quoi il rencontre une durée d'inactivité de 30 ms jusqu'à ce que l'acquisition du bloc suivant soit terminée.[11]



*Fig.I.15. FFT data processor*

Une fois le premier bloc collecté, plutôt que d'attendre que le bloc suivant soit entièrement collecté, il est possible de procéder et de calculer un nouveau spectre en utilisant une partie des données du nouveau bloc et une partie des données de l'ancien bloc. Si le processus considéré est stationnaire (ne variant pas avec le temps), les données des deux blocs peuvent être moyennées.[11]

– **Affichage / stockage**

Les analyseurs FFT ont des écrans LCD et une mémoire intégrée. Cela lui permet d'afficher les signaux traités presque immédiatement après la numérisation. L'utilisateur peut ensuite télécharger ces données sur l'ordinateur hôte.[11]

**I.5.2 Les caractéristiques et types de capteurs**

Quelle que soit la nature du signal du mouvement vibratoire (accélération, vitesse, déplacement...), il est mesuré par le premier élément de la chaîne de mesure. La fonction de cet élément est de transformer le mouvement vibratoire en un signal électrique temporel. Un capteur de vibration se caractérise principalement par [20]:

- ✓ Sa pleine échelle : niveau mini et maxi d'accélération que le capteur est capable de mesurer
- ✓ Sa bande passante : plage de fréquence pour laquelle le capteur est utilisable (environ 1/3 de la fréquence de résonnance)
- ✓ Sa sensibilité : le capteur « amplifie » t'il beaucoup l'accélération
- ✓ Sa masse : doit être faible par rapport à la pièce sur laquelle se fait la mesure
- ✓ Son nombre d'axes de mesure : généralement 1 ou 3 axes (plus rarement 2 axes)

- ✓ Sa résistance à l'environnement : température, humidité, pollution, radiations, etc...

### Capteur de déplacement

Aujourd'hui, le proximètre le plus utilisé pour la surveillance de machines est le capteur inductif à courants de Foucault. Ce capteur est relié à un émetteur-démodulateur-conditionneur (figure I.16).[21]

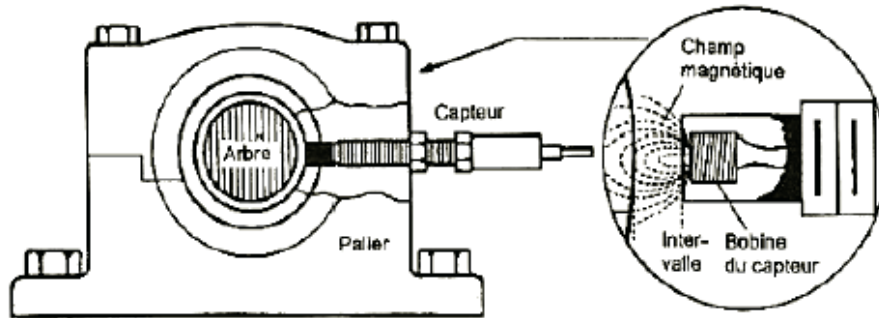


Fig.I.16. Principe du capteur inductif à courants de Foucault

### a) Capteur de vitesse

Les capteurs de vitesse ou vélocimètres sont constitués d'une sonde à contact dite sonde sismique qui mesure le mouvement absolu de l'organe sur lequel elle est fixée. Ce type de capteur ne nécessite ni source d'alimentation ni préamplificateur (figure I. 17).[21]

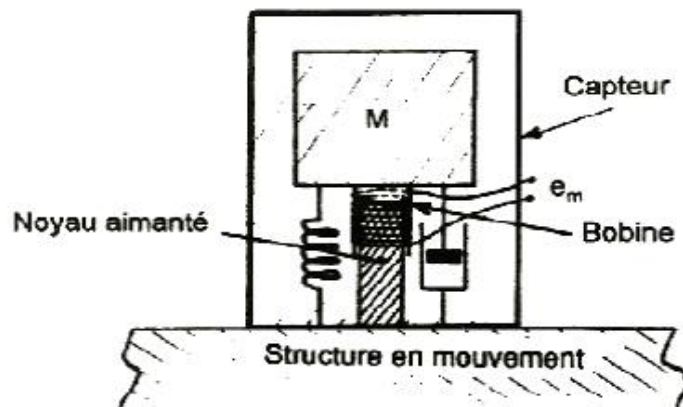


Fig.I.17. Schéma de principe d'un vélocimètre

### b) Capteur d'accélération (accéléromètre)

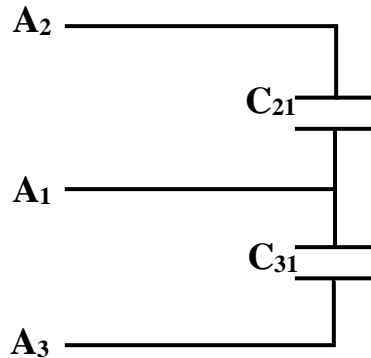
Un accéléromètre mesure une accélération selon une ou plusieurs directions, Cette accélération est mesurée de manière indirecte en mesurant[20] :

- Soit le déplacement de la masse sismique du capteur (quelques  $\mu\text{m}$ )
- soit la force inertielle induite par l'accélération de la masse sismique du capteur

Les principaux types d'accéléromètres existants sont décrits ci-dessous.

**A. L'accéléromètre à détection capacitive :**

Il est composé d'une armature mobile (A1), placée entre deux armatures immobiles (A2 et A3). Il y a aussi deux capacités :  $C_{21}$ , capacité entre A2 et A1 ; et  $C_{31}$ , capacité entre A3 et A1. À l'état initial, A1 est située à la même distance D de A2 et de A3 (figure I.18).



*Fig.I.18. Schéma électrique d'un accéléromètre capacitif*

Le déplacement de la masse sismique (A1) entre les armatures (A2 et A3) entraîne la variation de capacité qui est en fonction de l'accélération.

**B. L'accéléromètre à détection piézorésistive :**

La masse sismique est solidaire d'une lame de rappel élastique équipée de 2 ou 4 jauges piézorésistives montées dans un pont de Wheatstone. La flexion de la lame (sous l'effet de l'accélération) est traduite en déformation des jauges.[13]

On le constate facilement que la résistance de la matière utilisée pour ce type de est proportionnelle à la pression externe quand la variation de la résistivité est ignorée puisque le changement de dimension est proportionnel à la pression appliquée.

**C. L'accéléromètre à détection à base de piezjonction de transistor :**

La piézosensibilité des transistors bipolaires peut être utilisée à la place des jauges piézorésistives pour la mesure du signal. La contrainte imposée entraîne une repopulation des électrons dans le canal du transistor et modifie ainsi la mobilité des électrons. [13]

**D. L'accéléromètre à détection piézoélectrique :**

La masse sismique exerce, sous l'effet de l'accélération, des efforts de compression ou de cisaillement sur un matériau piézoélectrique. Ce matériau génère alors une charge électrique proportionnelle à la force qui lui est appliquée. [13]

**E. L'accéléromètre à détection à effet tunnel :**

Les accéléromètres à effet tunnel exploitent l'effet utilisé dans les microscopes à effet tunnel. Cet effet se produit entre deux électrodes métalliques si la barrière isolante entre elles est suffisamment faible pour permettre une pénétration d'électrons. [13]

#### **F. L'accéléromètre à détection optique :**

Deux types de détections existent. La première consiste à mesurer l'intensité de la lumière modulée par l'accélération. La seconde consiste à mesurer la longueur d'onde du signal réfléchi sur une masse sismique, une face de la masse sismique joue le rôle de miroir, la lumière réfléchie a une longueur d'onde qui dépendra de la distance miroir - fibre optique (interféromètre de Fabry-Perrot).[13]

#### **G. L'accéléromètre à détection thermique :**

Il existe deux types d'accéléromètres à détection thermique. Dans le premier cas, une masse sismique est suspendue au-dessus d'une source de chaleur (une simple résistance chauffante). L'accélération change la distance qui sépare la source de chaleur et le corps d'épreuve qui joue ici le rôle de puits de chaleur. La différence de température entraîne un flux de température de l'élément chauffant vers la masse sismique. Ce flux est faible d'autant qu'il dépend de l'accélération, il est plus important que la distance à la masse. La température proche de la résistance chauffante peut être mesurée à l'aide de thermocouples (polysilicium-aluminium) ou de thermistance.

L'autre type d'accéléromètre à détection thermique est un capteur sans masse d'épreuve dont le principe est basé sur le transfert de chaleur par convection [13].

Une résistance chauffante intégrée dans un pont est suspendue au dessus d'une cavité. Deux détecteurs de température (thermistances ou thermocouples) sont également suspendus au dessus de la cavité à égale distance de l'élément chauffant, les trois structures sont suspendues sur des ponts (ici pas de masse mobile contrairement au premier type de détection, donc plus de robustesse et de fiabilité). La résistance chauffante crée un gradient de température qui est symétrique lorsqu'aucune accélération n'est appliquée. L'air chaud autour de la résistance chauffante est moins dense que l'air froid dans la cavité. Lors d'une accélération, l'air froid plus dense va dans le sens opposé de l'accélération, chassant ainsi l'air chaud dans la direction de l'accélération. Il apparaît ainsi une variation de température sur les détecteurs, cette variation étant symétrique.

En supposant que les thermistances ont une résistance avec un coefficient de température identique, ces différences de température se traduisent par des variations de résistances strictement opposées. Intégré à un pont de Wheatstone, les détecteurs transforment l'accélération en variation de tension

#### **H. L'accéléromètre à détection à structures résonantes :**

Le principe de cet accéléromètre consiste à évaluer le changement de la fréquence de résonance d'une structure en oscillation.

Ce type de détection a été utilisé dans les premiers accéléromètres en 1990, ces derniers sont micro-usinés dans du quartz. Couramment ces capteurs micro-usinés dans le silicium transfèrent la force inertielle de la masse d'épreuve à une force axiale sur la structure résonante, changeant ainsi sa fréquence de résonance [13].

L'avantage de la détection à structure résonante est présenté directement dans la mesure digitale. Un signal digital est mesuré par un compteur qui montre la fréquence de sortie et qui peut atteindre de très grandes sensibilités 700Hz/g. Ce type de capteur est composé d'un résonateur et d'une masse sismique mobile latéralement. La masse sismique contraint ou allonge la structure oscillante, variant ainsi sa fréquence de résonance lors de l'accélération.

### **I. L'accéléromètre à détections originales**

Une fluide magnéto-rhéologique utilisé pour un accéléromètre à détection capacitive comme diélectrique a été étudié. La propriété de solidifier de fluide magnéto-rhéologique, si on applique un champ magnétique et de redevenir liquide lorsque le champ magnétique est supprimé.

Dans l'accéléromètre à détection capacitive, la calibration de l'amortissement et l'augmentation de la constante diélectrique faite par le fluide magnéto-rhéologique. Donc le signal de sortie est en fonction de l'accélération subie et de l'intensité du champ magnétique. Une sphère de silicium en lévitation comme masse d'épreuve est utilisé dans un autre accéléromètre innovant. La suspension électromagnétiquement de la sphère besoin une tension nécessaire pour maintenir la sphère à la même position qui nous renseigne sur la valeur de l'accélération. [13]

### **I.5.3 Le choix d'un accéléromètre**

Le choix approprié du capteur de vibration (accéléromètre) est basé sur les critères suivants :

- La gamme de fréquences
- La gamme de températures
- L'encombrement

L'accéléromètre le plus utilisé dans l'industrie est l'accéléromètre à détection piézoélectrique pour les raisons suivantes [13]:

- ✓ utilisable sur de très grandes gammes fréquentielles;
- ✓ large bande passante;
- ✓ bonne dynamique (rapport signal/bruit) ;
- ✓ taille réduite;

✓ solidité (aucune pièce en mouvement).

## I.6. Les signaux vibratoires

### I.6.1 La vibration

La vibration est généralement considérée comme le mouvement d'une masse ou d'un corps autour de sa position d'équilibre. Une vibration périodique se produit lorsque la vibration se répète à intervalles réguliers.

En appliquant une force à la masse, la masse se déplace vers la gauche, comprimant le ressort. Lorsque la masse est libérée, elle revient à sa position neutre, puis se déplace plus à droite jusqu'à ce que la tension du ressort arrête la masse. La masse se retourne alors et recommence à se déplacer vers la gauche. Il franchit à nouveau la position neutre et atteint la limite gauche. Ce mouvement peut théoriquement se poursuivre sans fin s'il n'y a pas d'amortissement dans le système et pas d'effets externes (tels que le frottement). Ce mouvement est appelé vibration (figure I.19).[22]

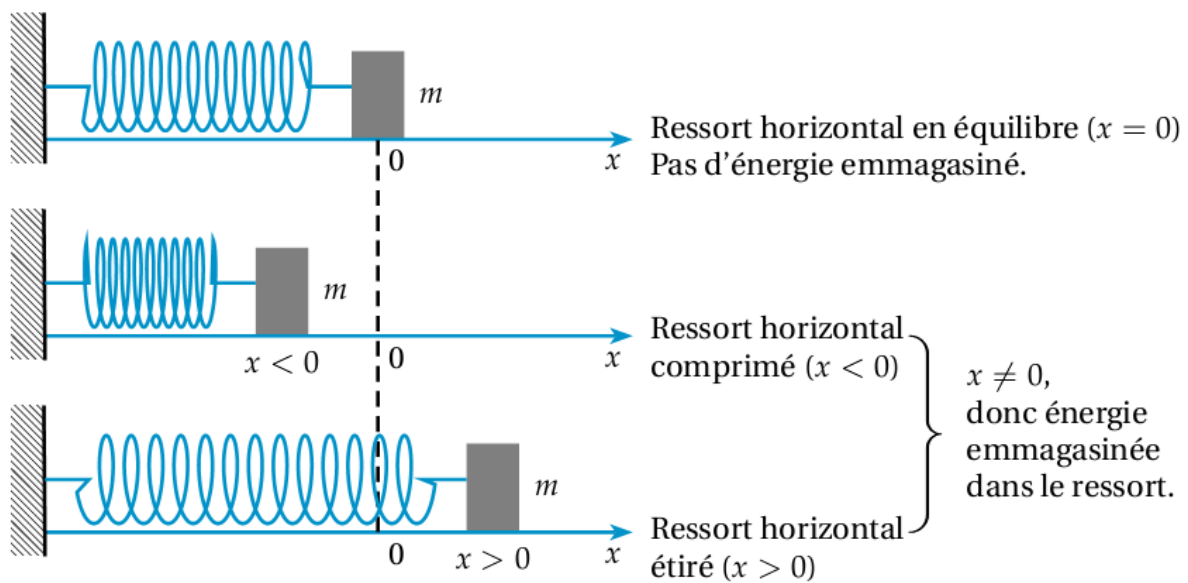


Fig.I.19. Les vibrations

### I.6.2. La nature des vibrations

En revenant au corps masse-ressort, nous pouvons étudier les caractéristiques des vibrations en traçant le mouvement de la masse par rapport au temps. Ce graphique est illustré à la figure I.20. Le mouvement de la masse de sa position neutre à la limite supérieure de déplacement, en passant par sa position neutre, jusqu'à la limite inférieure de déplacement et le retour à sa position neutre, représente un

cycle de mouvement. Ce cycle unique de mouvement contient toutes les informations nécessaires pour mesurer les vibrations de ce système. Un mouvement continu de la masse répétera simplement le même cycle.

Ce mouvement est appelé périodique et harmonique, et la relation entre le déplacement de la masse et le temps s'exprime sous la forme d'une équation sinusoïdale: [11]

$$X = X_0 \sin \omega t$$

$X$  = déplacement à tout instant donné  $t$ ;

$X_0$  = déplacement maximum;

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ ;

$f$  = fréquence (cycles / s - hertz - Hz);  $t$  = temps (secondes).

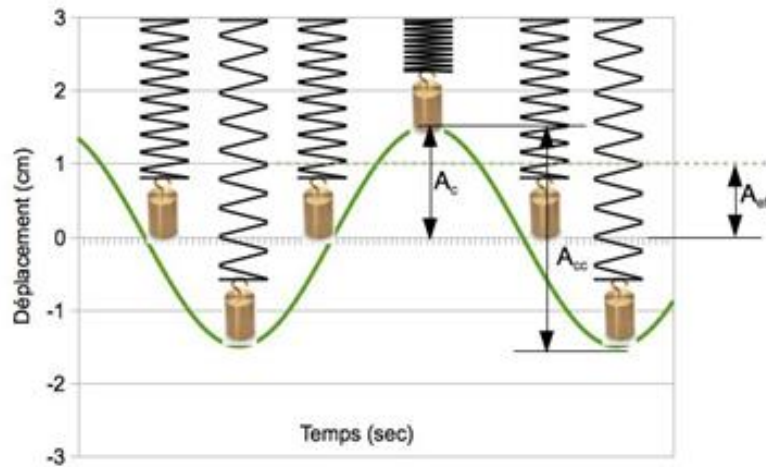


Fig.I.20. Onde harmonique simple

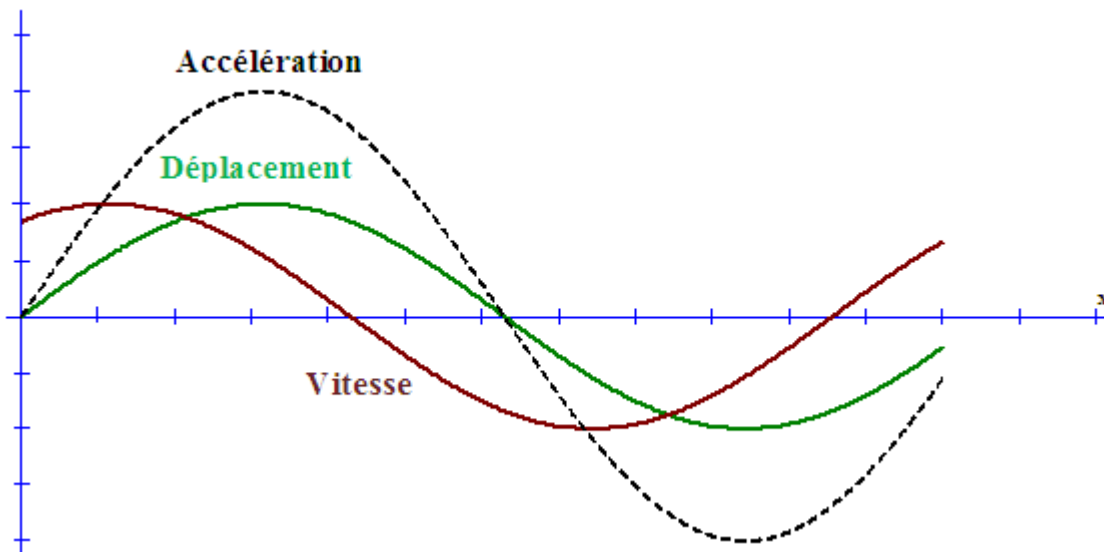
Au fur et à mesure que la masse monte et descend, la vitesse du voyage passe de zéro à un maximum. La vitesse peut être obtenue en différenciant dans le temps l'équation de déplacement:

$$velocity = \frac{dX}{dt} = X_0 \cdot \omega \cdot \cos \omega t$$

De même, l'accélération de la masse varie également et peut être obtenue en différenciant l'équation de vitesse:

$$a = \frac{d(velocity)}{dt} = -X_0 \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega t$$

Dans la figure I.21, le déplacement est représenté par une courbe sinusoïdale; vitesse, sous forme de courbe cosinusoidale; l'accélération est à nouveau représentée par une courbe sinusoïdale. [11]



*Fig.I.21. Forme d'onde d'accélération, de vitesse et de déplacement de masse en mouvement harmonique simple*

### **I.6.3. Caractéristiques de vibration**

Lors de l'utilisation de techniques d'analyse des vibrations, l'état de la machine est déterminé en étudiant les caractéristiques de ses vibrations, les plus importantes étant la fréquence et l'amplitude.

#### **✓ La fréquence**

La caractéristique la plus fondamentale de la vibration est sa fréquence. La fréquence est définie comme l'inverse de la période, qui est le temps nécessaire pour terminer un cycle de vibration. Par conséquent, la fréquence est le nombre de cycles qui ont lieu dans une certaine période de temps. Si la période de temps est une seconde, l'unité de fréquence sera Hertzio (Hz); si c'est une minute, l'unité sera des cycles par minute (cpm).

Une autre unité de fréquence est constituée par les ordres, définis comme la fréquence de vibration (cpm) rapportée à la vitesse de rotation (rpm). Par exemple, dans une machine dont la vitesse est de 1500 tr / min, 3000 cpm correspond à l'ordre 2. Il est généralement représenté par un X, donc l'ordre 2 serait 2X. Ceci est important lors de l'analyse des vibrations, car parfois les spectres sont exprimés en ordres.[7]

#### **✓ Amplitude**

L'amplitude d'une vibration est un indicateur de son importance et elle peut être mesurée en fonction du déplacement, la vitesse ou l'accélération.

Les unités de déplacement sont généralement utilisées lorsque les fréquences sont inférieures à 600 cpm, ce qui signifie qu'il est recommandé d'utiliser l'amplitude de déplacement lors de la mesure des vibrations dans les équipements fonctionnant à régime bas. Si la vibration à mesurer se situe entre 600 et 60 000 cpm, il est recommandé d'utiliser des unités de vitesse. Dans l'analyse des vibrations, les unités de

vitesse sont plus utilisées que les unités de déplacement, car les défaillances courantes telles que le déséquilibre ou le désalignement se produisent dans la plage de fréquences mentionnée.

Enfin, les unités d'accélération conviennent lorsque les valeurs de fréquence dépassent 60 000 cpm. L'amplitude en unités d'accélération est utilisée lorsque la défaillance étudiée est observée à des fréquences élevées (comme des défauts de roulement ou d'engrenages).

Dans le cas des machines rotatives, généralement des machines de taille moyenne, le spectre le plus uniforme est obtenu en utilisant des unités de vitesse, elles seront donc utilisées dans l'analyse des vibrations. [7]

Outre ce qui a été dit, un autre paramètre utilisé pour mesurer l'amplitude de la vibration est la valeur globale. Une valeur globale de vibration est un nombre scalaire qui représente son amplitude.

Ce nombre scalaire peut être représenté par une valeur crête à crête, une valeur crête ou la valeur effective

La valeur crête à crête est la différence entre le pic le plus élevé et le pic le plus bas. Ainsi, ce sera toujours une valeur positive. La valeur de crête est la magnitude du pic avec la valeur absolue la plus élevée, ce qui signifie que, dans ce cas, la valeur peut être positive ou négative. La valeur efficace ou valeur RMS est le carré moyen de la racine de l'onde de vibration, qui peut être exprimée avec la relation suivante:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$$

Les valeurs de vibration sont généralement exprimées en mm / s RMS, comme le montre le tableau suivant (tableau I.3). [7]

**Tableau I.3. Unités d'amplitude**

PARAMÈTRES	UNITÉS
Déplacement	µm crête à crête
Vitesse	mm / s RMS
Accélération	mm / s <sup>2</sup> RMS

#### **I.6.4. Valeurs de vibration admissibles**

En fonction de la puissance de la machine étudiée, des valeurs de vibration admissibles sont fixées, comme on peut le voir dans le tableau suivant (tableau I.4), un extrait de l'ISO 10816: 1995. [7]

**Tableau I.4. Valeurs de vibration admissibles selon ISO 10816: 1995**

Valeurs de vibration admissibles (mm/s RMS)	Type I	Type II	Type III	Type IV
0.28	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>
0.45				
0.71				
1.12	<b>B</b>	<b>B</b>	<b>B</b>	<b>B</b>
1.80				
2.80	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>
4.50				
7.10	<b>D</b>	<b>D</b>	<b>D</b>	<b>D</b>
11.20				
8				
28				
45				<b>D</b>

- **A**: bon état.
- **B**: état satisfaisant, les machines pourront continuer à fonctionner pendant une longue période.
- **C**: état non satisfaisant, la machine ne pourra pas continuer à fonctionner pendant une longue période, son état doit être vérifié périodiquement.
- **D**: état dangereux, les machines sont sûrement endommagées.

Le tableau I.5 est défini en fonction des différents types de machines, qui sont expliqués dans le tableau suivant[7]

**Tableau I.5. Classification des machines selon ISO 10816: 1995**

<b>Type I</b>	Éléments indépendants des moteurs ou des petites machines. Des exemples typiques de ce type pourraient être des moteurs de générateur jusqu'à 15 kW.
<b>Type II</b>	Machines de taille moyenne (généralement des moteurs de 15 kW à 75 kW) sans éléments de support spéciaux. Machines jusqu'à 300 kW montées rigidement.
<b>Type III</b>	Moteurs ou autres machines de grande taille avec des masses rotatives supportées par des éléments rigides. Machines relativement rigides dans le sens de la mesure des vibrations.
<b>Type IV</b>	Moteurs ou autres machines de grande taille avec des masses rotatives supportées par des éléments relativement flexibles dans le sens des vibrations de mesure (par exemple, les unités de puissance).

### **I.7. Etat de l'art des accéléromètres piézoélectriques**

La partie suivante présente l'historique et l'état de l'art des accéléromètres piézoélectriques à partir de 1920.

McCollum et Peters ont créé le premier accéléromètre commercialisé en 1923. Il pesait 1,75 livres avec une empreinte de  $3/4 \times 1-7/8 \times 8-1/2$  pouces et une fréquence de résonance rapportée inférieure à 2 kHz. le

dispositif utilisé transduction résistive pour mesurer une accélération appliquée, similaire à piézorésistive, mais au lieu d'utiliser un semi-conducteur, il a utilisé un métal dans la jauge de contrainte. Applications de l'appareil

allait des dynamomètres aux ponts et aux aéronefs. En 1936, Southwark-Bulletin commercialise un accéléromètre résistif à deux axes avec une plage dynamique allant jusqu'à 100 g avec des applications dans le choc des avions.

absorbeurs, enregistrement des vibrations des conduites souterraines et mesure de la force des explosions. À ce moment-là, le prix d'un tel accéléromètre était de 420 USD. Aujourd'hui, en 2019, le prix équivalent est de 7260 USD. En 1950, la jauge de contrainte à résistance Statham pouvait mesurer jusqu'à 500 g, mais avec de mauvais rapports signal / bruit et une plage de température de fonctionnement de seulement  $\pm 20$  F de la température ambiante. Un article de Weiss au début des années 1950 a déclaré que la mesure des transitoires était un problème pour les accéléromètres à jauge de contrainte parce que la fréquence naturelle des appareils était trop basse, ce qui a finalement conduit à la montée des accéléromètres piézoélectriques. Les matériaux piézoélectriques ayant un module élastique élevé, une fréquence de résonance élevée est plus facilement réalisable pour étendre la réponse en fréquence plate utilisable de l'accéléromètre. Avant 1960, aucun accéléromètre à jauge de contrainte n'avait une réponse plate utilisable au-dessus de 200 Hz, tandis que les accéléromètres piézoélectriques obtenaient des réponses plates jusqu'à 10 kHz. À la fin des années 40, les entreprises d'accéléromètres piézoélectriques ont commencé à émerger. En 1942, Brüel & Kjær (B&K), un accéléromètre piézoélectrique société du Danemark, a vu le jour et a produit en 1950 une conception de compression avec des sensibilités d'environ 70-100 mV / g et une résonance de 5 kHz. En 1972, B&K a produit une conception de mode de cisaillement qui a évolué pour résister à 100 000 g à faible coût. B&K a été acheté par AGIV, une société allemande, en 1992 et produit encore aujourd'hui des accéléromètres piézoélectriques. Plusieurs autres grandes entreprises, telles que Columbia National Laboratories, Gulton Manufacturing, Kistler Instrument

Company, PCB Piezotronics, Endevco, Wilcoxon Research et Calibration Activities, sont apparues à la fin des années 1940/50 et ont suivi une tendance similaire dans l'industrie des accéléromètres piézoélectriques.

En outre, des nombreuse traveaux de recherches récents ont été publiés sur l'état actuel de la technique des accéléromètres piézoélectriques. Les paramètres de leurs appareils sont présentés ci-dessous.

Référence	Sensibilité (pC/g)	Fréquences de résanances(kHz)	Matériaux utilisé
[A]	14.2	14.4	AIN
[B]	0.13	25.2	PZT
[C]	0.23	23.5	PZT
[D]	1.12	6.1	AIN
[D]	0.08	19.9	AIN
[F]	0.075	18.9	AIN

[A] : Yaghootkar, Bahareh, Soheil Azimi, and Behraad Bahreyni. "A high-performance piezoelectric vibration sensor." *IEEE Sensors Journal* 17.13 (2017): 4005-4012.

[B] : Tahmasebipour, Mohammad, and Ali Vafaie. "A Highly Sensitive Three Axis Piezoelectric Microaccelerometer for High Bandwidth Applications." *Micro and Nanosystems* 9.2 (2017): 111-120

[C] : ] Hindrichsen, Christian Carstensen, et al. "Circular piezoelectric accelerometer for high band width application." *SENSORS, 2009 IEEE. IEEE, 2009.*

[D] : Gesing, Andre Loch, et al. "Middle ear ossicular chain vibration detection by means of an optimized MEMS piezoelectric accelerometer." *IEEE Sensors Journal* 19.6 (2018): 2079-2086.

[F] : Gesing, A. L., et al. "On the design of a MEMS piezoelectric accelerometer coupled to the middle ear as an implantable sensor for hearing devices." *Scientific reports* 8.1 (2018): 3920.

## **I.8. Conclusion**

Dans ce chapitre, la maintenance et ces types sont définis ensuite, les avantages et les inconvénients de chaque type sont cités d'une part, et les machines tournantes et leurs principaux défauts sont étudiés d'une autre part.

La surveillance vibratoire des machines tournantes et les étapes à suivre pour visualiser les signatures vibratoires pour les signaux électriques délivrés par l'accéléromètre tels que l'amplification, le filtrage et l'échantillonnage sont présentés.

De façon détaillée, on a présenté aussi les vibrations, leurs différents types et ces caractéristiques. Dans le chapitre suivant, on va présenter un état de l'art sur la piézoélectricité et les matériaux piézoélectriques.

# **Chapitre II**

## **Chapitre II**

### **La piézoélectricité**

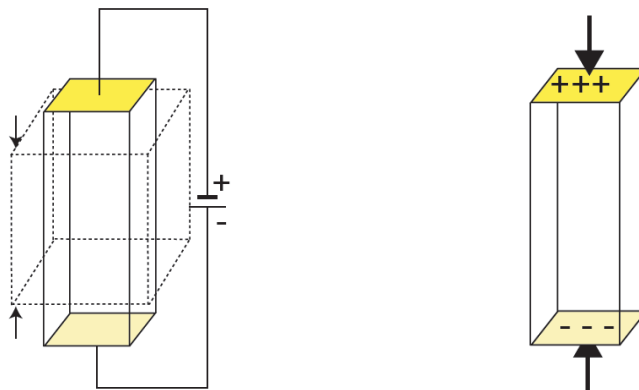
#### **II. 1. Introduction**

L'effet piézoélectrique repose sur la propriété particulière de certains matériaux qui peuvent se polariser sous l'application d'une contrainte mécanique, et qui inversement se déforment lorsqu'ils sont soumis à un champ électrique. Dans certains matériaux, comme le quartz, cet effet est naturellement observable. L'application d'une force provoque l'apparition d'un champ électrique (effet piézoélectrique direct), tandis que l'application d'un champ électrique provoque la déformation du matériau (piézoélectrique inverse).

En effet, il existe de très nombreuses compositions différentes dont les propriétés diélectriques et mécaniques varient considérablement, de sorte que l'on trouve toujours une céramique adaptée à une application particulière, d'où les céramiques (PZT) possèdent de bonnes caractéristiques piézoélectriques et un excellent coefficient de couplage électromécanique, ce qui explique leur rôle important dans le domaine de mesures des vibrations.

## II.2.La piézoélectricité

Dans des cristaux non centrés ou des structures similaires, la piézoélectricité est une interaction linéaire entre des systèmes mécaniques et électriques. Un matériau est dit piézoélectrique si l'application d'une contrainte mécanique externe incite un déplacement diélectrique dans ce matériau, et réciproquement de se déformer lorsqu'on leur applique un champ électrique. Le premier appelé effet piézoélectrique direct, le second effet piézoélectrique inverse (figure II.1). [23]



*Effet inverse    Effet direct*

**Fig.II.1. L'effet d'un matériau piézoélectrique**

### II.2.1. Historique

En 1880, Pierre et Jacques Curie (deux frères travaillant comme deux préparateurs à la faculté des sciences de Paris) ont fait la première démonstration de l'effet piézoélectrique direct. Ils ont inspecté l'existence de la piézoélectricité sur certains cristaux ; quartz, tourmaline, topaze, sucre et sel de La Rochelle grâce à leurs connaissances de la pyroélectricité et de la structure cristalline.

Sur la base de calculs thermodynamiques de l'année suivante, l'existence de l'effet inverse avait été prédite par Gabriel Lippmann, et ensuite vérifiée par les frères Curie.

Pendant une trentaine d'années, la piézoélectricité était un intérêt de laboratoire; elle donne surtout lieu à des travaux théoriques sur les structures cristallines montrant cette propriété. Ces travaux achevèrent en 1910 à une publication qui donne les vingt classes cristallines piézoélectriques, et qui définit rigoureusement les constantes piézoélectriques dans le formalisme de l'analyse tensorielle.[24]

**II.3. Principe de l’effet piézoélectrique**

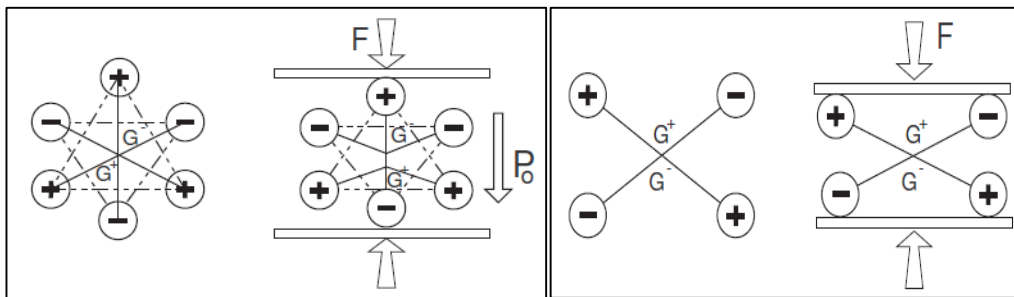
Dans un cristal, la piézoélectricité est liée aux symétries de la maille cristalline. Si la maille d’un cristal possède un centre de symétrie (maille dite Centro symétrique) dans cas particulier, ce cristal ne peut pas être piézoélectrique.

Une maille cristalline est constituée d’atomes portant une charge électrique positive et d’autres portant une charge électrique négative. Au premier temps, en absence de déformation, le barycentre des charges positives est confondu avec celui des charges négatives.

Si on exerce une force de compression dans le cas des matériaux piézoélectriques, la maille cristalline va se déformer, de façon que le barycentre des charges positives et celui des charges négatives vont s’écarter. Alors, un dipôle électrique sera engendré qui par réaction, va faire apparaître des charges de signes contraires sur les deux électrodes, d’où la production d’un courant électrique.

Parmi les matériaux piézoélectriques les plus utilisés il y a une famille particulière pour laquelle la polarisation macroscopique peut être modifiée par l’application d’un champ électrique ces matériaux dits ferroélectriques.

Dans le cas,une sollicitation des matériaux non piézoélectriques par des forces de compression,la maille cristalline va se déformer mais les deux barycentres restent stables donc, il n’y aura pas de production d’électricité puisque le dipôle électrique ne se forme pas (figure.II.2).[23]



*Matériaux possédant un centre de symétrie      Matériaux ne possédant pas de centre de symétrie*

**Fig.II.2. Matériaux piézoélectriques**

Sur les 32 classes cristallines, (voir figure II.3), 21 sont dépourvues de centre de symétrie, parmi celles-ci, 20 sont piézoélectriques. Dans ces 20 classes, 10 présentent une polarisation spontanée en l’absence d’un champ extérieur et possèdent une polarisation naturelle selon au moins une direction; elles sont dites pyroélectriques et polaires en raison de la variation de la polarisation spontanée avec la température.

Enfin, les cristaux ferroélectriques correspondent à un sous-groupe des pyroélectriques pour lesquels l'axe polaire, support d'un dipôle permanent et mobile dans le réseau cristallin sous l'influence d'un champ électrique extérieur. Ils ont eu la particularité de pouvoir se polariser selon deux axes ou plus, chaque direction étant équiprobable.[23]

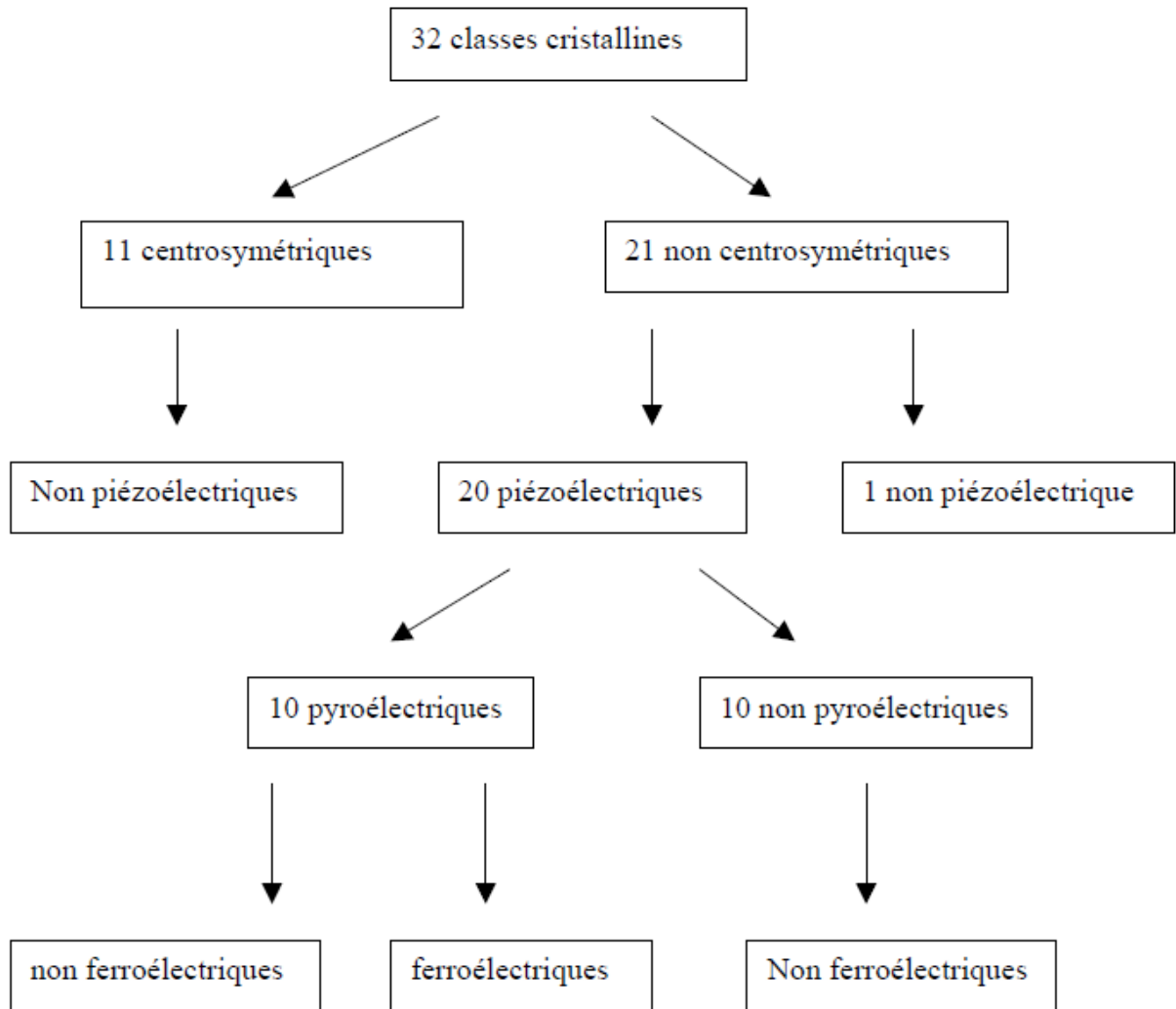


Fig.II.3.Organigramme des différentes classes cristallines. [26]

## II.4. La Ferroélectricité

La Ferroélectricité figure un sous-groupe de la pyroélectricité. Le champ électrique extérieur varie la direction de polarisation d'un cristal ferroélectrique. Si le champ est suffisamment intense, cette direction peut être simplement réorientée voire même s'inverser.

En 1935, le terme ferroélectrique a été utilisé pour la première fois, par MULLER pour rappeler le comportement hystérétique de la polarisation électrique macroscopique en fonction du champ électrique appliqué.

Avant polarisation, le matériau ferroélectrique ne montre pas de propriété macroscopique piézoélectrique. Une fois polarisé, il devient alors piézoélectrique. [25]

**II.5. Obtention des matériaux piézoélectrique**

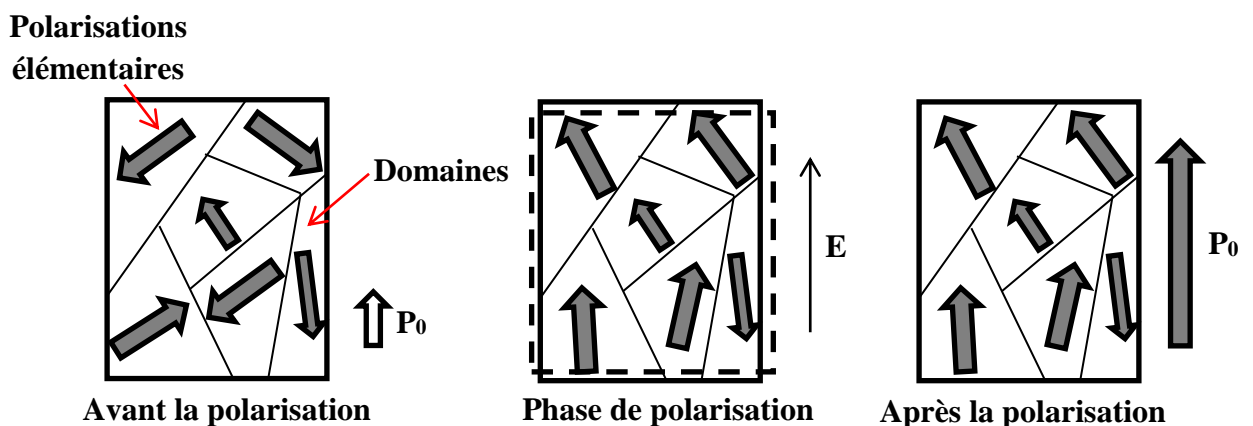
En réalité, qu'ils soient d'origine synthétique ou naturelle, ces matériaux ne montrent que peu ou pas de polarisation naturelle à l'échelle macroscopique. Les polarisations au sein des grains sont orientées de manière aléatoire à l'état naturel, et leur somme est nulle.

L'augmentation de la polarisation de ces matériaux fait par recours à deux procédés différents [27]:

- Procédés électrique.
- Procédés thermique.

**II.4.1. Procédé électrique**

Puisque chaque grain possède un axe privilégié, ces derniers sont orientés de façon aléatoire de sorte que l'effet piézoélectrique résultant est presque nulle. Alors, on peut réorienter dans le même sens ces axes par l'application d'un champ électrique intense. Le matériau est donc macroscopiquement polarisé. Cette polarisation est rémanente c'est-à-dire lorsqu'on supprime le champ électrique, tous les domaines ne récupèrent pas leurs états de polarisation aléatoire (figure II.4).[27]



**Fig.II.4** Polarisations d'un matériau ferroélectrique

En effet, l'état de polarisation du matériau est hystérétique. Dans le cas les valeurs du champ électriques sont supérieures au champ coercitif  $\pm E_C$ , donc la polarisation est saturée à  $\pm P_S$ . Quand le

champ électrique est éliminé, la polarisation va réduire jusqu'à accéder la polarisation rémanente  $P_r$  supérieure à l'état de polarisation initiale(voir figure II.5). [27]

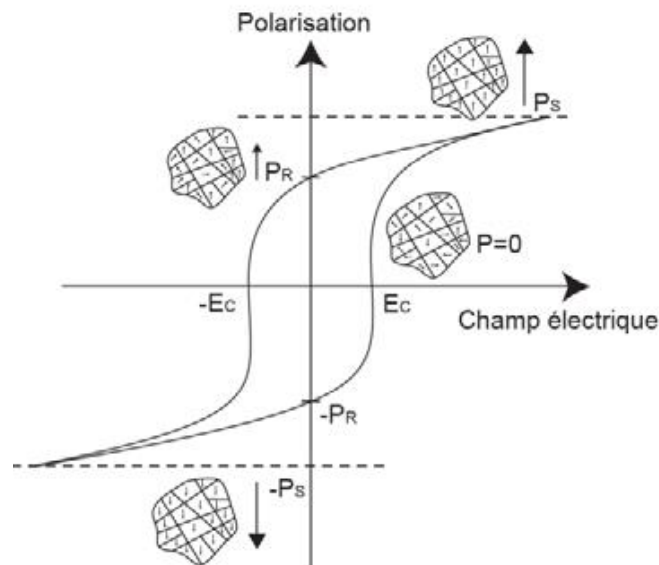


Fig.II.5.Cycle d'hystérésis de la polarisation d'un matériau ferroélectrique

### ✓ Les types de polarisation

Un milieu diélectrique comporte des porteurs de charges liées et des porteurs de charges libres susceptibles de se déplacer sous l'influence d'un champ électrique. Le phénomène de polarisation peut être considéré comme résultant du déplacement des porteurs chargés par rapport à leur position d'équilibre sous l'influence d'un champ électrique. Trois types de polarisation peuvent être distingués:[27]

a) **La polarisation électronique induite:** lorsqu'on applique un champ électrique aux bornes d'un matériau diélectrique, le nuage électronique au niveau de chaque atome se déplace par rapport au noyau, on obtient une polarisation *électronique induite*. On l'observe dans tous les diélectriques jusqu'aux fréquences optiques.

b) **Polarisation atomique ou ionique :** lorsque différents atomes sont dans une molécule, les électrons engagés dans une liaison de valence se déplaçant préférentiellement vers l'atome le plus électronégatif, créant ainsi, sans contrainte extérieures, un moment de liaison. Si par symétrie, le résultant des différents moments dipolaires est nul, la molécule ne possède pas de moment dipolaire permanent. Mais si on la soumet à un champ électrique, le déplacement des atomes ou ions les uns par rapport aux autres donnent naissance à une *polarisation atomique ou ionique*.

c) **Polarisation par charge d'espace** : il existe des charges d'espace dues à des électrons ou à des ions qui ne sont pas complètement libres de se déplacer vers les armatures du condensateur. On rencontre ce type de polarisation par charges d'espaces ou interrassiale dans des matériaux hétérogènes, aux frontières entre les différents composants.

Les cristaux ferroélectriques appartiennent à la famille des pyroélectriques. La direction de polarisation privilégiée est l'axe polaire du cristal. L'amplitude du moment dipolaire étant fonction de la température, on peut observer la variation de la polarisation spontanée de ces cristaux en mesurant les charges écoulées dans un circuit fermé extérieur lorsqu'on fait varier la température.[27]

### II.5.2. Procédé thermique

Deux types de procédés thermiques sont distingués [27]:

- **Transition ordre –désordre**

Les mailles du cristal ont un axe de polarisation aléatoire car les axes de polarisation sont parfaitement désordonnés donc la polarisation macroscopique est nulle, dans la phase paraélectrique (non piézoélectrique). Mais, la diminution de la température jusqu'à dépasser la température de curie, les axes de polarisation vont présenter un ordre orientationnel.

- **Transition displacive**

L'axe de polarisation est inexistant dans la phase paraélectrique même au point de vue microscopique pour des raisons de symétrie cristalline. Au moment de la transition de la température de curie (ici température de changement de phase), la polarisation apparaît à cause du changement de la structure de la maille (figure II.6).

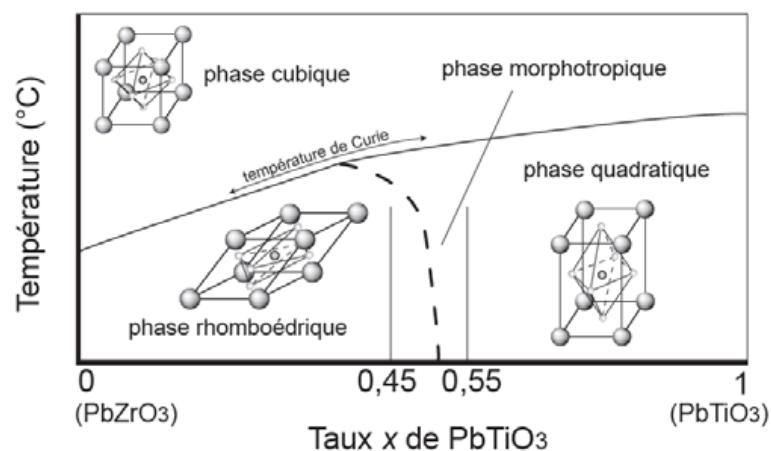


Fig.II.6. Diagramme des différentes phases cristallines du PZT

Pour avoir un effet piézoélectrique plus important et pour minimiser le champ électrique nécessaire à la polarisation, on fait un procédé thermique avant le procédé électrique.

## **II.6. Les matériaux piézoélectriques**

Les matériaux piézoélectriques peuvent être ordonnés en quatre classes principales sont les suivants:

- Les cristaux qui possèdent une piézoélectricité naturelle.
- Les céramiques.
- Les polymères.
- Les composites.

Avant de les comparer, il est nécessaire de définir les deux principales grandeurs physiques qui vont caractériser ces différents matériaux [28]:

• **l'impédance acoustique ( $Z_A$ )** : L'impédance acoustique doit être la plus proche possible de celle des tissus biologiques afin que les ultrasons se transmettent bien de la sonde au corps humain, Dans le cas d'application en relation avec transducteurs médicaux.

• **le coefficient de couplage électromécanique ( $K_T$ )** : La capacité du matériau de conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique ou inversement caractérisée par le coefficient de couplage électromécanique. Il doit être le plus élevé possible.

### **II.6.1. Les cristaux**

Le cristal piézoélectrique le plus connu est le quartz, ses propriétés sont peu attrayantes pour les applications de transducteurs médicaux : son impédance acoustique est relativement élevée et son coefficient de couplage est très faible. Le coût élevé et la fragilité de ces cristaux expliquent que l'on ne les retrouve que très peu dans les produits actuels.

### **II.6.2. Les céramiques**

Les céramiques piézoélectriques sont incontestablement les matériaux les mieux adaptés à l'heure actuelle pour une utilisation échographique. Ce succès peut sembler paradoxal car, bien que les valeurs de  $K_T$  soient élevées, leur impédance acoustique est bien plus élevée que celle des tissus biologiques. Il est dû au fait que ces matériaux sont d'un coût relativement faible, qu'ils sont faciles à transformer et surtout qu'ils offrent un éventail très large de performances (figure II.7).



**Fig.II.7. Les céramiques**

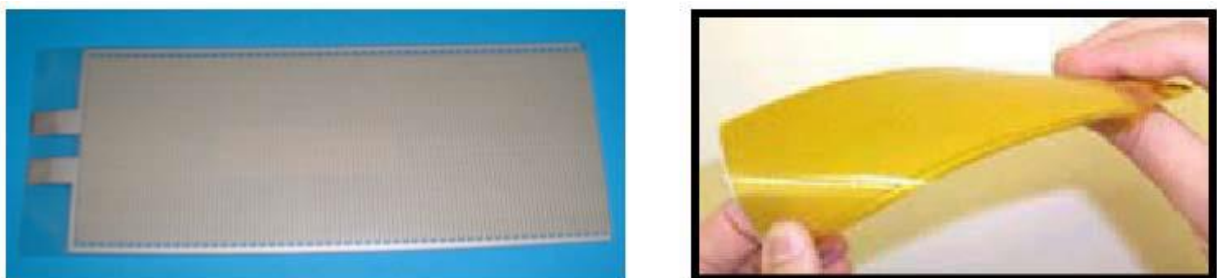
**II.6.3. Les polymères**

Les chercheurs ont considérés les copolymères tels que le P (VDF-TrFE) et certains polymères tels que le PVDF comme des matériaux piézo-électriques. Ces matériaux se caractérisent par une faible impédance acoustique. Cependant jusqu’à une période récente, leurs coefficients de couplage étaient bien plus faibles que ceux des céramiques. L’amélioration des procédés de fabrication a permis d’aboutir à des valeurs de  $K_T$  de l’ordre de la moitié de ceux obtenus avec des céramiques.

**II.6.4. Les composites**

Le développement de ces matériaux a pour des applications sonar, ont fait leur apparition au début des années 80 et montrent l’avancée majeure dans le domaine des matériaux piézoélectriques, depuis l’apparition des PZT dans les années 60.

Leur origine provient du constat selon lequel aucun matériau existant n’avait à la fois une impédance acoustique assez faible pour bien transmettre son énergie aux tissus biologiques et une valeur de  $K_T$  élevée. En effet, une impédance acoustique et  $K_T$  assez important caractérisent les céramiques et une valeur de  $K_T$  et d’impédance acoustique trop faible caractérisent les polymères. Pour bénéficier des avantages et remédier aux inconvénients de ces deux familles du matériau, il fallait utiliser à la fois les deux de sorte que le matériau résultant ait une impédance acoustique plus faible tout en gardant un  $K_T$  comparable avec celui d’une céramique (figure II.8).



**Fig.II.8. Matériaux composites**

## II.7. Matériaux ferroélectriques de types pérovskite

De nombreux matériaux ferroélectriques adoptent la structure pérovskite. Le titanate de baryum ( $BaTiO_3$ ) est le matériau ferroélectrique de structure pérovskite le plus connu. Sa très grande permittivité a été mise en évidence en 1941 par Thurnauer [29] et il a été reconnu comme étant ferroélectrique en 1945. Les zircono-titanates de plomb (PZT) apparus en 1954 [30] constituent maintenant la première grande source de ferroélectriques de structure pérovskite.

### II.7.1. Le PZT (Structure de la maille pérovskite $ABO_3$ )

La forme la plus simple de la structure de type pérovskite  $ABO_3$  c'est la maille cubique et A pris comme l'origine de la maille.

A est un cation bivalent de grand rayon et de coordinence douze. Huit cations A forment la maille cubique. Les ions oxygène sont au centre de chaque face et forment un octaèdre au centre duquel se trouve le cation B. Dans le cas du PZT, le cation A est  $Pb^{2+}$  e rayon 119 pm, le cation B est soit un ion  $Zr^{4+}$  (84pm), soit un ion  $Ti^{4+}$  (61pm).

Dans le cas du PZT (figure II.9):

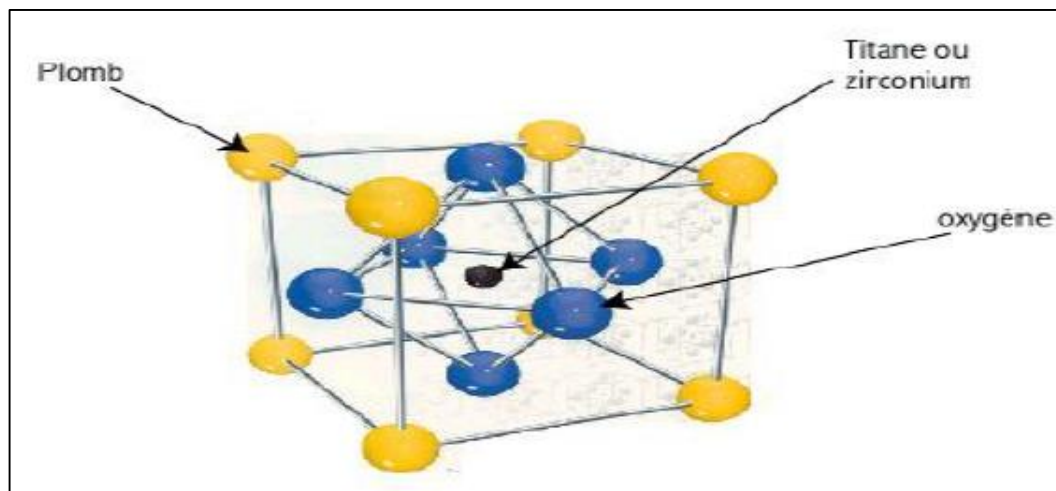


Fig.II.9. Maille cubique de PZT.

### Diagramme de phase de l'oxyde ternaire $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$

Au-dessus de la température de curie, c'est dans la phase cubique que le PZT cristallise. En dessous de cette température  $T_c$ , différentes structures deviennent possibles en fonction de rapport de Zr et de Ti. En fonction du taux de zirconium noté "x" dans la formule générique :  $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$ , on peut classer ces structures.

Pour  $x > 0.55$ , on est dans le domaine riche en zirconium et la phase de cristallisation montre une structure rhomboédrique. Le PZT possède un moment dipolaire permanent.

Pour  $x < 0.45$ , on est dans le domaine riche en titane et cette fois la phase de cristallisation présente une structure quadratique.

On notera que lorsque  $x$  est compris entre 0.45 et 0.55 environ, la phase obtenue est un mélange de deux phases quadratique et rhomboédrique. Cette phase est nommée morphotropique. Elle est importante car c'est dans cette zone que la PZT montre ses meilleures propriétés ferroélectriques et piézoélectriques (figure II.10).[31]

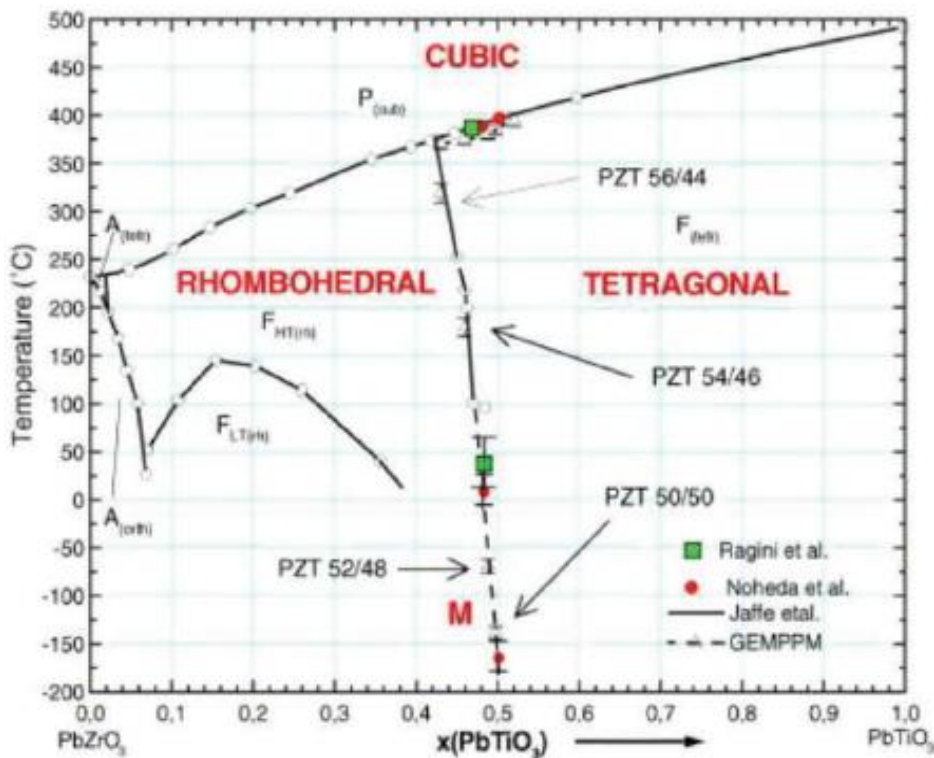


Fig.II.10. Diagramme de phase de l'oxyde ternaire  $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$

a- Directions de la polarisation possibles de la maille pérovskite

Dans la zone morphotropique, il y avait un mélange de phase quadratique et rhomboédrique, ceci entraîne des directions de polarisation différentes pour les deux systèmes. La polarisation d'une maille quadratique se fera selon l'une des six directions équivalentes [100], tandis que pour une maille rhomboédrique elle se fera selon l'une des huit directions équivalentes [111]. L'axe polaire de la phase monoclinique est contenu dans le plan (110) (figure II.11).

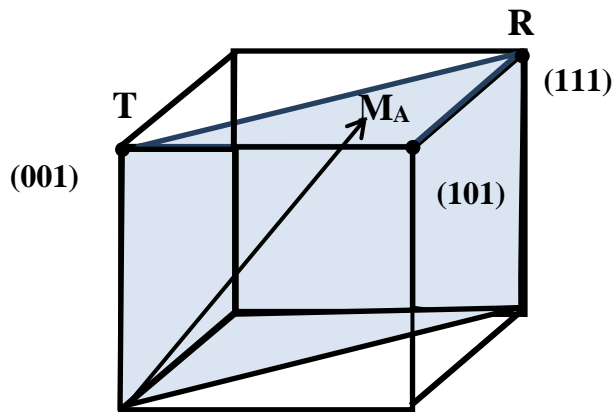
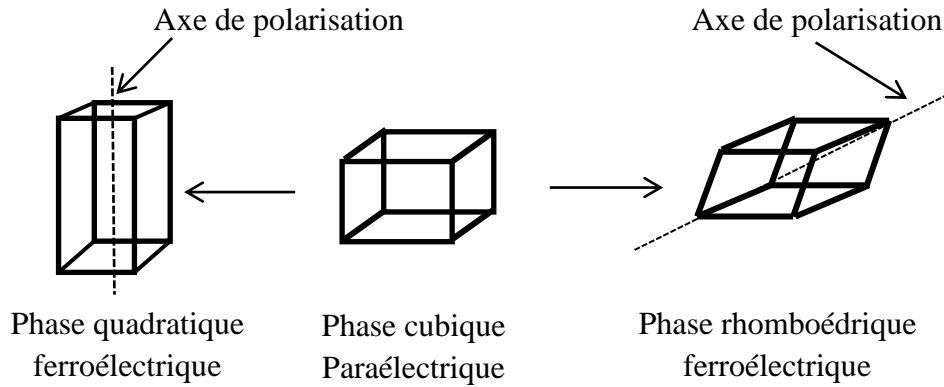


Fig.II.11. Directions de polarisation possible pour une maille quadratique ou Rhomboédrique et monoclinique.

### II.7.2. Les paramètres de la maille pérovskite de PZT

La frontière morphotropique de phase (FMP) se situe au voisinage du rapport  $Zr/Ti=52/48$  à température ambiante, la FMP correspond à un mélange biphasique quadratique/rhomboédrique pour des taux de zirconium compris entre 45 et 55 %, ce pourcentage dépend du procédé d'élaboration de céramique. La figure II.12 illustre que les paramètres change brutalement pour les compositions proches de la FMP.

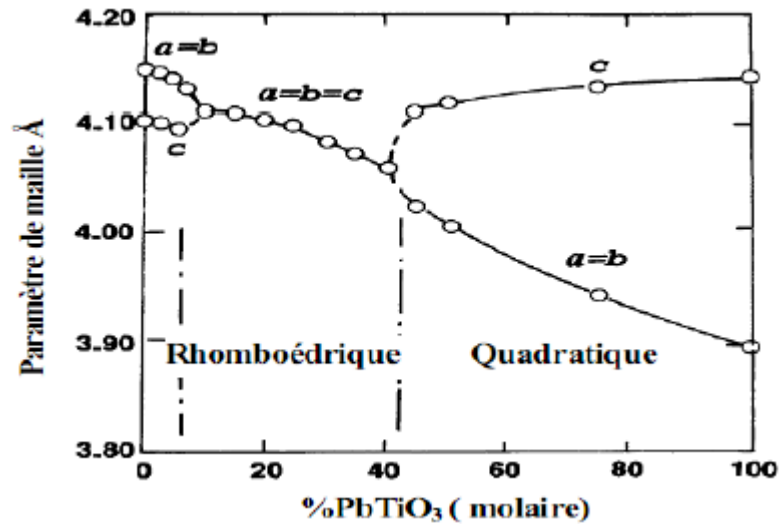


Fig.II.12. Les paramètres de la maille pérovskite de PZT

### II.7.3. Les directions et les domaines ferroélectriques dans les PZT

Par application d'un champ électrique dans une direction donnée, la phase ferroélectrique présente une structure de domaines dans laquelle les dipôles peuvent être réorientés (la figure II.13). La composition cristalline des matériaux ferroélectriques varie suivant la gamme de température dans laquelle se trouve le matériau et sa structure.

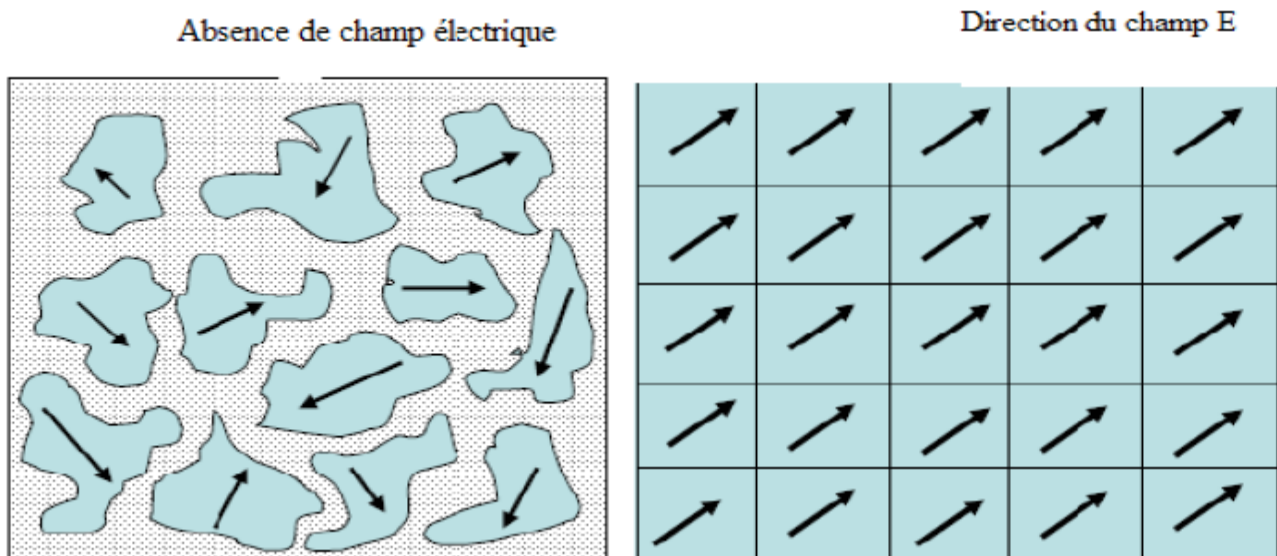


Fig.II.13. Les directions et les domaines ferroélectriques dans les PZT

Les distorsions de la maille cubique en dessous de la température de Curie donnent principalement naissance à deux phases ferroélectriques dont le domaine d'existence dépend du rapport Zr/Ti. Le déplacement relatif des positions d'équilibre des ions du réseau provoqué par ces déformations conduit à une séparation des centres des charges positives et négatives qui induit la

formation du dipôle permanent, suivant les différentes phases de la maille, la direction de la polarisation n'est pas la même (figure II.14).

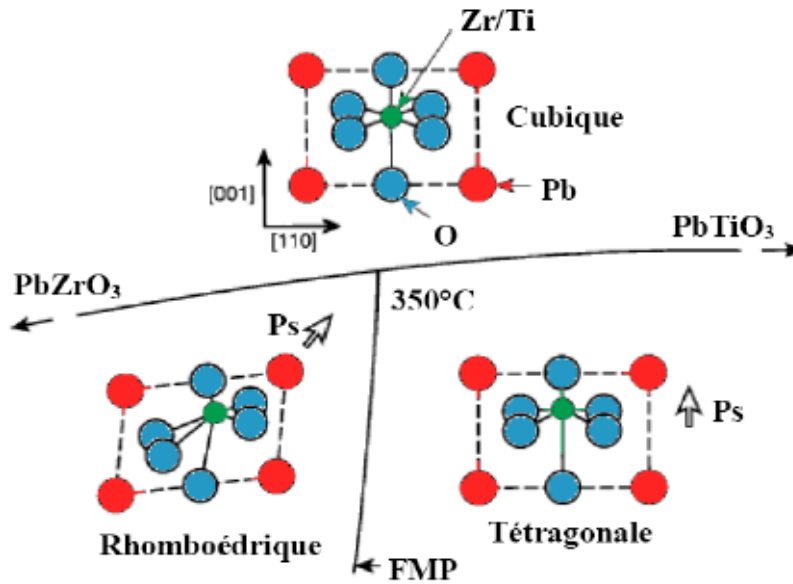


Fig.II.14. Structure et direction de polarisation en fonction de la température [32]

Pour la phase quadratique, la déformation suivant l'axe C [001] de la maille cubique originale, induit une polarisation spontanée dans la même direction. Comme il existe six axes [001] équivalents dans la phase cubique, l'axe polaire peut être suivant les six directions, c'est-à-dire la déformation se fait en étirant le cube suivant les six faces.

Pour la phase rhomboédrique, les directions suivant les axes x, y, z de la maille pérovskite originale, induisent une polarisation spontanée suivant les diagonales joignant deux sommets opposés (direction (111)). Il existe huit directions possibles de polarisation spontanée dans cette phase, c'est-à-dire la déformation se fait en étirant le cube suivant les grandes diagonales.

#### II.7.4. Loi de comportement d'un matériau piézoélectrique

Si on considère que le système est fermé (il n'échange que de l'énergie). La formule suivante est obtenue par l'application de la première loi de la thermodynamique. [32]

$$dU = \theta d\Sigma + \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} + E_i dD_i \quad (II.1)$$

Avec :

$\theta$  est la température,  $\Sigma$  est l'entropie,  $\sigma$  est le tenseur de contrainte,  $\varepsilon$  est le tenseur de déformation,  $E$  est le vecteur champ électrique et  $D$  est le vecteur déplacement électrique.

Pour un processus adiabatique ( $d\Sigma = 0$ ), on trouve:

$$dU = \sigma_{ij} + E_i dD_i \quad (II.2)$$

Finalemt, quatre couples d'équations d'état qui décrivent le couplage piézoélectrique sont extraits. Ces équations relient les variables électriques (champ électrique E en V/m et déplacement électrique D en C/m<sup>2</sup>) aux variables mécaniques (déformation S sans unité et contrainte T en N/m<sup>2</sup>).

Les grandeurs électriques sont des tenseurs de dimensions 1 x 3 et les grandeurs mécaniques sont des tenseurs de dimensions 1 x 6

**Tableau.II.1. les équations d'état du couplage piézoélectrique**[26]

Equations d'état	Variabes indépendantes	forme
$\begin{cases} S = s^E T + d^t E \\ D = \varepsilon^T E + dT \end{cases}$	T , E	intensive
$\begin{cases} T = c^D S - h^t D \\ E = \beta^S D - hS \end{cases}$	S, D	extensive
$\begin{cases} S = s^D T + g^t D \\ E = \beta^T D - gT \end{cases}$	T, D	mixte
$\begin{cases} T = c^E S - e^t E \\ D = \varepsilon^S E + eS \end{cases}$	S,E	mixte

Les matériaux piézoélectriques étant toujours anisotropes, les phénomènes décrits par ces équations dépendent des orientations spatiales et les constantes sont des tenseurs qu'ils sont écrits sous forme matricielle :

**Tableau II.2. Les constants piézoélectrique**[32]

Grandeur	Terme	Application	Matrice
Electrique	$\varepsilon$	Permittivité électrique (F.m <sup>-1</sup> )	(3×3)
	$\beta$	Imperméabilité électrique (m.F <sup>-1</sup> )	(3×3)
Mécanique	$s$	Compliance ou souplesse (m <sup>2</sup> .N <sup>-1</sup> )	(6×6)
	$c$	Raideur ou rigidité élastique (N.m <sup>-2</sup> )	(6×6)
Piézoélectrique	$d$	Constante de charge (C.N <sup>-1</sup> ou m.V)	(3×6)
	$e$	Constante piézoélectrique (C.m <sup>-2</sup> )	(3×6)
	$g$	Constante de tension (m <sup>2</sup> .C <sup>-1</sup> )	(3×6)
	$h$	Constante piézoélectrique (V.m <sup>-1</sup> ou N.C <sup>-1</sup> )	(3×6)

### ❖ Définition des constantes piézoélectriques

La proportionnalité entre la contrainte et l'induction à champ électrique nul ou constant est expliqué par la constante de charge  $d$ . La proportionnalité entre la déformation et le déplacement électrique à champ électrique nul ou constant est expliqué par la constante piézoélectrique  $e$ . La proportionnalité entre la contrainte mécanique et le champ électrique à déplacement électrique nul ou constant est expliqué par la constante de tension  $g$ . La proportionnalité entre la déformation et le champ électrique à déplacement électrique nul ou constant est expliqué par la constante piézoélectrique  $h$ .

Il est possible d'écrire des expressions matricielles entre les différentes constantes piézoélectriques car les quatre couples d'équations sont équivalents [32]:

$$\begin{cases} d = \varepsilon^T g = eS^E \\ e = \varepsilon^S h = dC^E \\ g = \beta^T d = hS^D \\ h = \beta^S e = gC^D \end{cases}$$

Les considérations de symétrie du milieu cristallin nous permettent de diminuer le nombre de coefficients non nuls des matrices des constantes.

Les hypothèses physiques introduites pour la piézoélectricité consistent à négliger les effets magnétiques et les effets thermiques et considérer l'interaction électromécanique uniquement. Pour la piézoélectricité, généralement on se restreint à l'élasticité linéaire en restant dans le cadre des petites déformations.

## II.8. Modes de réponse dominant

Trois modes de réponses dominants sont distingués [32] (voir figure II.15):

- **Mode d'extension (d33)**

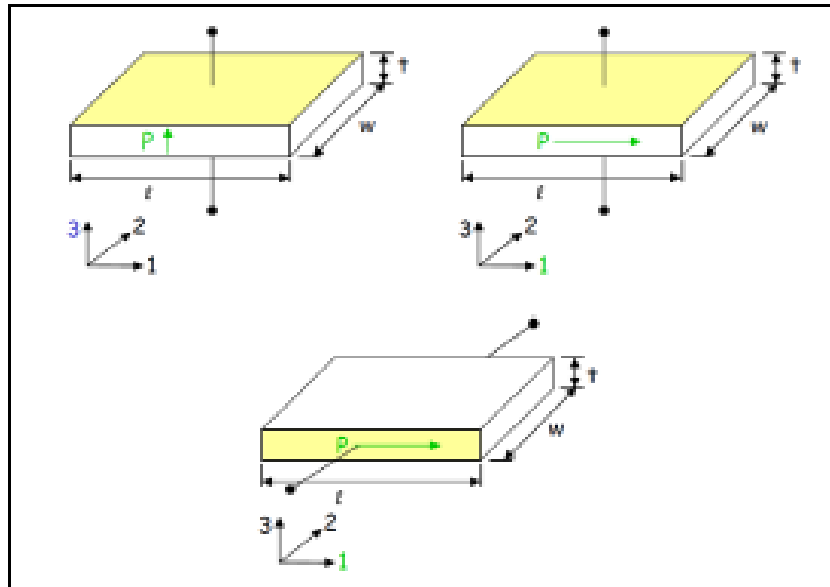
Dans le cas d'une sollicitation de compression, de traction ou de flexion, le mode d'extension est actif, ceci correspond à un champ électrique possédant la même direction que l'axe de polarisation.

- **Mode de cisaillement transverse (d31)**

Dans le cas d'une sollicitation de compression, de traction ou de flexion, le mode de cisaillement transverse est actif, ceci correspond à un champ électrique orthogonal à l'axe de polarisation ( $E$  et  $P$  sont contenus dans le plan (3,1)).

- **Mode de cisaillement plan (d15)**

Dans le cas d'une sollicitation de torsion, le mode de cisaillement plan est actif, ceci correspond à un champ électrique orthogonal à l'axe de polarisation ( $E$  et  $P$  sont contenus dans le plan (2,1)).



**Fig.II.15. Différents modes de couplage d'un élément piézo-électrique**

Généralement, le coefficient  $d_{15}$  admet la valeur la plus importante puis il vient le coefficient  $d_{33}$  et enfin le coefficient  $d_{31}$ .

### **II.9. Les domaines d'application des piézomatériaux**

La première application de la piézoélectricité était le sonar développé pendant la Première Guerre mondiale. Après certain temps, le premier oscillateur à quartz a été mis au point par Walter Cady, ouvrant ainsi la voie au contrôle de fréquence. Le succès de ces projets a relancé les recherches qui avaient conduit à travers les années suivantes au développement de nouveaux dispositifs pour une large palette d'applications dans la vie quotidienne et industrielle et la recherche (voir tableau II.3):

**Tableau II.3. Domaine d'application des piézomatériaux**

Application basées sur l'effet direct	Application basées sur l'effet inverse	Application basées sur les deux effets
Microphone	Haut-parleur	Transducteur d'ultrasons pour diagnostic médical (échographie).
hydrophone	Buzzer	CND par ultrasons
Capteur de choc	Transducteur sonar	Détecteur de proximité ou de présence
Accéléromètres	Nébuliseur	Mesures de distances ou de débits
Allumage	Moteurs ultrasonores	Gyroscope
Capteur de pression ou de contraintes	Relais	Filtres fréquentiels (ondes volumiques SAW)
	Micropositionnement	Lignes à retard.
	Ajustement laser	Transformateur piézoélectrique.
	Imprimante à jet d'encre	
	Dispositifs acousto-optiques	
	Pompe piézoélectrique	
	Bistouri piézoélectrique	

## II.10. Conclusion

Ce chapitre est consacré à étudier les notions de base sur la piézoélectricité et la ferroélectricité. Il comprend également une partie sur les différents types des matériaux piézoélectriques (céramiques, cristaux, polymères et composites) et une autre partie sur les matériaux ferroélectriques de types pérovskite (Les zircono-titanates de plomb (PZT)).

Dans le chapitre suivant, on va voir une étude approfondie sur les accéléromètres piézoélectriques et leurs comportements physiques.

# Chapitre III

## **Chapitre III**

### **L'accéléromètre piézoélectrique**

#### **III.1. Introduction**

Les vibrations et les chocs sont présents dans tous les domaines de notre vie quotidienne. Ils peuvent être générés et transmis par des moteurs, des turbines, des machines-outils, des ponts, des tours et même par le corps humain. Si certaines vibrations sont souhaitables, d'autres peuvent être dérangeantes. Par conséquent, il est souvent nécessaire de comprendre les causes des vibrations et de développer des méthodes pour les mesurer et les prévenir. Les accéléromètres piézoélectriques sont connus comme le meilleur choix pour mesurer les vibrations par rapport aux autres types de capteurs. Le but de ce chapitre est de donner un aperçu théorique du fonctionnement et des caractéristiques de l'accéléromètre piézoélectrique.

#### **III.2. L'accéléromètre piézoélectrique**

Le principe de fonctionnement de l'accéléromètre piézoélectrique est de transformer une force ou une charge mécanique en un signal électrique temporel (l'effet directe de la piézoélectricité). La mesure de vibrations basée sur la déformation du matériau piézoélectrique dans ce type des accéléromètres, le couple électromécanique  $k$  et constante piézoélectrique  $d$  sont deux paramètres caractérisent ce matériau. Les principaux atouts de ces matériaux résident dans l'excellente propriété piézoélectriques un fort coefficient de couplage électromécanique ce qui entraîne une grande efficacité d'actionnement et une grande linéarité des propriétés.[33-34]

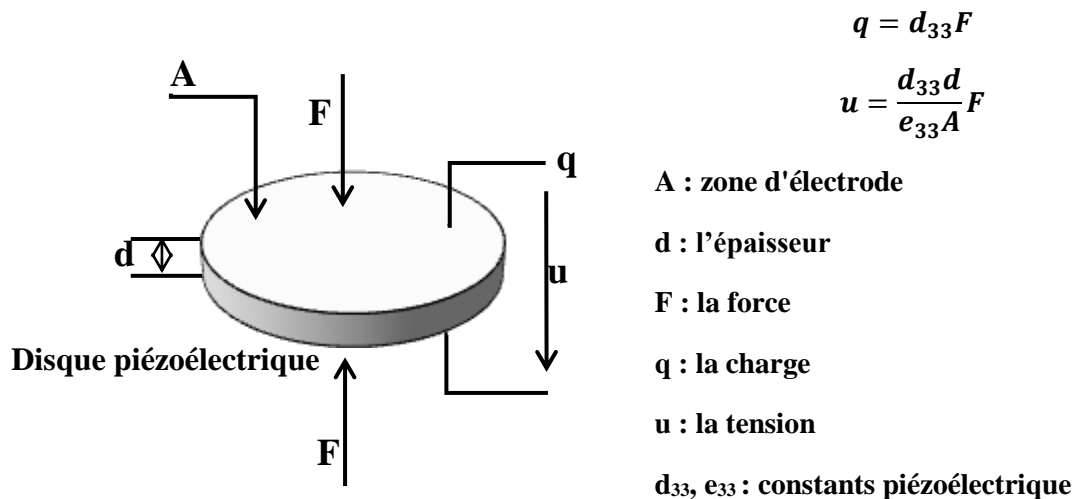
### III.2.1. Les avantages des capteurs piézoélectriques

Les accéléromètres piézoélectriques présentent des avantages importants sont les suivants:

- Plage dynamique extrêmement large, faible bruit de sortie.
- Excellente linéarité sur leur plage dynamique.
- Large plage de fréquences (les très hautes fréquences peuvent être mesurées).
- Très sensible.
- Pas de pièces mobiles.
- Auto-générateur (aucune alimentation externe requise).

### III.2.2. Principe de fonctionnement

Le matériau piézoélectrique est l'élément actif de l'accéléromètre. L'effet piézoélectrique à l'aide d'un disque de compression est montré par la figure III.1. Un disque de compression ressemble à un condensateur avec le matériau piézocéramique pris en sandwich entre deux électrodes. Une force appliquée perpendiculairement au disque provoque une production de charges et une tension aux électrodes. [35]



*Fig.III.1 Effet piézoélectrique, calculs de base*

L'élément sensible d'un accéléromètre piézoélectrique se compose de deux parties principales:

- Matériau piézoélectrique.
- Masse sismique.

Un côté du matériau piézoélectrique est connecté à un montant rigide à la base du capteur et la masse sismique est attachée à l'autre côté. Lorsque l'accéléromètre est soumis à des vibrations, une force est générée qui agit sur l'élément piézoélectrique (la figure III.2). Selon la loi de Newton, cette force est égale au produit de l'accélération et de la masse sismique. Par l'effet piézoélectrique, une charge de sortie proportionnelle à la force appliquée est engendrée. La masse sismique étant constante, alors; le signal de sortie de charge est proportionnel à l'accélération de la masse.[35]

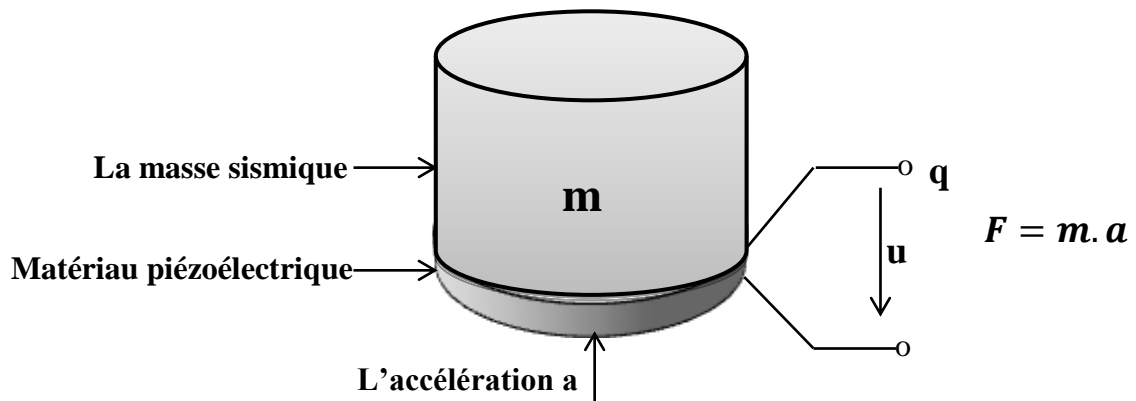


Fig.III.2. Principe d'un accéléromètre piézoélectrique

Sur une large gamme de fréquences, la base du capteur et la masse sismique ont la même amplitude d'accélération. Par conséquent, le capteur mesure l'accélération de l'objet à tester. L'élément piézoélectrique est connecté à la douille du capteur via une paire d'électrodes. Certains accéléromètres disposent d'un circuit électronique intégré qui convertit la sortie de charge à haute impédance en un signal de tension à basse impédance.

L'ensemble est sécurisé par une embase rigide, le tout étant contenu dans un boîtier hermétique (figure III.3).

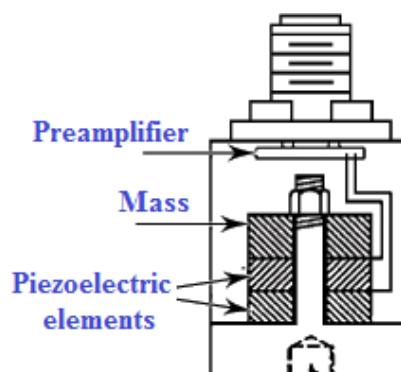


Fig.III.3. Structure de l'accéléromètre piézoélectrique

### III.3. Modèles d'accéléromètres

Pour les accéléromètres piézoélectriques, il existe trois principaux modèles de construction de l'élément PE: mode de compression, mode de cisaillement et mode de flexion ou de flexion.[13]

#### 1) Accéléromètres piézoélectriques à compression (Compression system "K" types)

Dans ce mode, entre une base et une masse inertielle, l'élément piézoélectrique est placé. Généralement, l'élément cristallin est précontraint à l'aide d'une vis de précontrainte qui est serré pour fixer la masse à celui-ci.

Ces accéléromètres caractérisés par une grande robustesse et rigidité par rapport aux autres conceptions (figure III.4). En conséquence, il présente des fréquences de résonance élevées, entraînant une bande de fréquence plus large. En outre, cette conception peut généralement résister à des niveaux élevés de vibrations transitoires (niveau de choc).[13][35]

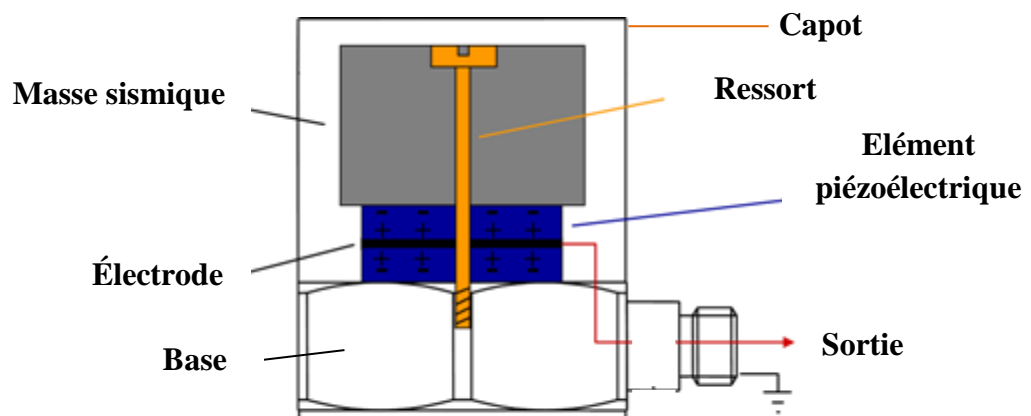
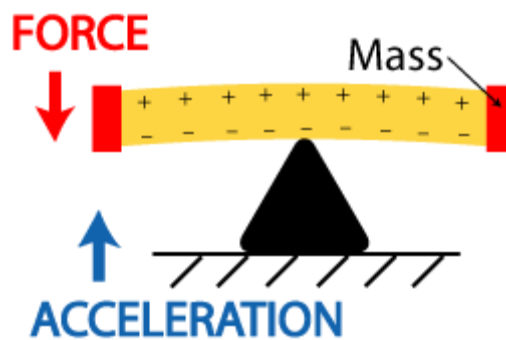


Fig.III.4. Accéléromètres piézoélectriques à compression

**2) Accéléromètres piézoélectriques à montage en porte-à-faux (Bending or flexure system “KB” types) :**

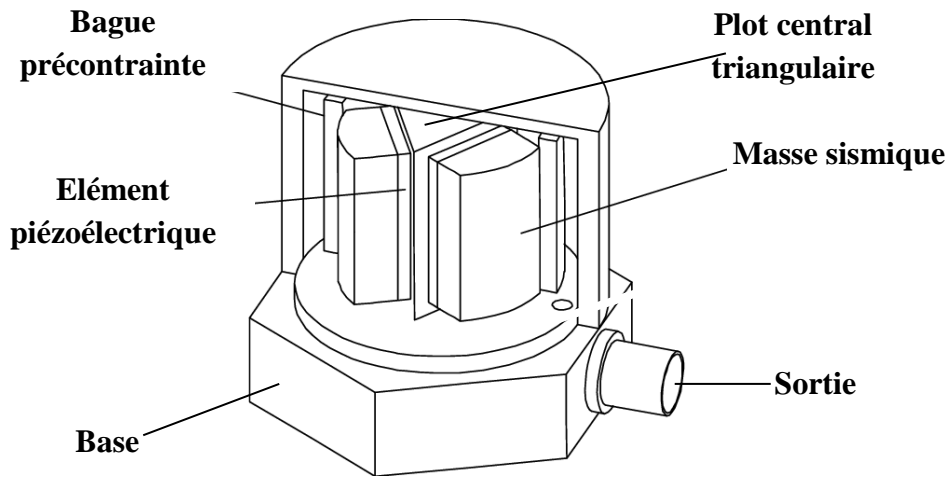
Les conceptions en flexion offrent la possibilité de générer des signaux de sortie exceptionnellement élevés car le cristal est soumis à des niveaux de contrainte élevés. Ces modèles utilisent des plaques de cristal rectangulaires ou en forme de disque. La flexion du cristal peut se produire en raison de la propre masse du cristal en opposition à l'accélération, ou pour améliorer la flexion, un poids supplémentaire peut être fixé ou lié au cristal. Les accéléromètres en mode flexion sont moins rigides que les modèles de compression ou de cisaillement, ce qui leur confère une plage de fréquences limitée.[35]



*Fig.III.5. Principe d'un accéléromètre piézoélectrique à montage en porte-à-faux*

**3) Accéléromètres piézoélectriques à cisaillement (Shear system “KS” types)**

Le quartz ou le matériau de synthèse est taillé en cône ‘male’ pour une partie et en cône ‘femelle’ pour l’autre, la masse sismique est un anneau de précontrainte qui vient serrer les deux parties ensemble (figure III.6). La mesure résultera du frottement sur les parties en cisaillement. La bande passante est importante et la précision excellente, la sensibilité est moindre que dans les deux autres configurations mais la précision importante.[13][35]



**Fig.III.6. Accéléromètre à cisaillement**

L'utilisation de différents systèmes piézoélectriques est à la raison de leur aptitude individuelle à diverses fins de mesure et leur sensibilité différente aux influences de l'environnement. Le tableau (III.1) montre les avantages et les inconvénients des trois modèles:

**Tableau III.1. Les avantages et les inconvénients des trois modèle d'accéléromètre piézoélectrique**

	<b>Accéléromètre à compression</b>	<b>Accéléromètre à cisaillement</b>	<b>Accéléromètre à montage en porte-à-faux</b>
<b>Les avantages</b>	-Rapport sensibilité / masse élevé -Robustesse -Avantages technologiques	-Sensibilité transitoire à basse température - Faible sensibilité à la déformation de base	- Meilleur rapport sensibilité / masse
<b>Les inconvénients</b>	-Sensibilité transitoire à haute température - Sensibilité élevée aux déformations de base	-Rapport sensibilité / masse plus faible	- Fragile Sensibilité transitoire de température relativement élevée

La conception de cisaillement est appliquée dans la majorité des accéléromètres modernes en raison de ses meilleures performances. Cependant, les capteurs de type compression et en porte-à-faux sont toujours utilisés dans de nombreuses applications.[35]

### III.4. Les caractéristiques métrologiques

#### ➤ La sensibilité

Un accéléromètre est tout simplement un transducteur qui convertit une accélération mécanique en un signal électrique proportionnel. La sensibilité de l'accéléromètre, parfois appelée le «facteur d'échelle», est le ratio du signal électrique de sortie de l'accéléromètre et l'entrée mécanique.

Elle exprime en termes de mV / g ou pC / g, elle n'est valable que pour une seule fréquence, la fréquence pour laquelle l'accéléromètre a été étalonné, de façon classique 100 Hz ou 120 Hz selon le lieu de fabrication. Comme la plupart des accéléromètres sont influencés dans une certaine mesure par la température, la sensibilité n'est aussi valable que sur une gamme étroite de température, généralement de  $25 \pm 5$  °C (température à laquelle l'accéléromètre a été étalonné). En outre, la sensibilité n'est également valable que pour une certaine accélération, généralement de 5 g ou 10 g selon le fabricant. La sensibilité est parfois spécifiée avec une tolérance, généralement  $\pm 5\%$  ou  $\pm 10\%$ . Ceci assure à l'utilisateur que la sensibilité de l'accéléromètre restera dans cet écart par rapport à la sensibilité nominale déclarée.[36]

L'expression suivante montre la sensibilité du capteur (accéléromètre):

$$S = \frac{Q}{\gamma} = S_1 \cdot S_2$$

$S_1$  : sensibilité mécanique du système à masse sismique

$S_2$  : sensibilité électrique du capteur piézoélectrique

$\gamma$  : accélération à laquelle est soumis le capteur,

$z$  : déplacement relatif de la masse sismique,

$Q$  :charge électrique résultante,

Avec :

$$S_1 = \frac{z}{\gamma} = \frac{1}{\omega_0^2 \sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right)^2 + \left(\frac{2\zeta\omega}{\omega_0}\right)^2}}$$

$$|S_2| = \left| \frac{Q}{z} \right| = d \cdot c \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_c}{\omega}\right)^2}}$$

d : constante piézoélectrique

c : raideur de l'élément sensible

$\omega_c = 1/\tau$  = pulsation de coupure basse de l'ensemble capteur + conditionneur

La sensibilité relative  $S/S_m$  définie par rapport à la valeur des fréquences moyennes par:

$$S_m = d \cdot c / \omega_0^2$$

Alors :

$$S = \frac{d \cdot c}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_c}{\omega}\right)^2}} \cdot \frac{1/\omega_0^2}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \left(2 \cdot \zeta \cdot \frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}}$$

L'intensité de la résonance est due à la très faible valeur du taux d'amortissement ( $\zeta \approx 0.01$  à  $0.02$ ).

Les limites pratiques de la bande passante, pour une erreur inférieure à  $[-5\% +5\%]$  sont:

Pulsation limite inférieure:  $\omega_1 \approx 5 \omega_c$

Pulsation limite supérieure :  $\omega_2 \approx 0.2 \omega_0$

Lorsque des signaux indésirables essayent d'apparaître par excitation de l'accéléromètre près de sa résonance, ils sont supprimés par filtrage soit mécanique (suspension spéciale) soit électrique, au cours de l'amplification.[36]

### ➤ La sensibilité transversale

C'est dans l'axe de mesure que par construction la sensibilité du capteur est la plus grande, mais il subsiste toujours une sensibilité résiduelle transversale qui a pour principale origine l'imperfection de l'alignement entre l'axe de sensibilité maximale et l'axe de montage, seul utilisé pour l'étalonnage du capteur. [36]

### ➤ La réponse en fréquence

Le matériau piézoélectrique lorsqu'il subit des déformations il engendre une charge électrique qui sera accumulée sur les surfaces de ces électrodes, cette charge peut être facilement dissipée à cause de plusieurs facteurs, mais principalement à cause de l'impédance d'entrée des dispositifs électroniques connectés, ce qui entraîne une perte d'information avant qu'on puisse la récupérer totalement, par conséquent un accéléromètre ne présente aucun intérêt pour les forces statique, en effet il se comporte en fréquence comme un filtre passe-haut (figure III.7).

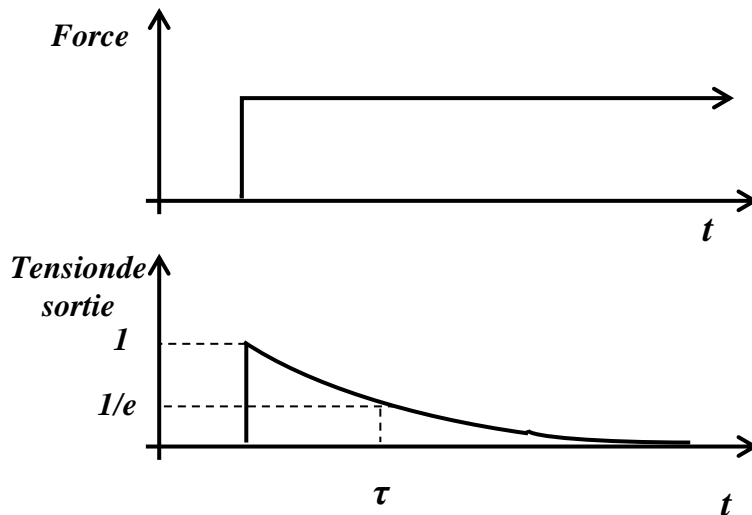


Figure.III.7. Réponse à une force statique

La bande de fréquence utile, la réponse d'un accéléromètre doit être proportionnelle à l'accélération, cela n'est vrai que si le capteur fonctionne dans la bande de fréquence utile, c'est la bande de fréquence pour laquelle le rapport sortie/entrée est constant (réponse linéaire) (figure III.8). [35-36]

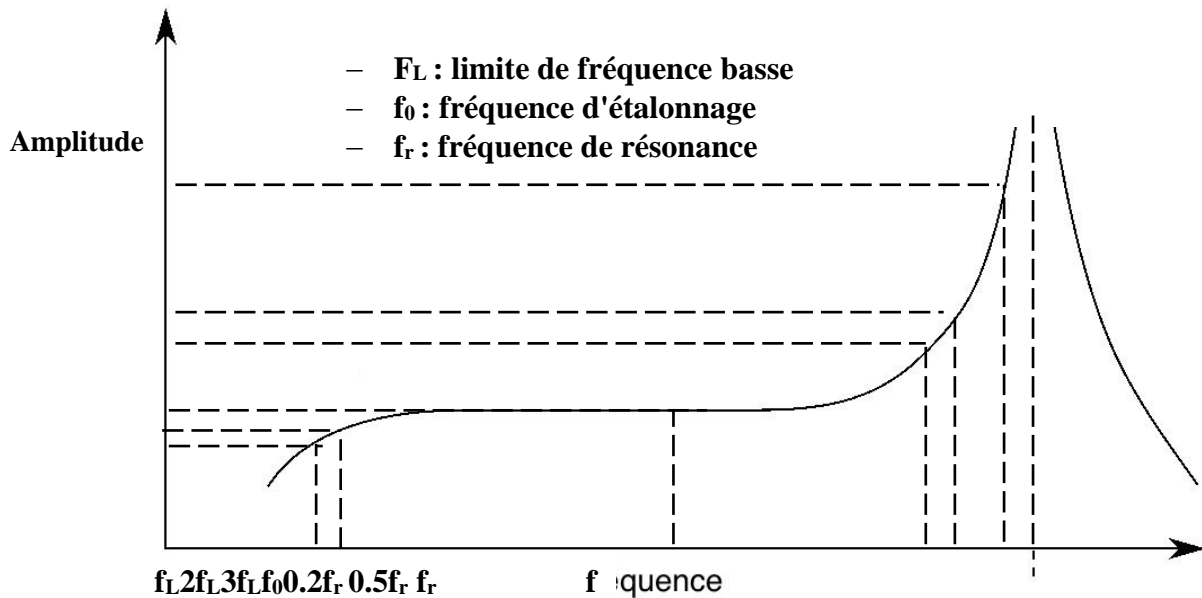


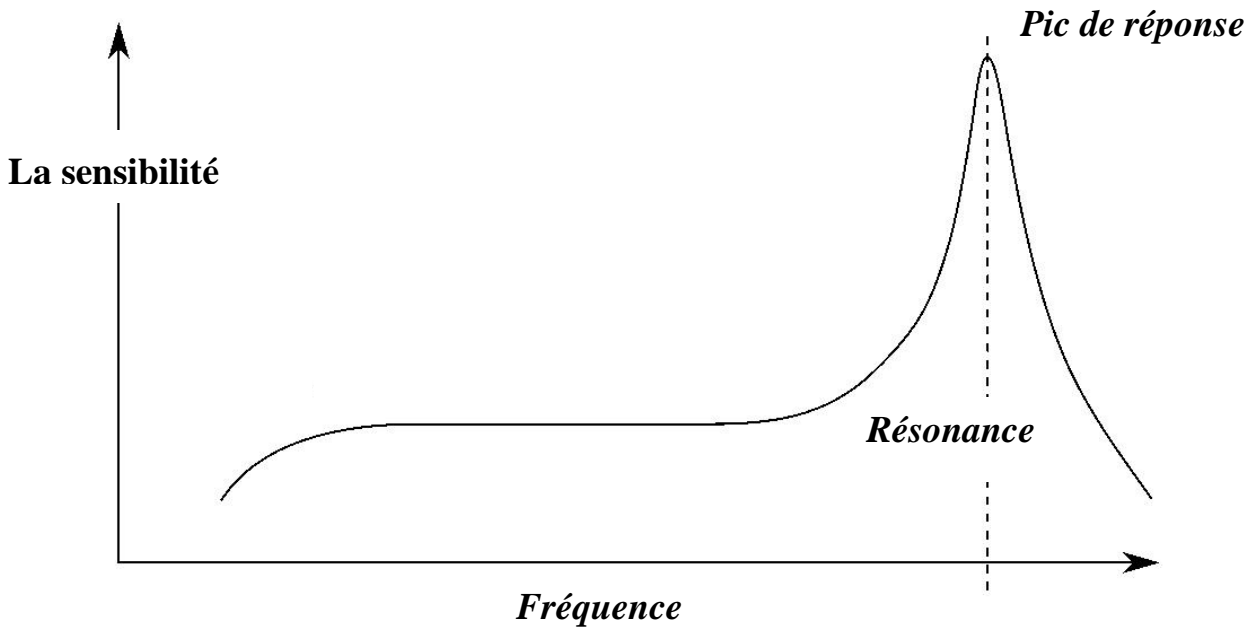
Fig.III.8. Réponse en fréquence

On dit l'accéléromètre présente le phénomène de résonance, lorsque les valeurs de fréquence sont élevées.

### ➤ Fréquence de résonance

La fréquence de résonance de l'accéléromètre monté est la fréquence à laquelle sa sensibilité est maximale, elle est exprimée en hertz (Hz). Généralement, les accéléromètres présentent une fréquence de résonance supérieure à 20kHz allant quelquefois jusqu'à 90 kHz selon la construction interne utilisée. La fréquence de résonance de l'accéléromètre « non monté » en espace libre serait plus élevée mais n'est pas utilisable pour les applications de mesure. C'est la raison pour laquelle la fréquence de résonance est spécifiée « accéléromètre monté ».

Concevoir et produire un accéléromètre ayant une fréquence de résonance montée avec une certaine tolérance n'est pas un but des fabricants. Au lieu de cela, ils préfèrent spécifier une fréquence de résonance inférieure, assurant à l'utilisateur que le point de résonance ne se produira au-dessous du minimum. La fréquence de résonance est un « facteur de mérite » qui fixe la limite supérieure de la bande de fréquence de l'accéléromètre (figure III.9). [35-36]



**Fig.III.9. Pic de réponse fréquentielle à la fréquence de résonance**

Pour les accéléromètres piézo-électriques, dont la structure mécanique est presque entièrement non amortie, l'amplitude du pic de résonance peut être très élevée, ce qui entraîne une sensibilité beaucoup plus élevée que la sensibilité de référence spécifiée.

En tant que tel, toute vibration à ou près de la fréquence du pic de résonance sera fortement amplifiée, ce qui entraîne des mesures déformées et des données corrompues. Un objectif de conception des fabricants, alors, est d'avoir le point de fréquence de résonance « capteur monté » aussi haut que possible avec l'intention que ce point soit bien au-delà de toutes les fréquences de vibration de l'application. L'utilisateur doit également veiller à ce qu'aucune des composantes de fréquence de vibration soient, à ou près du point de fréquence de résonance du capteur monté. [35-36]

Notez que la fréquence de résonance capteur monté est spécifiée en supposant des conditions idéales de montage de l'accéléromètre. Tout comme le fabricant peut influencer sur le point de fréquence de résonance capteur monté selon l'accéléromètre utilisé, la structure mécanique elle-même, peut aussi apporter des facteurs structurels externes devant être sous le contrôle de l'utilisateur. Les caractéristiques de la fréquence de résonance mécanique dépendent de l'élasticité des matériaux et de l'amortissement.

Une fixation de l'accéléromètre insuffisamment rigide augmentera l'amortissement, ce qui se traduira par l'apparition d'un pic de résonance à une fréquence inférieure à celle de la résonance initiale. [35-36]

La fixation de l'accéléromètre est un point critique pouvant dégrader la réponse en fréquence et la qualité de la mesure.

### ➤ **Accélération maximale**

En général, les limites suivantes sont spécifiées:

- ✓  $\hat{a}_+$  accélération maximale pour une direction de sortie positive
- ✓  $\hat{a}_-$  accélération maximale pour la direction de sortie négative
- ✓  $\hat{a}_q$  accélération maximale pour la direction transversale (uniquement pour les accéléromètres à choc)

L'accélération maximale est donnée pour des fréquences comprises dans la plage de fréquences de fonctionnement et à température ambiante. Pour des températures plus élevées, il peut être plus bas. [35]

Pour les accéléromètres à sortie de charge, ces limites sont déterminées uniquement par le constructeur. Si l'une de ces limites est dépassée accidentellement, par exemple en faisant tomber le capteur au sol, le capteur généralement reste fonctionnel.

Cependant, dans ce cas, la recommandation est de recalibrer l'accéléromètre après de tels incidents. Les vibrations continues ne doivent pas dépasser 25% des limites indiquées pour éviter l'usure. Lorsqu'une précision maximale est requise, l'accélération ne doit pas dépasser 10% de la limite. Les transducteurs à accélération maximale extrêmement élevée sont appelés accéléromètres à choc.

Si l'accéléromètre est équipé d'une électronique IEPE intégrée, les limites  $\hat{a}_+$  et  $\hat{a}_-$  sont généralement déterminées par la plage de tension de sortie de l'amplificateur.

### ➤ **Linéarité**

La spécification de la linéarité d'amplitude effectuée par plusieurs façons dont la plus limitative est de la préciser en pourcentage de la lecture, typiquement de  $\pm 1\%$ , pour toute lecture à l'intérieur de l'étendue de mesure pleine échelle du capteur. Cette façon est de tolérance étroite, car la variation de la sensibilité de l'accéléromètre ne dépasse pas de  $\pm 1\%$  à n'importe quel point dans la plage d'étendue de mesure.

Une façon beaucoup moins restrictive et plus pratiquée, est de spécifier la linéarité par « paliers », par exemple: la sensibilité augmente de 1% par 500 g, de 0 à 2000 g. Cela signifie qu'à l'extrémité supérieure de la plage d'amplitude, la sensibilité peut varier de 4% par rapport à celle de l'extrémité inférieure de la même plage d'amplitude. [35-36]

### III.5. Les grandeurs d'influence

#### 1. La température

##### ➤ Plage de température de fonctionnement :

La température de fonctionnement maximale d'un transducteur de charge est limitée par le matériau piézoélectrique. Au-dessus d'une température spécifiée, le point dit de Curie, l'élément piézoélectrique commencera à se dépolariser, provoquant une perte permanente de sensibilité. La température de fonctionnement maximale spécifiée est la limite à laquelle le changement permanent de sensibilité dépasse 3%. D'autres composants peuvent également limiter la température de fonctionnement, par exemple les adhésifs, les résines ou l'électronique intégrée. Les plages de températures typiques sont de -40 à 250 ° C et de -10 à 80 ° C. Les accéléromètres avec électronique intégrée ne conviennent généralement pas aux températures supérieures à 120 ° C. [13][35]

##### ➤ Coefficients de température :

Outre les changements permanents, certaines caractéristiques varient sur la plage de températures de fonctionnement. Les coefficients de température sont spécifiés pour la sensibilité à la charge (TK (Bqa)) et la capacité interne (TK (Ci)). Pour les capteurs avec électronique intégrée, seul le coefficient de température de sensibilité à la tension TK (Bua) est indiqué.

Certains transducteurs ont une courbe température / sensibilité non linéaire (figure III.10). Dans ce cas, le coefficient de température peut être indiqué pour plusieurs intervalles de température. [13][35]

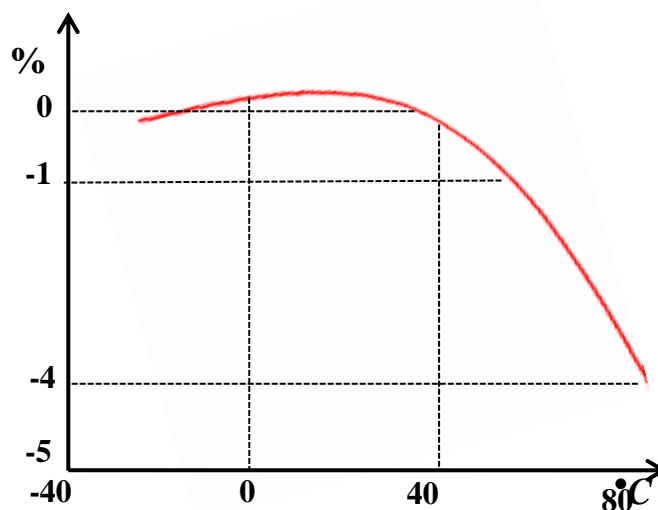


Fig.III.10. Exemple de courbe de température / sensibilité non linéaire

### ➤ **Transitoires de température**

Les accéléromètres présentent une sortie variant lentement lorsqu'ils sont soumis à des transitoires de température, provoqués par ce que l'on appelle l'effet pyroélectrique. Ceci est spécifié par la sensibilité aux transitoires de température. Les transitoires de température produisent des fréquences inférieures à 10 Hz. Lorsque des mesures à basse fréquence sont effectuées, cet effet doit être pris en compte. Pour éviter ce problème, les accéléromètres à cisaillement doivent être choisis pour les mesures à basse fréquence. En pratique, ils sont environ 100 fois moins sensibles aux transitoires de température que les accéléromètres à compression. [13][35]

### **2. Sensibilité de déformation de base**

Lorsqu'un accéléromètre est monté sur une structure soumise à des variations de déformation, une sortie indésirable peut être générée à la suite d'une déformation transmise au matériau piézoélectrique. Cet effet peut être décrit comme la sensibilité à la déformation de base bas. Les valeurs indiquées sont mesurées au moyen d'un faisceau de flexion oscillant à 8 ou 15 Hz. La sortie de déformation de base se produit principalement à des fréquences inférieures à 500 Hz. Les accéléromètres de type cisaillement ont une sensibilité à la déformation de base extrêmement faible et doivent être choisis pour les applications à contrainte critique. [13][35]

### **3. Champs magnétiques**

De forts champs magnétiques se produisent souvent autour des machines électriques et des convertisseurs de fréquence. La sensibilité au champ magnétique a été mesurée à  $B = 0,01$  T et 50 Hz pour certains accéléromètres. Il est très faible et peut être ignoré dans des conditions normales.

Généralement, les accéléromètres avec boîtier en acier inoxydable offrent une meilleure protection contre les champs magnétiques que les accéléromètres avec boîtier en aluminium.

La prise de signal parasite peut être évitée par une bonne protection du câble. Ceci est particulièrement important pour les capteurs avec sortie de charge.

Une isolation adéquate doit être prévue contre les boucles de terre. Ils peuvent se produire lorsqu'un système de mesure est mis à la terre en plusieurs points, en particulier lorsque la distance entre ces points de mise à la terre est longue. Les boucles de masse peuvent être évitées en utilisant des accéléromètres avec des bases isolées. [13]

### **4. Le bruit acoustique**

Si un accéléromètre est exposé à un niveau de bruit très élevé, une déformation du boîtier du capteur peut se produire et peut être mesurée en sortie. La sensibilité au bruit acoustique ne doit pas être confondue avec la réponse du capteur au mouvement induit par la pression de la structure sur laquelle il est monté. [13]

### **5. La capacité intérieure**

La capacité intérieure est indiquée dans la feuille d'étalonnage individuelle uniquement pour les accéléromètres avec sortie de charge. Cela peut être pertinent si le transducteur est utilisé avec un amplificateur de tension à haute impédance. La valeur indiquée comprend la capacité du câble du capteur utilisé pour l'étalonnage. Cette capacité du câble est indiquée séparément sur la feuille d'étalonnage. Sa valeur doit être déduite de la capacité du capteur pour obtenir la capacité intérieure réelle.

### **6. Le décalage de zéro**

Pour les accéléromètres à céramiques, le décalage de zéro est un phénomène propre. Si un capteur est soumis à une accélération très violente (choc), un petit signal électrique (décalage de zéro) reste après la disparition du mesurande. On explique le phénomène par une certaine dépolarisation de la céramique à la suite d'une excitation de l'accéléromètre sur sa fréquence de résonance, où l'amplification est considérable, à cause par exemple d'un échelon abrupt, même si la valeur de celui-ci reste dans les limites de l'étendue de mesure.

Quand l'accéléromètre est soumis à des chocs répétés, le décalage de zéro est parfois minimisé, mais seulement de façon temporaire. Le décalage de zéro ne doit pas dépasser 1 à 2 % de l'amplitude crête. [13]

## **III.6. La conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons vu que les accéléromètres piézoélectriques sont les plus utilisés dans les secteurs industriels car ces avantages par rapport les autres types des accéléromètres tels que la grande gamme fréquentielle, la bonne bande passante, la taille réduite, et la bonne robustesse. On a aussi étudié en détail les accéléromètres piézoélectriques surtout les différents types de ce capteur, ses caractéristiques et ses grandeurs d'influences. Dans le chapitre suivant, un modèle mathématique de l'accéléromètre piézoélectrique sera développé et validé par simulation.

# **Chapitre IV**

# **Conclusion générale**

## La conclusion générale

L'analyse des vibrations est la technique la plus diversifiée et celle qui permet, sur les machines tournantes, d'aller le plus loin dans le diagnostic. Toute machine en fonctionnement engendrée un degré de vibration enfanté par ses mouvements rotatifs ou linéaires.

L'évaluation du niveau de vibration est faite par l'utilisation d'une chaîne de mesure contenant plusieurs éléments dont le premier est l'accéléromètre. Dans notre travail, on a choisi l'accéléromètre piézoélectrique grâce à leurs avantages par rapport aux autres types, un accéléromètre piézoélectrique recueille des mouvements vibratoires (charges ou forces mécaniques) et l'effet direct de leur matériau piézoélectrique permet de convertir ces mouvements en un signal électrique temporel, le reste de la chaîne de mesure (amplificateur et analyseur FFT) transforme ce signal en signal électrique fréquentiel. Le but de la conversion du signal du domaine temporel au domaine fréquentiel est d'identifier les paramètres du signal.

La modélisation du comportement physique de l'accéléromètre piézoélectrique permet d'extraire un modèle mathématique relie leurs paramètres et leurs caractéristiques.

Le modèle développé de la partie mécanique montre deux formules importantes d'où la première est l'expression du mouvement relative en fonction du taux d'amortissement, la fréquence naturelle de l'accéléromètre et la fréquence relative du mouvement et la deuxième formule exprime l'erreur de mesure en fonction des paramètres de l'accéléromètre, par contre la nouvelle formule de la sensibilité relative relie les paramètres électriques et mécaniques de l'accéléromètre. Le modèle développé est validé par des tests de simulation et les résultats obtenus montrent que le choix du taux d'amortissement qui égal à 0.68 minimise l'erreur de mesure à une valeur réduite égale à 0.28%, augmente la précision à une valeur égale à 99.72% et une variation de la sensibilité relative ne dépasse pas une valeur égale à 0.62%.

Les analyseurs de vibration ont pour but de donner l'information fréquentielle des signaux vibratoires, dans notre thèse, nous avons étudié les différentes opérations de traitement de signal telles que la génération des signaux, décomposition des signaux, calcul du spectre de signal, pondération des signaux.

Dans les travaux futurs, il est aussi important de choisir le matériau piézoélectrique approprié à l'accéléromètre pour améliorer la détection piézoélectrique et déterminer le niveau de vibration avec une grande précision.

## Les références

- [1] S.Elfezazi et al. Vers un outil, basé sur l'analyse fonctionnelle, pour la mise en oeuvre des indicateurs de mesure de performance de la fonction maintenance. Revue française de gestion industrielle. Vol.22, N°3/2003.
- [2] L.Gelders et al, la gestion des pièces de rechange et la sous-traitance : quelques directives pratiques, Revue Française de gestion industrielle, Vol.22, N°3. 2017
- [3] A.Orantes Molina, Méthodologie pour le placement des capteurs à base de méthodes de classification en vue du diagnostic, Doctorat de l'institut national des sciences appliquées de Toulouse, 2005.
- [4] F.Bogard, K.Debray, Y.Q.Guo, A.Pavan, Numerical methodology to easily detect defects in revolving machines by vibration analysis, ELSEVIER, Mécanique & industries 3(2002)79-87.
- [5] S-P. Dong, Jun Yang and X-W. Fan "Signal optimization of the AE piezoelectric sensor" 2017 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications (SPAWDA), 27-30 Oct. 2017, Chengdu, China.
- [6] I. Mahbub et al "A Low-Power Wireless Piezoelectric Sensor-Based Respiration Monitoring System Realized in CMOS Process" IEEE Sensors Journal, Vol.17, No.6, 2017
- [7] P.I Gutiérrez « Vibration Analysis Techniques included in the Predictive Maintenance Plan of a Paper Machine», E.T.S, univ publica de Navarra, juin 2019.
- [8] FDX60-000 normalisation français, mai 2002.
- [9] Djamel HALIMI «Contribution à l'amélioration de la maintenance préventive des machines dynamiques dans l'industrie des hydrocarbures» Thèse de Doctorat Génie Mécanique, Université m'hamed bougara-boumerdes, 2014.
- [10] Moubray J Reliability Centered Maintenance, RCM, edition 2000.
- [11]C. Sheffer and P. Girdhar, "Predictive maintenance techniques," in *Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance*, 2008,
- [12] ProTech, "Advantages and Disadvantages of Preventive Maintenance," [Online]. Available: <http://www.protechpropertyolutions.co.uk/advantages-and-disadvantages-of-preventative-maintenance/>.
- [13] Ghomari zine «Modélisation, simulation et analyse expérimentale du capteur de vibration (accéléromètre)» Thèse de Doctorat en Genie Mécanique, Université badji mokhtar – annaba, 2013
- [14] Infraspak, "What Are the Advantages and Disadvantages of Corrective Maintenance?," [Online]. Available: <http://blog.infraspak.com/advantages-and-disadvantages-corrective-maintenance/>.
- [15] Ilyes KHELFI "Diagnostic des machines tournantes par les techniques de l'intelligence artificielle" Thèse de Doctorat en Electromécanique, Université badji mokhtar – annaba, 2014

- [16] brevets de technicien supérieur «Maintenance industrielle chapitre 24 analyse vibratoire » session 2010, source : ministère de l'Éducation nationale.
- [17] Landolsi Foued. Cours de techniques de surveillance « Etude des principaux défauts ».
- [18] T. Bensana, “ Diagnostic des défaillances base sur l' analyse vibratoire d' une turbine a vapeur.” , These de Magister, Universite Badji Mokhtar -Annaba, Algérie, 2008.
- [19] H. Cherif, “ Détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone en utilisant l' analyse par FFT et ondelettes” , These de Magister, Mohamed Khider - Biskra, Algérie, 2014.
- [20] AllianTech, Généralités sur les accéléromètres, 2010
- [21] CLAUDE PICHOT « Surveillance des machines par analyse des vibrations » version Dunod (2009).
- [22] Vibration Handbook, Productive maintenance technology, PRUFTECHNIK, Germany.
- [23] CURIE .P, CURIE .J, Développement par compression de l'électricité polaire dans les cristaux hémicèdre à face inclinées.C.R .Acad.Sci.Paris, 1880, Tome 91, p 294.
- [24] R.G. Ballas, Piezoelectric Multilayer Beam Bending Actuators, Static and Dynamic Behavior and Aspects of Sensor Integration, November, 2006
- [25] A.BENAYAD, Matériaux monocristallins à forte activité piézoélectrique : élaboration, caractérisation et application. Thèse doctorat : L'institut National des Sciences Appliquées de Lyon ,2005
- [26] A.HAJJAJI, Caractérisation multi échelle et lois de comportement dans les matériaux ferroélectriques. Thèse de doctorat : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2007.
- [27] Diouma KOBOR, « synthèse dopage et caractérisation de monocristaux ferroélectrique type PZN-PT par la méthode du flux», thèse doctorat en génie électrique, l'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2005
- [28] Jan Tichý, Jiří Erhart, Erwin Kittinger ,Jana Přívratká, Fundamentals of Piezoelectric Sensorics, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010
- [29] H.Thurnauer, J. Daederick .J .U.S.Patent 2, 429, 588.1941.
- [30] B.Jaffe, R.S.Roth, S.Marzullo. Piezoelectric properties of lead zirconate-lead titanate solid-solution ceramic ware .J.Appl.Phys., vol. n 25, p.809, 1954.
- [31] MITSUI, T.Lanbolt-Bornstein : Numerical data and Functionnal relationship in science and thechnology .Berlin : Spinger Verlag, 1969. Vol 3, ferro and antiferro-électric substances, p.308.

- [32] ERIC BOUCHER .Elaboration et caractérisation des céramiques PZT Bi-Substituée et modélisation non- linéaire de leur comportement en contrainte et en champ électrique .Thèse doctorat .13 Décembre 2002.
- [33] S.K Reguieg , Z. Ghemari, T. Benslimane, S. Saad« Modeling and Enhancement of Piezoelectric Accelerometer Relative Sensitivity», Sensing and Imaging journal, Springer Science+Business Media, LLC, part of Springer Nature 2018.
- [34]Noheda, B., Gonzalo, J. A., Cross, L. E., Guo, R., Park, S.-E., Cox, D. E., Shirane, G. (2000). Tetragonal-to-monoclinic phase transition in a ferroelectric perovskite: The structure of  $\text{PbZr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48}\text{O}_3$ . *Physical Review B*, 61(13), 1–18.
- [35] Manfred Weber, *Piezoelectric Accelerometers Theory and Application*, Metra Mess- und Frequenztechnik in Radebeul e.K.2012
- [39] G.Asch et al « les capteurs en instrumentation industrielle» 7<sup>ème</sup> édition, Dunod, 2010.
- [37] Ghemari. Z and Saad. S “Modeling and enhancement of mechanical sensitivity of vibration sensor,” *J. Vibration Control*, June 2013, to be published.
- [39] Peng LI. « Formalisme pour la Supervision des Systèmes Hybrides Multi-Sources de Générateurs d’Energie Répartie : Application à la Gestion d’un Micro Réseau » Thèse de doctorat, Soutenue le 19 juin 2009, Ecole Centrale de Lille, France.
- [40] Amel ZENATI. « Modélisation et simulation de microsystèmes multi domaines à signaux mixtes : vers le prototypage virtuel d’un microsysteme autonome » Thèse de doctorat, Soutenue Le 26/10/2007, Université Joseph Fourier Grenoble I, France.
- [41] Mamadou Lamine Doumbia « outil d'aide à la conception des systèmes d'entraînement de machines électriques : exemple d'application » Thèse de doctorat, Génie électrique, Mai 2000, Université de Montréal, Canada.
- [42] Ghemari. Z and Saad. S “Development of measurement precision of sensor vibration,” *J. Vibration Control*, Vol.19, No.10, pp. 1480- 1486, 2013.
- [43] Ghemari. Z and Saad. S “Development of model and enhancement of measurement precision of sensor vibration” *IEEE sensors journal*, Vol. 12, No. 12, pp 3454-3459, 2012.
- [44] Ghomari zine Modélisation Et Simulation D’un Capteur De Vibration (Accéléromètre)» Thèse de Magister en Electromécanique, Université badji mokhtar – annaba, 2006
- [45] S.K Reguieg , Z. Ghemari, T. Benslimane, «Extraction of the relative sensitivity model and improvement of the piezoelectric accelerometer performances», *International Conference on Signal, Image, Vision and their Applications (SIVA'18)*, November 26-27, 2018, Guelma, Algeria.
- [46]Nezih C. Geckinli, “Some Novel Windows and a Concise Tutorial Comparison of Window Families”, *IEEE Transaction on Acoustics, Speech and Signal Processing*, vol ASSP-26, NO 6, december 1978.

## Chapitre IV

# Optimisation des performances de l'accéléromètre piézoélectrique

### IV.1 Introduction

En réalité, l'analyse des vibrations est la technique la plus efficace de maintenance préventive conditionnelle et est largement utilisée dans l'industrie par rapport à d'autres techniques. Cette analyse est basée sur une configuration avec un capteur de vibration (accéléromètre) comme élément principal.

Généralement, les accéléromètres sont placés sur les systèmes électromécaniques pour convertir la contrainte mécanique ou les forces mécaniques (mouvements vibratoires) en un signal électrique temporel. La chaîne de mesure suivante transformera ce signal en un signal électrique de fréquence pour faciliter la mesure du niveau de vibration et donner la réponse en fréquence pour évaluer la santé du système.

La modélisation de l'accéléromètre piézoélectrique nous permettra de connaître son comportement physique et de convertir son principe de fonctionnement en équations mathématiques. Le modèle obtenu facilitera les tests de simulation et améliorera également les paramètres de l'accéléromètre, ainsi une nouvelle conception d'accéléromètre peut être proposée.[37]

### IV.2. La modélisation et son objectif

#### IV.2.1. Le modèle

L'utilisation de la modélisation pour comprendre un phénomène physique et validé la théorie développée. Dans notre travail le modèle de l'accéléromètre a été développé et mis en œuvre. L'objectif principale du modèle est de remplacer l'objet physique coûteux et peut être utilisé comme outil de simulation ou de conception. Le but de la modélisation consiste à prédéterminer et à étudier le comportement de l'objet aux différentes sollicitations.

Il existe plusieurs objectifs de modèles [13][39] dont les plus importants sont :

#### ➤ **Modèles de connaissance**

Les modèles de connaissance ont pour objectif de donner l'évolution temporelle des grandeurs physiques du processus. Un modèle de connaissance est un modèle dont les caractéristiques et les

équations ont été établies en faisant appel à des modèles plus généraux mettant en œuvre les lois de la physique, de la chimie, de l'économie, ... Les paramètres d'un tel modèle ont alors une interprétation physique directe : tension, courant, température, force, accélération... Ils sont beaucoup plus riches de signification que les modèles de représentation définis ci-dessous et contiennent toutes les informations utiles sur le processus étudié. Par contre, ils sont en général difficiles à déterminer et de mise en œuvre complexe.

➤ **Modèles de représentation**

Ces modèles ne permettent pas, le plus souvent, d'interprétation physique des phénomènes étudiés. Ils sont constitués d'un ensemble de relations mathématiques qui vont relier dans un domaine d'évolution donné, les différentes variables du processus généralement mesurables. Les paramètres de tels modèles peuvent n'avoir aucun sens physique particulier connu.

➤ **Modèles pour l'optimisation**

Le modèle pour l'optimisation systémique doit permettre de déterminer la configuration optimale du système par une approche de conception. Par exemple, il utilise les performances souhaitées d'un véhicule afin de déterminer les composants, non pas pour un seul point de fonctionnement, mais pour un cycle entier de points de fonctionnement. De plus, il impose pour chaque composant sa mission et la meilleure adaptation à cette mission.

➤ **Modèles pour la conception de la commande**

Les modèles pour la conception de la commande sont appliqués à des systèmes complexes ayant des possibilités de réglage. Par exemple pour une centrale photovoltaïque, en introduisant des convertisseurs de l'électronique de puissance, toutes les grandeurs physiques du système deviennent influencées par les fonctions de conversion ou les rapports cycliques des convertisseurs [PAN-04]. Un modèle adapté pour concevoir la bonne commande par le réglage de ces fonctions de conversion est alors nécessaire. Pour notre étude, nous avons besoin de modèles pour la conception de la commande et de la supervision locale des générateurs comprenant des convertisseurs statiques. Ceux-ci introduisent des possibilités de réglage au sein des générateurs. Une conception de la commande est donc nécessaire pour calculer ces grandeurs de réglage afin d'obtenir un fonctionnement optimisé et interfacé avec la supervision centrale du micro-réseau.

## **IV.2.2. Les différents types de modèles**

Pour arriver les objectifs de la modélisation, il existe plusieurs types de modèles [13][39].

### **IV.2.2.1. Le modèle mathématique**

Dans ce modèle, les entrées et les sorties de la chaîne sont reliées par un ensemble de lois mathématiques. Cet ensemble probablement composé d'équations algébriques, différentielles et des

relations récursives. A ces relations de type égalité, peuvent additionner des relations de type inégalité ou inclusion, permettent de prendre en compte de contraintes ou d'éventuelles saturations.

#### **IV.2.2.2. Le modèle d'état**

Le modèle d'état, il est défini par un ensemble de variables, en nombre minimum, rassemblées dans un vecteur  $\mathbf{x}$  de  $\mathbf{IR}^n$  appelé vecteur d'état, dont la connaissance à l'instant  $\mathbf{t}_0 \in \mathbf{IR}^n$  collaborée à la connaissance de transformation des entrées  $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^l$  sur un intervalle  $\mathbf{T} = [\mathbf{t}_0, \boldsymbol{\tau}]$  accepte à partir du modèle, de fournir la transformation de  $\mathbf{x}(\mathbf{t})$  sur  $\mathbf{T}$ .

#### **III.3.2.3. Le modèle de donnée (Fichier)**

Les modèles de données composés d'informations, sous forme de tableaux de données, assemblant la transformation des sorties du procédé à la transformation des entrées pour différentes catégories d'entrées. Ces modèles composent le plus souvent le point de démarrage en vue de la réalisation des modèles plus développés.

#### **IV.2.2.4. Le modèle à base de règle (linguistique)**

Les modèles linguistique coïncident avec une description par règles de conduite, comme par exemple 'si on actionne A deux fois, B avance' et sont issus de l'observation du système en marche. Fréquemment lourds à traiter et limités du point de vue des possibilités, ils conviennent assez bien à une exploitation mettant en œuvre les procédés de l'intelligence artificielle et la logique floue.

#### **IV.2.2.5. Le modèle graphique**

La structuration des modèles graphiques par une manière de figuration en général assez aisé à manipuler de part la sollicitation simultanée des cerveaux droit et gauche et de l'utilisation des caractéristiques notables susceptibles de servir à la modélisation. On utilise fréquemment des indices graphiques, pour afficher ces caractéristiques.

#### **IV.2.3. Les deux techniques de la modélisation**

En général on a deux techniques de la modélisation soit analytique (modèle de connaissance) faisant ingérer des relations de la physique, soit empirique (modèle de comportement) basé sur l'idée de la "boîte noire" issu de la systémique.

#### **IV.2.4. Les méthodes de la modélisation**

Il existe plusieurs méthodes de la modélisation [13][40] dont les plus importants sont résumés ci-dessous.

##### **IV.2.4.1. La méthode de modélisation au niveau du système**

Le modèle du système peut être considéré comme un espace, où un certain nombre de fonctions et de rapports logiques satisfaites. Dans cet espace, il faut assurer un fonctionnement et des liaisons exactes entre les modèles des sous-systèmes qui dessinent le comportement total du microsystème.

#### **IV.2.4.2. La méthode de modélisation comportementale**

Dans ce type de modèle, les interactions entre les éléments des différents secteurs sont prises en considération, ainsi que le milieu de conception par l'utilisation de la méthodologie de modélisation comportementale. La performance de cette modélisation dépend de la méthode de simulation et des signaux de caractérisation choisis. Il existe deux approches de modélisation et de simulation au niveau comportemental, la première approche est la modélisation fonctionnelle et la deuxième est la méthode par circuit équivalent.

##### **A. Modélisation fonctionnelle**

La modélisation fonctionnelle est une méthode alternative convenable à la modélisation des systèmes hybrides. Elle donne profit des degrés d'abstraction possibles et des langages offerts dans le cadre de la simulation à signaux mixtes. Il est toutefois essentiel d'indiquer les limitations de cette méthode.

##### **✓ Modélisation basée sur le graphe**

Dans la modélisation on utilise les graphes pour dessiner les systèmes reliés dans plusieurs domaines. Pour cette méthode, il existe trois types de modélisation des systèmes [13][40]: les graphes, les graphes de liaisons (bond-graph) et les diagrammes blocs.

##### **✓ Modélisation par graphe de liaison**

La modélisation par le graphe de liaison (bond-graph) est située entre le système physique et les modèles mathématiques classiques. La technique de modélisation par graphe de liaison est basée sur la description des phénomènes de transformation de puissance (par un lien) au sein du système.

##### **✓ Modélisation par diagramme bloc**

L'utilisation des diagrammes blocs produit des modèles comportant des fonctions primitives décrivant les rapports entre les entrées et les sorties (Simulink, SPW...).

##### **B. Modélisation comportementale basée sur le circuit électrique équivalent**

La méthode de modélisation comportementale est basée sur les modèles définis sous forme de circuits électriques équivalents. Ces circuits équivalents montrent les sous-systèmes dans d'autres domaines d'énergie.

##### **✓ Principe de la modélisation électrique**

Grâce aux équations différentielles, on peut décrire le fonctionnement d'une machines ou un composant, dont la forme dépend de la nature physique de son activité. Cependant, on utilise les modèles mathématiques pour les systèmes non électriques, pour la production des égalités dans le domaine électrique. Pour ce fait, les lois de physique sont apposées à ces modèles, à partir desquelles des similitudes entre les domaines sont établies.

### ✓ **Les réseaux de Kirchhoff généralisés**

L'utilisation des réseaux de Kirchhoff facilite la modélisation des circuits électriques. On appelle un réseau de Kirchhoff généralisé, si le concept de réseau de Kirchhoff est employé et le modèle réalisé représente le circuit électrique équivalent d'un composant.

#### **IV.2.4.3. La méthode de modélisation au niveau composant**

A ce niveau, la décomposition de sous-système est en briques élémentaires basiques qui sont exposées par des modèles analytiques. Si l'ordre du système d'équations est réduit, alors l'exportation des équations différentielles ordinaires est possible, afin de former le modèle simplifié du composant. Il est évident que la précision du modèle est diminuée, mais l'erreur liée peut être acceptable si le modèle d'ordre réduit prévu n'est pas très court.

#### **IV.2.4.4. La méthode de modélisation au niveau physique**

Le niveau d'abstraction physique (ou dispositif) est le plus proche de la réalité du fonctionnement d'un système. Il est évident que lors de l'accomplissement du modèle à ce niveau, les caractéristiques des matériaux fonctionnés et des structures nécessitent d'être introduites dans la caractérisation du comportement des mécanismes. Dans la modélisation au niveau physique, le comportement d'un système est défini par les équations différentielles partielles. Ici, les méthodes de résolution utilisées sont les éléments finis (FEM) et les éléments aux limites (BEM). Ces méthodes de résolution sont précises, et conviennent au calcul des distributions des contraintes, des déformations et des fréquences naturelles des structures MEMS. Dans ce travail, nous avons choisi la méthode de modélisation au niveau physique (les éléments finis) pour modéliser le capteur de vibration.

#### **IV.2.5. L'outil de simulation**

Pour réaliser des études préliminaires et/ ou comparatives, on utilise la simulation qui est un moyen efficace et économique. L'utilisation d'un simulateur performant peut considérablement augmenter les capacités d'un système expert. Dans le domaine des machines électriques et de l'électronique, plusieurs outils de simulation sont employés tel que MATLAB, PSIM, SPICE, ATOSECS, EMTP, SMNON, etc [13][41].

#### **IV.2.6. Le logiciel de simulation (MATLAB)**

Le MATLAB est un système de calcul numérique et de présentation graphique, destiné aux ingénieurs et scientifiques. Il contient un langage de programmation à la fois robuste et simple à utiliser. Il permet d'exposer les problèmes et les solutions d'une façon facile, contrairement à d'autres langages de programmation. Il inclut des fonctions d'analyse numérique, de calcul matriciel, de traitement de signal, d'affichage graphique 2D et 3D, etc. Il peut être utilisé d'une manière interactive ou en mode programmation. En mode interactif, l'utilisateur à l'éventualité d'effectuer instantanément des calculs difficile et compliqués et présenter les résultats sous forme numérique ou graphique. En mode de programmation, il est possible d'écrire les programmes comme les autres langages. L'utilisateur peut aussi crée ses propres fonctions qui peuvent être appelées de façon interactive ou par des scripts. Ces fonctions offrent à MATLAB une réussite unique. Dans MATLAB, l'élément de base est la matrice [13][41]. Le MATLAB s'est imposé dans les milieux universitaire et industriel comme un outil puissant de modélisation, de simulation et de présentation de problèmes numériques. Dans le monde universitaire, MATLAB est exploité pour l'enseignement de l'algèbre linéaire, le traitement du signal, l'automatique, l'électronique de puissance ainsi que dans le domaine de la recherche scientifique. Dans notre travail l'outil de simulation et de modélisation employé est le Matlab.

### IV.3. Modélisation du comportement physique de l'accéléromètre piézoélectrique

#### a. Modèle mécanique

L'accéléromètre piézoélectrique peut être considéré comme un système composé par une masse, un ressort et un dispositif d'amortissement comme le montre la figure suivante (Fig.IV.1)

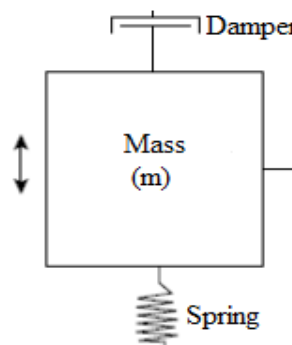


Fig.IV.1. Système masse, ressort et amortisseur

Le mouvement vibratoire relatif ( $z$ ) est donné par la relation suivante :

$$z(t) = x(t) - y(t) \quad (IV.1)$$

L'application de la première loi du mouvement, nous pouvons écrire l'équation suivante:

$$\sum F = m\gamma = mp^2z \quad (IV.2)$$

Avec: p est le coefficient de Laplace

L'équation de second ordre montrant le mouvement du système masse-ressort amortisseur peut s'écrire comme suit:

$$mp^2z + cp^2z + kz = -mp^2y \quad (IV.3)$$

Avec: m est la masse, c, est le coefficient de frottement, k est le coefficient d'élasticité, y est le mouvement absolu et s<sup>2</sup>y est l'accélération absolue.

La fréquence propre de l'accéléromètre peut exprimer en fonction de la masse sismique et le coefficient d'élasticité, son expression illustrée par la relation suivante :

$$\omega_0 = \sqrt{\left(\frac{k}{m}\right)} \quad (IV.4)$$

Le taux d'amortissement est le rapport entre le coefficient d'amortissement et la masse sismique et la fréquence propre, alors; on peut écrire :

$$\zeta = \frac{c}{(2m\omega_0)} \quad (IV.5)$$

$\omega_0$  est la fréquence propre et  $\zeta$  est le taux d'amortissement.

En substituant les équations (IV.4) et (IV.5) dans l'équation (IV.3), le mouvement relatif z est exprimé comme suit:

$$z = -\frac{yp^2}{p^2 + 2\zeta\omega_0p + \omega_0^2} \quad (IV.6)$$

Le coefficient de Laplace (p) peut être remplacé par (j $\omega$ ), l'équation (IV.6) devient :

$$z = \frac{y\omega^2}{-\omega^2 + 2j\zeta\omega\omega_0 + \omega_0^2} \quad (IV.7)$$

$\omega$  est la fréquence relative des mouvements vibratoires.

On peut écrire l'équation (IV.7) comme suit :

$$z = \frac{y\omega^2}{\omega_0^2\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + \left(\frac{2j\zeta\omega}{\omega_0}\right)\right)} \quad (IV.8)$$

L'équation (IV.8) est une fonction complexe, son module est:

$$z = \frac{y\omega^2}{\omega_0^2 \sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right)^2 + \left(\frac{2\zeta\omega}{\omega_0}\right)^2}} \quad (IV.9)$$

Cette équation illustre le mouvement relatif des vibrations mesuré par l'accéléromètre piézoélectrique.

Si on désigne par  $\gamma$  l'accélération des mouvements vibratoires (grandeur d'entrée) mesurés par l'accéléromètre piézoélectrique et  $Q$  la charge électrique (grandeur de sortie) qui en résulte, la sensibilité  $S$  s'écrit:

$$S = \frac{Q}{\gamma} = S_1 \cdot S_2 \quad (IV.10)$$

Où  $S_1$  est la sensibilité mécanique du système à masse sismique (réponse du 2<sup>ème</sup> ordre):

$$S_1 = \frac{z}{\gamma} = \frac{1}{\omega_0^2 \sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right)^2 + \left(\frac{2\zeta\omega}{\omega_0}\right)^2}} \quad (IV.11)$$

$S_2$  est la sensibilité électrique du capteur (réponse du 1<sup>er</sup> ordre):

$$|S_2| = \left| \frac{Q}{z} \right| = d \cdot C \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_c}{\omega}\right)^2}} \quad (IV.12)$$

$d$ : le constante piézoélectrique

$C$  : la raideur de l'élément sensible

$\omega_c$  est la fréquence de coupure basse de l'ensemble accéléromètre + conditionneur.

La sensibilité de l'accéléromètre est :

$$S = \frac{d \cdot C}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_c}{\omega}\right)^2}} \cdot \frac{1/\omega_0^2}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \left(2 \cdot \zeta \cdot \frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}} \quad (IV.13)$$

La relation de la sensibilité relative de l'accéléromètre peut être exprimée comme suit:

$$S_r = \frac{S}{S_m} \quad (IV.14)$$

Avec:

$$S_m = \frac{d \cdot C}{\omega_0^2} \quad (IV.15)$$

Donc :

$$S_r = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_c}{\omega}\right)^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + (2 \cdot \zeta \cdot \frac{\omega}{\omega_0})^2}} \quad (IV.16)$$

D'après les deux équations (IV.9 et IV.16), on obtient la nouvelle formule de la sensibilité relative en fonction du mouvement relative qui présentée par l'équation suivante:

$$S_r = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_c}{\omega}\right)^2}} \cdot \frac{z \omega_0^2}{Y \omega^2} \quad (IV.17)$$

L'erreur de mesure du capteur piézoélectrique a l'expression suivante:

$$E = \frac{(d^2 y / dt^2)}{(d^2 z / dt^2)} - 1 = [z \cdot \omega_0^2 / y \omega^2] - 1 \quad (IV.18)$$

E : l'erreur de mesure

Alors, à partir l'équation IV.(9), l'erreur de mesure est défini par:

$$E = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right)^2 + (2 \zeta \omega / \omega_n)^2}} - 1 \quad (IV.19)$$

La nouvelle relation qui relie la sensibilité relative en fonction de l'erreur de mesure est :

$$S_r = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_c}{\omega}\right)^2}} \cdot (E + 1) \quad (IV.20)$$

Cette équation permet d'améliorer les paramètres de l'accéléromètre piézoélectrique et proposer une nouvelle conception.

### b. Modèle électrique

Le matériau piézoélectrique de l'accéléromètre peut être considéré comme un générateur de courant d'intensité  $i = dQ/dt$  en parallèle sur une impédance interne, la figure suivante illustre le schéma d'un générateur du courant (**Fig.IV.2.**)

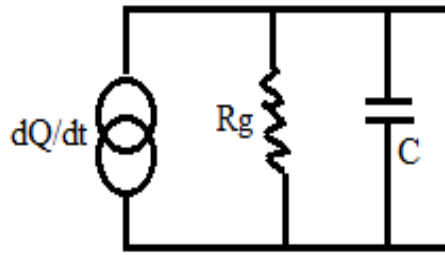


Fig.IV.2. Générateur du courant du matériau piézoélectrique

Le schéma équivalent de Thévenin correspondant est montré par la Fig.IV.3.:

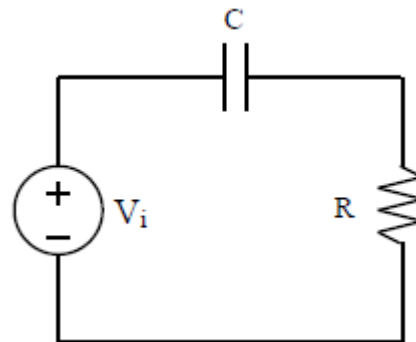


Fig.IV.3. Le schéma équivalent de Thévenin

D'après la Fig.IV.3, on peut extraire la fonction de transfert de ce circuit qui exprimée comme suit :

$$H(j\omega) = \frac{j\omega}{j\omega + 1/RC} \quad (IV.21)$$

Avec C : l'impédance interne du capteur et R : la résistance d'isolement du matériau piézoélectrique,

L'amplitude de cette fonction de transfert est :

$$|H(j\omega)| = \frac{\omega}{\sqrt{\omega^2 + (\frac{1}{R.C})^2}} \quad (IV.22)$$

Et le déphasage donné par la relation suivante:

$$\theta(j\omega) = 90^\circ - \tan^{-1}\omega.R.C \quad (IV.23)$$

La formule suivante exprime la pulsation de coupure  $\omega_c$  est:

$$\omega_c = \frac{1}{R.C} \quad (IV.24)$$

L'expression de la résistance d'isolement du matériau piézoélectrique est donnée par:

$$R = \frac{\tan \delta}{2\pi.f.C} = \frac{\tan \delta}{\omega.C} \quad (IV.25)$$

En remplaçant l'équation (IV.25) dans l'équation (IV.24), on obtient l'équation (IV.26) :

$$\omega_c = \frac{\omega}{\tan \delta} \quad (IV.26)$$

Le tableau suivant montre les paramètres du matériau piézoélectrique PZT (PZ27) (voir tableau. IV.1). [45]

**Tableau.IV.1. Paramètres du matériau piézoélectrique PZT (PZ27)**

Paramètres	Valeur	Unité
Impédance interne du capteur (C)	7835 à 1Khz	pf
Constante piézoélectrique (d)	500	pC/N
tan $\delta$	15.85	$10^{-3}$

#### IV.4 Simulation et interprétation des résultats

La simulation désigne l'exécution d'un programme informatique sur un ordinateur ou réseau en vue de simuler un phénomène physique réel et complexe. Dans notre travail, on utilisera le logiciel Matlab pour simuler le modèle mathématique développé du comportement mécanique et électrique de l'accéléromètre piézoélectrique. Les paramètres utilisés pour simuler ce modèle sont présenté dans le tableau suivant (Tableau. IV.2):

**Tableau. IV.2. Paramètres de simulation**

Paramètres	Valeurs
Fréquence propre Del 'accéléromètre (Hz)	10000
Taux d'amortissement	0.6, 0.63, 0.65, 0.68, 0.7
Fréquence relative du mouvement vibratoire (Hz)	0 jusqu'à 4200
Amplitude du mouvement (mm)	0.5

Le mouvement vibratoire (z) est présenté par le tableau suivant (tableau. IV.3) et la figure suivante (Fig.IV.4) :

Tableau. IV.3. Résultats de simulation du mouvement relative

Fréquence	Mouvement relative (mm)				
	$\zeta = 0.6$	$\zeta = 0.63$	$\zeta = 0.65$	$\zeta = 0.68$	$\zeta = 0.7$
0	0	0	0	0	0
300	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
600	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018
900	0.0041	0.0041	0.0041	0.0041	0.0041
1200	0.0072	0.0072	0.0072	0.0072	0.0072
1500	0.0113	0.0113	0.0113	0.0113	0.0113
1800	0.0163	0.0163	0.0163	0.0162	0.0162
2100	0.0223	0.0222	0.0222	0.0221	0.0220
2400	0.0292	0.0291	0.0290	0.0289	0.0288
2700	0.0371	0.0369	0.0368	0.0366	0.0364
3000	0.0460	0.0457	0.0455	0.0451	0.0449
3300	0.0558	0.0554	0.0551	0.0546	0.0542
3600	0.0667	0.0660	0.0656	0.0649	0.0644
3900	0.0785	0.0776	0.0770	0.0760	0.0754
4200	0.0913	0.0901	0.0893	0.0880	0.0872

Le tableau. IV.3 illustre les résultats de simulation du mouvement relatif en fonction de la fréquence relative pour cinq taux d'amortissement (0.6, 0.63, 0.65, 0.68 et 0.7). D'après ce tableau, on voit que le mouvement relatif est un peu varié avec la variation de taux d'amortissement, ça implique que l'erreur de mesure variée avec la variation du taux d'amortissement.

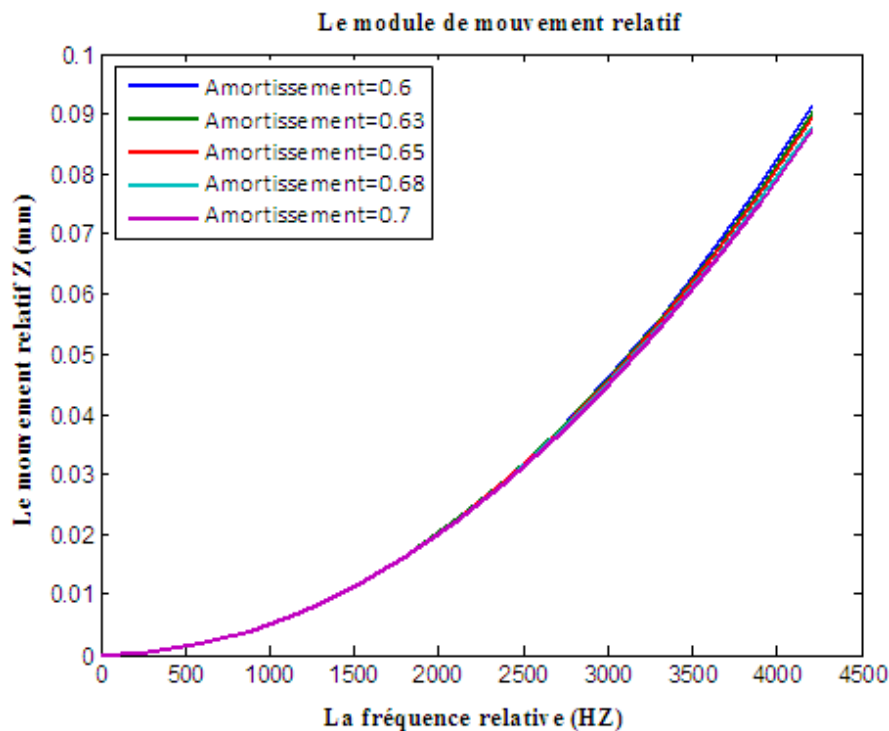


Fig.IV.4. Le mouvement relative en fonction de fréquence relative pour diverses valeurs du taux d'amortissement

La figure.IV.4 montre cinq courbes de mouvement relatif en fonction de fréquence relative pour cinq valeurs du taux d'amortissement. On remarque d'après cette figure qu'il existe des écarts entre ces courbes, c'est-à-dire une variation de l'erreur de mesure en fonction du taux d'amortissement.

La simulation de l'équation d'erreur permet de faciliter le choix du taux d'amortissement approprié pour avoir un accéléromètre plus précis (une erreur de mesure plus réduite). Les résultats de simulation sont présentés par le tableau suivant (tableau.IV.4) et la figure ci-dessous (Fig.IV.5).

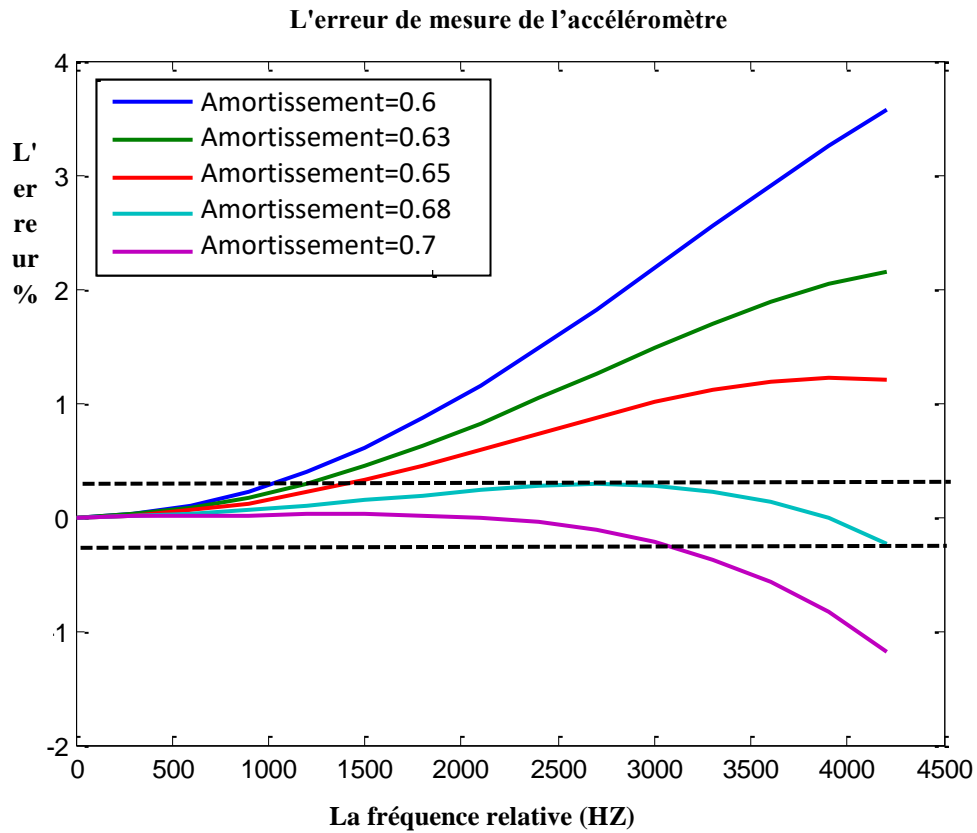
**Tableau. IV.4. Résultats de simulation de l'erreur de mesure**

Fréquence	Erreur de mesure (%)				
	$\zeta = 0.6$	$\zeta = 0.63$	$\zeta = 0.65$	$\zeta = 0.68$	$\zeta = 0.7$
0	0	0	0	0	0
300	0.03	0.02	0.01	0.01	0.005
600	0.10	0.07	0.06	0.03	0.01
900	0.22	0.16	0.12	0.06	0.01
1200	0.4	0.29	0.21	0.10	0.02
1500	0.61	0.44	0.33	0.14	0.02
1800	0.87	0.62	0.45	0.19	0.01
2100	1.16	0.82	0.59	0.24	-0.01
2400	1.48	1.04	0.73	0.27	-0.005
2700	1.82	1.26	0.88	0.28	-0.12
3000	2.18	1.48	1	0.27	-0.22
3300	2.55	1.69	1.11	0.23	-0.37
3600	2.91	1.88	1.19	0.14	-0.58
3900	3.25	2.04	1.22	-0.01	-0.84
4200	3.57	2.15	1.20	-0.23	-1.18

Le tableau. IV.4 montre les résultats de simulation de l'erreur de mesure en fonction de la fréquence relative pour cinq taux d'amortissement (0.6, 0.63, 0.65, 0.68 et 0.7). On observe que :

- Pour le taux d'amortissement égal à 0.6, l'erreur de mesure ne dépasse pas un pourcentage égal à 3.75% avec une variation de fréquence relative de 0 jusqu'à 4200Hz.
- Pour le taux d'amortissement égal à 0.63, l'erreur de mesure ne dépasse pas un pourcentage égal à 2.15% avec une variation de fréquence relative de 0 jusqu'à 4200Hz.
- Pour le taux d'amortissement égal à 0.65, l'erreur de mesure ne dépasse pas un pourcentage égal à 1.2% avec une variation de fréquence relative de 0 jusqu'à 4200Hz.
- Pour le taux d'amortissement égal à 0.68, l'erreur de mesure ne dépasse pas un pourcentage égal à 0.28% avec une variation de fréquence relative de 0 jusqu'à 4200Hz.

- Pour le taux d'amortissement égal à 0.7, l'erreur de mesure ne dépasse pas un pourcentage égal à 1.18% avec une variation de fréquence relative de 0 jusqu'à 4200Hz.



**Fig.IV.5.L'erreur de mesure en fonction de fréquence relative pour diverses valeurs du taux d'amortissement**

La fig.IV.5 illustre une présentation graphique de l'erreur de mesure en fonction de la fréquence relative du mouvement pour cinq valeurs du taux d'amortissement (0.6, 0.63, 0.65, 0.68 et 0.7). D'après la fig.IV.5et le tableau. 4, valeur appropriée du taux d'amortissement qui limite l'erreur de mesure à une valeur ne dépasse pas à 0.28% est égale à 0.68. Ce choix permet d'évoluer les paramètres de l'accéléromètre piézoélectrique et de progresser ses performances.

La simulation de la nouvelle expression de la sensibilité relative est montrée par le tableau (5) et la figure.IV.6 :

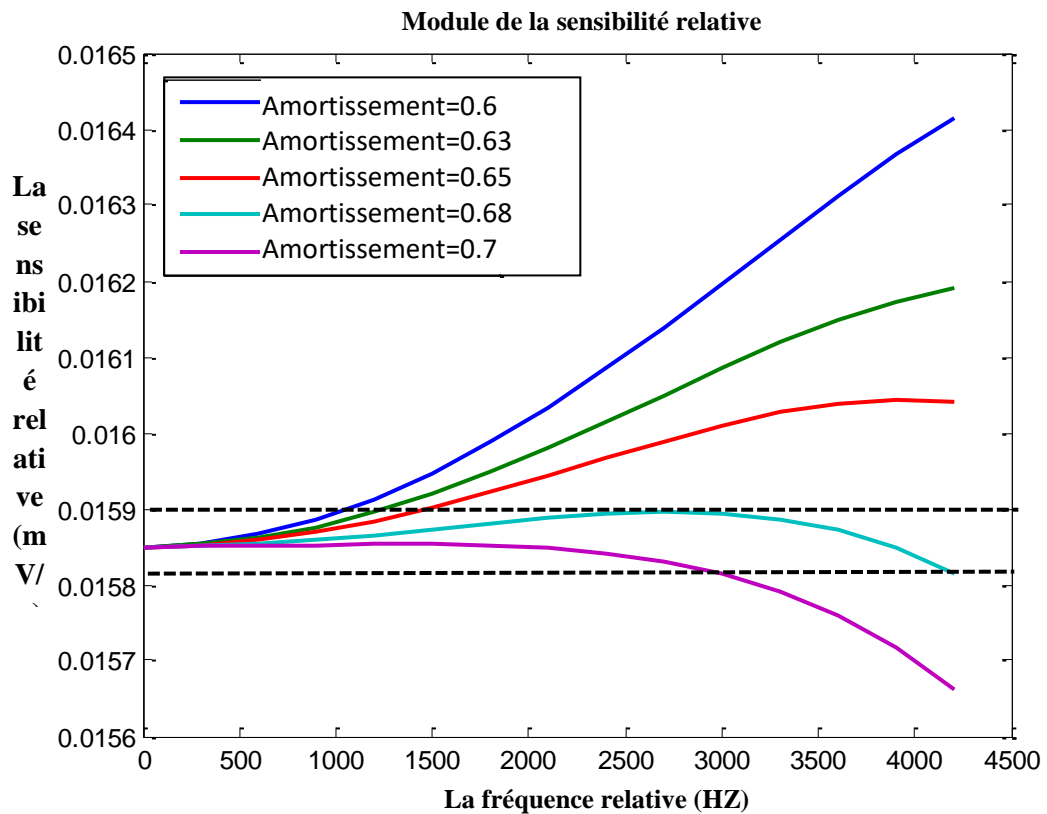
Tableau. IV.5. Résultats de simulation de la sensibilité relative

Fréquence	Sensibilité relative (mV/g)				
	$\zeta = 0.6$	$\zeta = 0.63$	$\zeta = 0.65$	$\zeta = 0.68$	$\zeta = 0.7$
0	0.0159	0.0159	0.0159	0.0159	0.0159
300	0.0159	0.0159	0.0159	0.0159	0.0159
600	0.0159	0.0159	0.0159	0.0159	0.0159
900	0.0159	0.0159	0.0159	0.0159	0.0159
1200	0.0159	0.0159	0.0159	0.0159	0.0159
1500	0.0159	0.0159	0.0159	0.0159	0.0159
1800	0.0160	0.0159	0.0159	0.0159	0.0159
2100	0.0160	0.0160	0.0159	0.0159	0.0158
2400	0.0161	0.0160	0.0160	0.0159	0.0158
2700	0.0161	0.0160	0.0160	0.0159	0.0158
3000	0.0162	0.0161	0.0160	0.0159	0.0158
3300	0.0163	0.0161	0.0160	0.0159	0.0158
3600	0.0163	0.0161	0.0160	0.0159	0.0158
3900	0.0164	0.0162	0.0160	0.0158	0.0157
4200	0.0164	0.0162	0.0160	0.0158	0.0157

Le tableau.IV.5 illustre les résultats de simulation de sensibilité relative en fonction de la fréquence relative pour cinq valeurs du taux d'amortissement (0.6, 0.63, 0.65, 0.68 et 0.7). On voit que :

- Pour le taux d'amortissement égal à 0.6, la sensibilité relative égale à 0.0159 mV/g  $\pm$  3% avec une variation de fréquence relative de 0 jusqu'à 4200Hz.
- Pour le taux d'amortissement égal à 0.63, la sensibilité relative égale à 0.0159 mV/g  $\pm$  1.85% avec une variation de fréquence relative de 0 jusqu'à 4200Hz.
- Pour le taux d'amortissement égal à 0.65, la sensibilité relative égale à 0.0159 mV/g  $\pm$  0.62% avec une variation de fréquence relative de 0 jusqu'à 4200Hz.
- Pour le taux d'amortissement égal à 0.68, la sensibilité relative égale à 0.0159 mV/g  $\pm$  0.62% avec une variation de fréquence relative de 0 jusqu'à 4200Hz.
- Pour le taux d'amortissement égal à 0.6, la sensibilité relative égale à 0.0159 mV/g  $\pm$  1.26% avec une variation de fréquence relative de 0 jusqu'à 4200Hz.

Le taux d'amortissement qui égal à 0.68 permet d'obtenir un accéléromètre très sensible par comparaison avec les autres (voir tableau. IV.5).



**La fig.IV.6. La sensibilité relative de l'accéléromètre en fonction de fréquence relative pour diverses valeurs du taux d'amortissement**

La Fig.IV.6 montre la sensibilité relative de l'accéléromètre piézoélectrique en fonction de fréquence relative pour cinq valeurs de taux d'amortissement. On remarque d'après cette figure que le taux d'amortissement égal à 0.68 permet d'obtenir une sensibilité relative un peu constante par rapport les autres, ceci implique que l'accéléromètre est plus sensible.

Le reste de la chaine de mesure ; l'amplificateur et l'analyseur FFT ont pour but de convertir le signal électrique temporel en un signal électrique fréquentiel. Pour comprendre le principe de cette conversion, on va étudier dans la suite les opérations de traitement de signal telles que la génération des signaux, décomposition des signaux, calcul du spectre de signal, pondération des signaux.

#### **IV.5. Traitement du signal (les opérations de traitement de signal)**

La conversion d'un signal temporel en un signal fréquentiel par l'utilisation des analyseurs, de façon digitale. La transformée de Fourier est la méthode utilisée pour convertir le signal. Le but des analyseurs de vibration est de donner l'information fréquentielle contenue dans un signal, mais de nombreuses précautions doivent être prises dans la sélection des paramètres de l'analyseur afin d'éviter de traiter de mauvaises données. Pour cela, il faut comprendre les opérations de traitement de signal afin de sélectionner les paramètres adéquats [44].

### IV.5.1.Décomposition d'un signal en série de Fourier

N'importe quelle fonction de période T qui se répète dans le temps appelée une fonction périodique qui donne par la relation suivante:

$$X(t)=x(t+T) \tag{IV.27}$$

En vibration des machines tournantes, chaque source vibratoire est multiple et se compose dans tel point de mesure une somme des signaux vibratoires. On utilise un oscilloscope pour fournir le résultat correspond à la réponse temporelle [44]. Toutefois, lorsqu'on veut établir un diagnostic des problèmes, il est essentiel d'être capable d'identifier chaque source qui a constitué le signal mesuré.

La décomposition d'un signal périodique en série Fourier à l'aide d'un programme, écrit sous Matlab, on considère deux signaux, le premier périodique  $x_p(t)$  et le deuxième  $x(t)$  qui constitué de deux signaux  $x_1(t)$  et  $x_2(t)$  (les équations (IV.28) et (IV.29)).

Pour un signal périodique :

$$x_p(t)=a \sin(2\pi ft+\varphi) \tag{IV.28}$$

Pour un signal décomposé:

$$x_1(t) = a_1 \sin (2\pi f_1 t + \varphi_1).$$

$$x_2(t) = a_2 \sin (2\pi f_2 t + \varphi_2).$$

$$x (t) = x_1(t) + x_2(t).$$

$$x(t)=a_1 \sin(2\pi f_1 t+\varphi_1)+a_2 \sin(2\pi f_2 t+\varphi_2) \tag{IV.29}$$

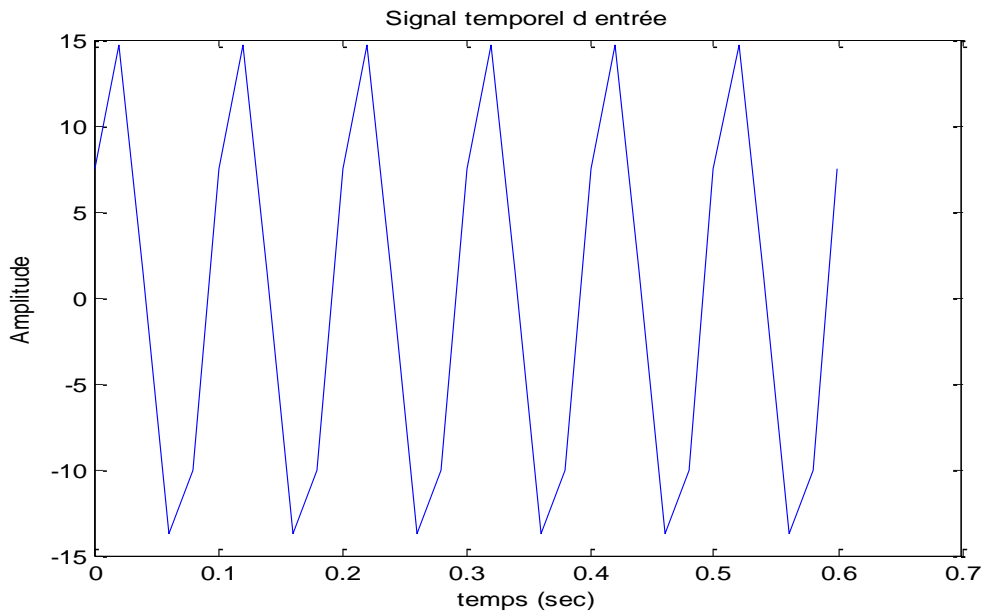
On résume ; l'identification des paramètres et ses valeurs d'entrée d'un signal périodique et d'un signal décomposé en série de Fourier, dans le tableau suivant (Tableau.IV.6):

**Tableau.IV.6. Paramètres d'entrée d'un signal périodique et d'un signal décomposé**

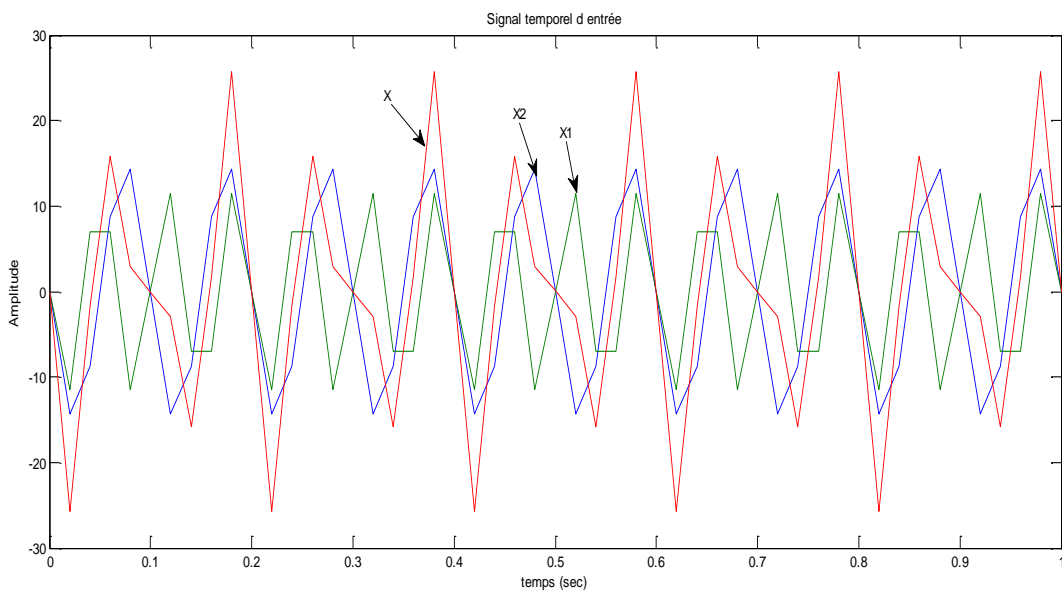
Un signal décomposé			Un signal périodique		
Indic	Destination	Valeur	Indic	Destination	Valeur
$a_1$	Amplitude de premier signal	15	$a_1$	Amplitude de signal périodique	15
$a_2$	Amplitude de deuxième signal	12	$f_1$	Fréquence de signal périodique	50
$f_1$	Fréquence de premier signal	40	$\varphi_1$	déphasage de signal périodique	150°
$f_2$	Fréquence de deuxième signal	35	Te	Période d'un signal	0.02

$\varphi_1$	Déphasage de premier signal	$0^\circ$	t	Temps	[0-30]
$\varphi_2$	Déphasage de deuxième signal	$0^\circ$			
$T_e$	Période d'un signal (s)	0.02			
T	Temps (s)	[0-50]			

Les résultats obtenus par la simulation sont illustrés dans les deux figures suivantes(Fig.IV.7 et Fig.IV.8):



**La Fig.IV.7 Signal périodique (résultat de simulation)**



**La Fig.IV.8Décomposition des signaux (résultat de simulation).**

L'utilisation de ce programme de simulation facilite l'identification des deux signaux  $x_1(t)$  et  $x_2(t)$  et de calculer son somme  $x(t)$ .

Il est beaucoup moins facile de déterminer les signaux qui le composent à moins d'avoir recours à un système de filtrage passe bas et passe haut (à condition de connaître les fréquences à priori) ou alors d'avoir recours à une technique de transformée de Fourier rapide appelée FFT.

### IV.5.2. La génération des signaux

Pour voir comment générer les signaux, il faut utiliser un programme de simulation écrit sous Matlab, permet de engendrer des signaux harmoniques : purs, composés, rectangulaires, en dents de scie, ou sous forme de vibration libre.

On besoin dans ce programme les équations suivantes :

- Pour un signal d'entrée sous la forme d'harmonique pure [44]:

$$X=a.\text{Cos}(2.\text{pi}.f.t) \quad (IV.30)$$

- Pour un signal d'entrée sous la forme d'une somme d'harmoniques

$$X=X+a(i).\text{sin}(2.\text{pi}.f(i).t.+phi(i)) \quad (IV.31)$$

- Pour un signal d'entrée sur la forme d'onde rectangulaire

$$X=a.\text{Square}(2.\text{pi}.f.t) \quad (IV.32)$$

- Pour un signal d'entrée sous forme d'onde en dents de scie.

$$X=a.\text{sawtooth}(2.\text{pi}.f.t,W) \quad (IV.33)$$

1. le choix de la forme d'onde en dents de scie est de génère une descente verticale ( $w=1$ )
2. le choix de la forme d'onde en dents de scie est de génère une onde symétrique ( $w=w/4$ )
3. le choix de la forme d'onde en dents de scie est de génère une montée verticale ( $w=w/300$ )

- Pour un signal d'entrée sous forme d'une vibration libre sous l'effet de conditions initiales ( $z<1$ ) [26].

$$X= A .\text{exp} .(-z .w . t) .\text{sin} (w_d . t + phi) \quad (IV.34)$$

$$A= (((v_0 + z . w . x_0)^2 + (x_0 . w_d)^2) / w_d^2)^{1/2}$$

$$phi = \text{atan2}(x_0 .w_d/v_0 + z . w . x_0)$$

$$w=2 .\text{pi} .f$$

$$w_d = w (1-z^2)^{1/2}$$

**Chapitre IV-----Optimisation des performances de l'accéléromètre piézoélectrique**

- Pour un signal d'entrée sous forme d'une vibration libre sous l'effet de conditions initiales (z=1).

$$X = (a_1 + a_2 \cdot t) \exp(-w \cdot t) \quad (IV.35)$$

$$a_1 = x_0$$

$$a_2 = v_0 + w \cdot x_0$$

- Pour un signal d'entrée sous forme d'une vibration libre sous l'effet de conditions initiales (z >1) [27].

$$a_1 = (-v_0 + (-z + (z^2 - 1)) \cdot w \cdot x_0) / 2 / w / (z^2 - 1)$$

$$a_2 = (v_0 + (z + (z^2 - 1)^{1/2}) \cdot w \cdot x_0) / 2 / w / (z^2 - 1)$$

$$X = \exp(-z \cdot w \cdot t) \cdot (a_1 \cdot \exp(-w \cdot (z^2 - 1)^{1/2} \cdot t) + a_2 \cdot \exp(w \cdot (z^2 - 1)^{1/2} \cdot t)) \quad (IV.36)$$

Les valeurs des paramètres d'entrée du programme de génération des signaux représentées dans le tableau ci-dessous (tableau.IV.7).

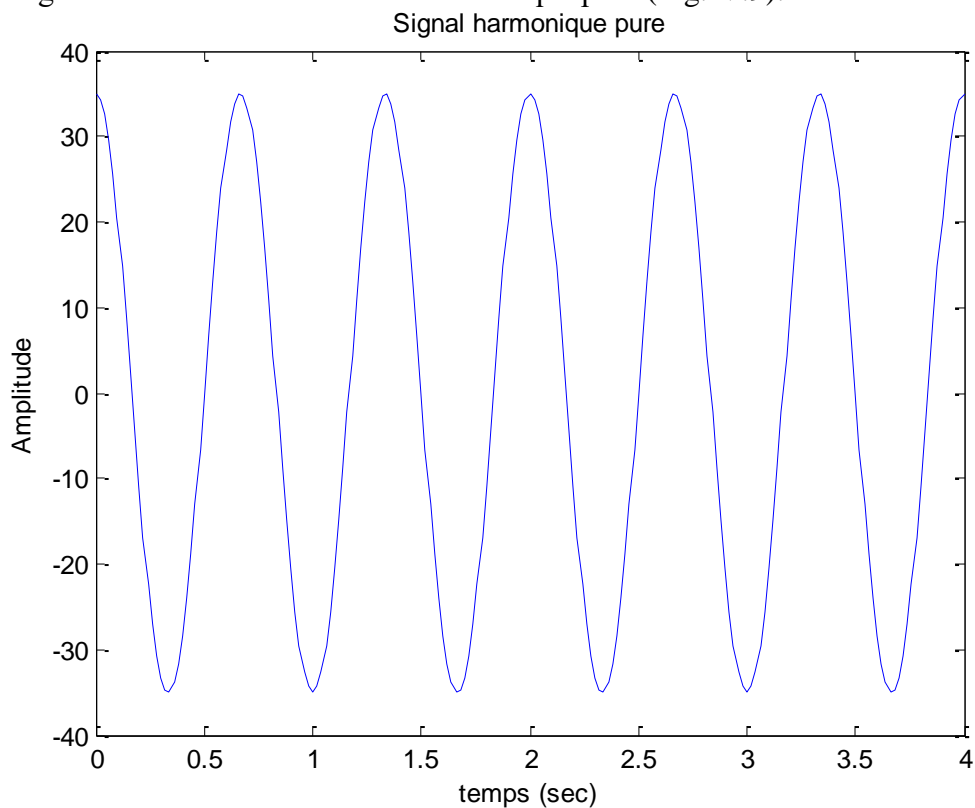
**Tableau. IV.7. Les paramètres d'entrée de chaque forme des signaux**

Les formes des signaux harmoniques		
Paramètre	Destination	Valeur
La forme d'harmonique pure		
a	L'amplitude de l'harmonique pure	35
f	La fréquence de l'harmonique pure	50
t	L'intervalle du temps	[0-50]
Te	La période	0.02
La forme d'une somme d'harmoniques (exemple le nombre des signaux égal 2)		
a(i)	L'amplitude d'une somme d'harmoniques (a <sub>1</sub> , a <sub>2</sub> )	(10,07)
f(i)	La fréquence d'une somme d'harmoniques (f <sub>1</sub> , f <sub>2</sub> )	(30,20)
Phi (i)	Le déphasage d'une somme d'harmoniques	30°
T	L'intervalle du temps	[0-50]
Te	La période	0.02
La forme d'onde rectangulaire		
A	L'amplitude d'onde rectangulaire	25
F	La fréquence d'onde rectangulaire	50
T	L'intervalle du temps	[0-50]
Te	La période	0.02
La forme d'onde en dents de scie		
A	L'amplitude d'onde en dents de scie	30
F	La fréquence d'onde en dents de scie	50
W	La forme d'onde en dents de scie	w,w/4,w/300
T	L'intervalle du temps	[0-50]
Te	La période	0.02
La forme d'une vibration libre sous l'effet de conditions initiales (z<1)		
A	L'amplitude d'une vibration libre sous l'effet de conditions initiales	30

Z	Le facteur d'amortissement sous l'effet de conditions initiales	0.05
W	La forme d'onde en dents de scie (impulsion)	-
w <sub>d</sub>	La forme d'une vibration libre sous l'effet de conditions initiales.	-
Phi	Le déphasage d'une vibration libre sous l'effet de conditions initiales	-
T	L'intervalle du temps	[0-50]
La forme d'une vibration libre sous l'effet de conditions initiales (z =1)		
W	la forme d'onde en dents de scie	-
x <sub>0</sub>	Le déplacement initial	0.6
v <sub>0</sub>	La vitesse initiale	0.9
a <sub>1</sub> , a <sub>2</sub>	les constantes pour simplifie l'équation	-
La forme d'une vibration libre sous l'effet de conditions initiales (z >1)		
W	La forme d'onde en dents de scie	-
x <sub>0</sub>	Le déplacement initial	0.6
v <sub>0</sub>	La vitesse initiale	0.9
a <sub>1</sub> , a <sub>2</sub>	Les constantes pour simplifie l'équation	-
Z	Le facteur d'amortissement d'une vibration libre sous l'effet de conditions initiales	2

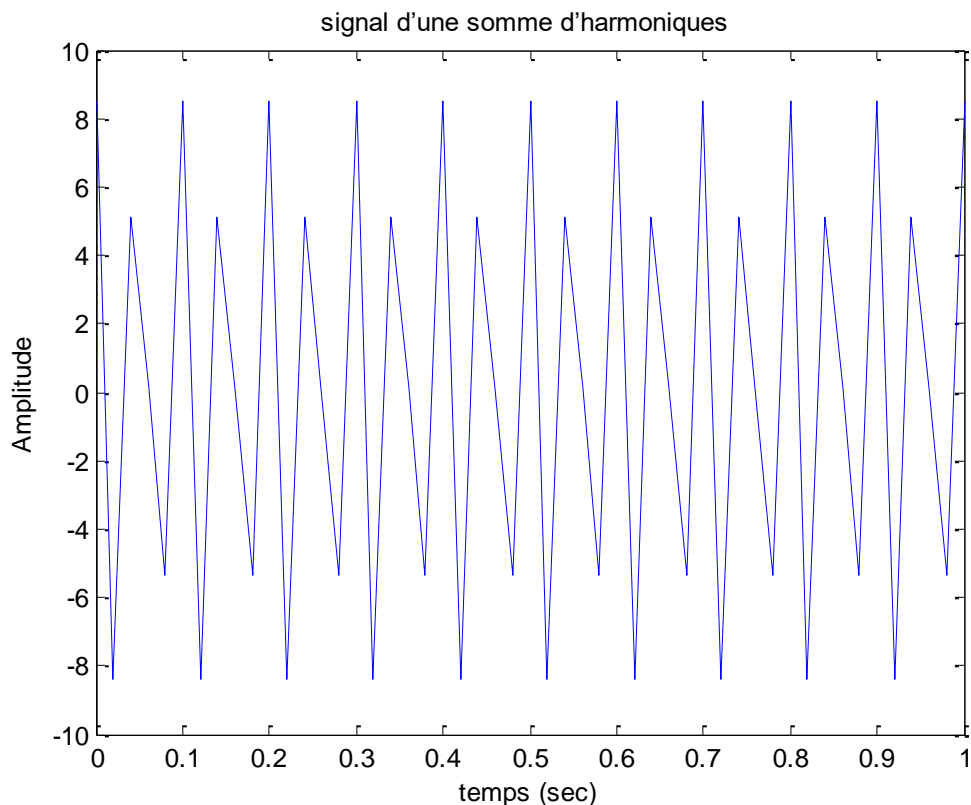
L'application du programme de génération de signaux donne les résultats suivants :

- Pour un signal d'entrée sous la forme d'harmonique pure (Fig.IV.9):



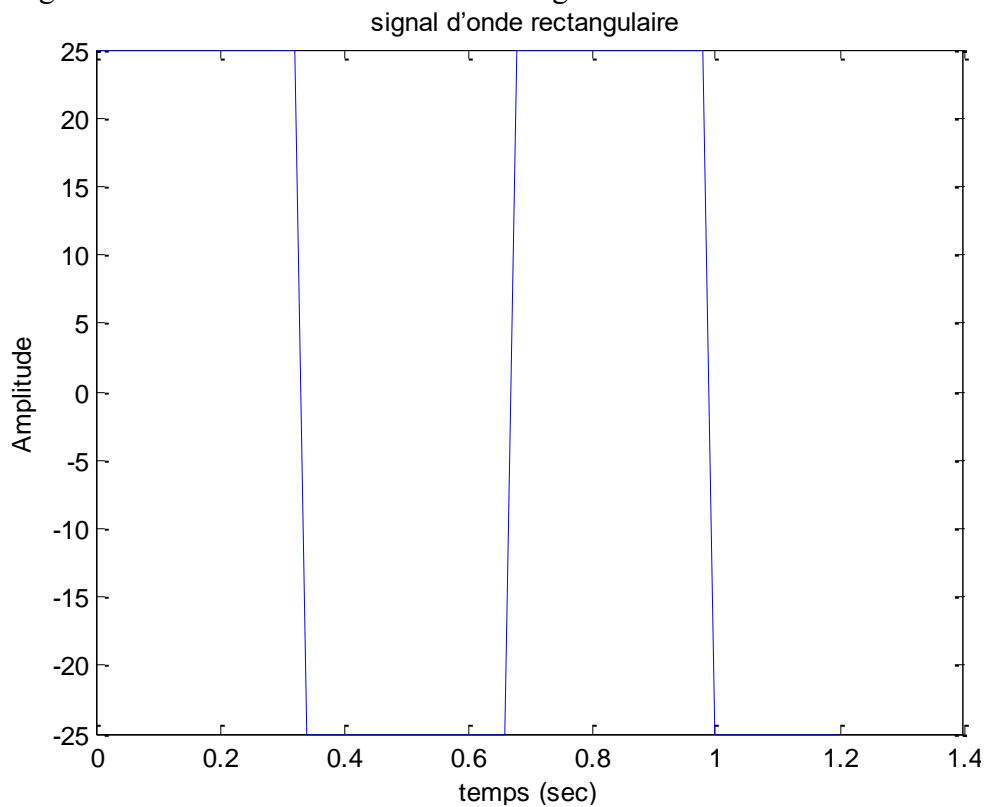
**La Fig.IV.9. Un signal d'entrée sous la forme d'harmonique pure**

- Pour un signal d'entrée sous la forme d'une somme d'harmoniques:



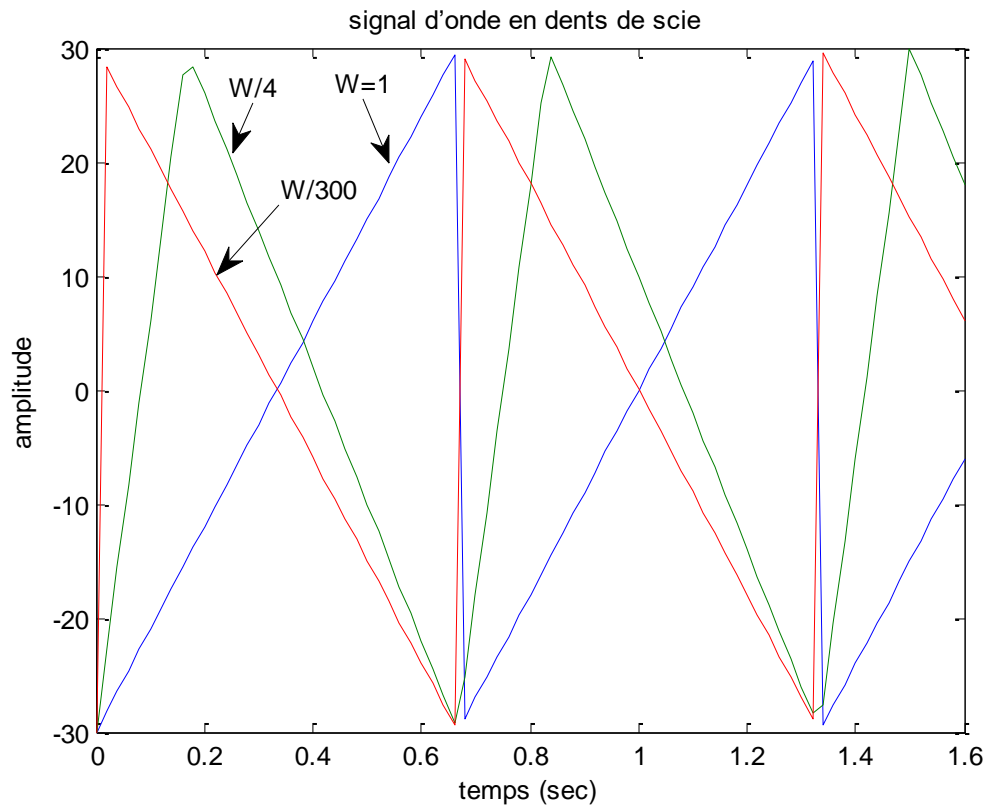
La Fig.IV.10. Un signal d'entrée sous la forme d'une somme d'harmoniques

- Pour un signal d'entrée sur la forme d'onde rectangulaire :



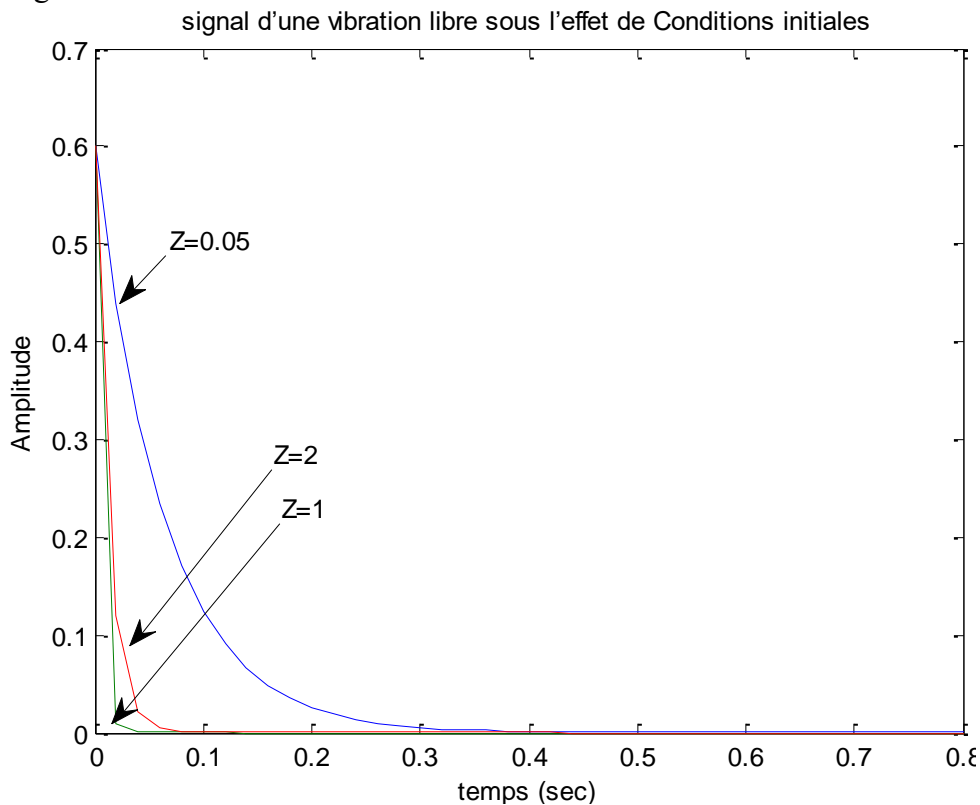
La Fig.IV.11. Un signal d'entrée sous forme d'onde rectangulaire

- Pour un signal d'entrée sous forme d'onde en dents de scie :



La Fig.IV.12. Un signal d'entrée sous forme d'onde en dents de scie

- Pour un signal d'entrée sous forme d'une vibration libre sous l'effet de conditions initiales:



La Fig.IV.13. Un signal d'entrée sur la forme d'une vibration libre sous l'effet de conditions initiales

Le programme de génération des signaux, permet de présenté schématiquement le signal électrique temporel quel que soit ses paramètres d'entrée et sa forme.

### IV.5.3. L'approximation des signaux

Le programme del'approximation des signaux, écrit sous Matlab, permet de modéliser le signal temporel (approximation en série de Fourier de deux signaux temporels sous forme d'une onde triangulaire)

On utilise dans ce programme l'équation suivante:

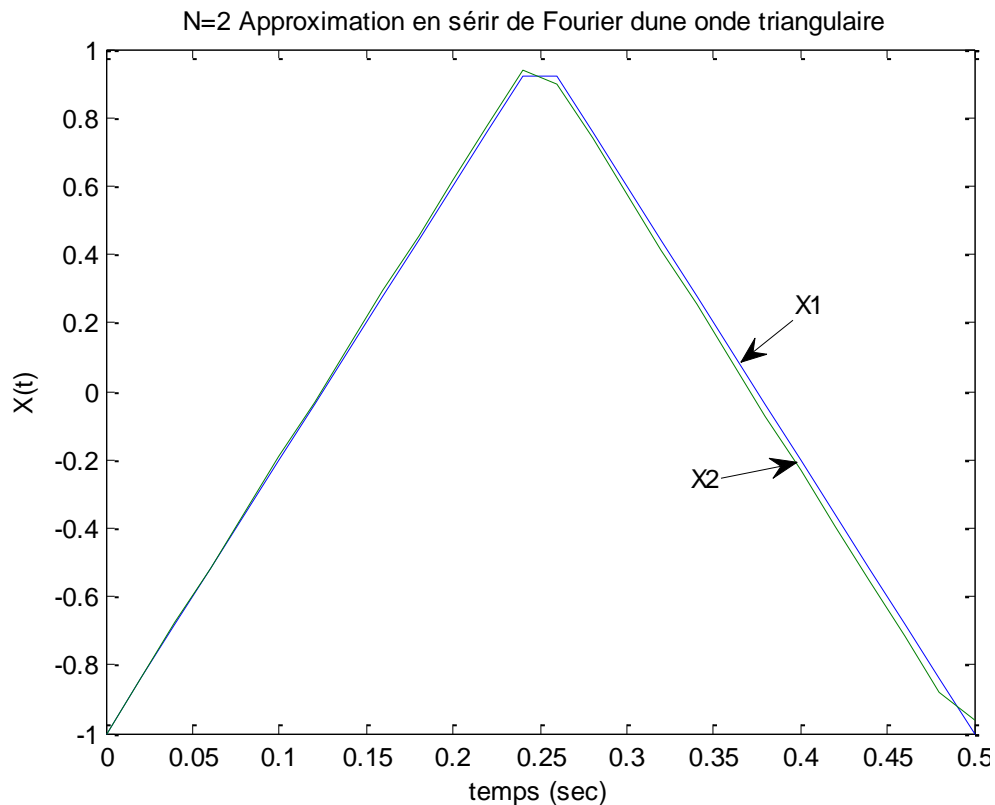
$$X= a \cdot \text{sawtooth}(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t, T_e, W) \quad (IV.37)$$

Pour l'approximation des signaux, les valeurs des paramètres d'entrée de ce programme, sont présentées dans le tableau suivant (Tableau. IV.8):

**Tableau. IV.8. Paramètres d'entrées du programme d'approximation des signaux**

<b>Indice</b>	<b>destination</b>	<b>valeurs</b>
N	Nombre des signaux	2
T <sub>e</sub>	La période d'échantillonnage	0.02
(f <sub>1</sub> , f <sub>2</sub> )	La fréquence de signal d'une onde triangulaire	(50, 52)
(a <sub>1</sub> , a <sub>2</sub> )	L'amplitude de signal d'une onde triangulaire	(20,20)
W	La forme de signal d'une onde triangulaire	1, 2, 3

L'application de programme d'approximation des signaux fournit le résultat ci-dessous qui montrés dans la figure(IV.15.)



La Fig.IV.15. Approximation en série de Fourier d'une onde triangulaire

La figure(IV.15) montre que les 2 premiers termes de la série suffisent pour modéliser un signal triangulaire à l'aide des fonctions harmoniques.

#### IV.5.4.Échantillonnage des signaux

La transformée de Fourier demande de connaître la fonction  $x(t)$ , que l'on doit intégrer entre  $-\infty$  et  $+\infty$ . Or, lorsqu'on réalise une mesure, on ne connaît pas l'expression mathématique de la fonction, mais plutôt des valeurs discrètes de cette fonction estimées à certains intervalles de temps pendant un certain laps de temps à partir d'un instant initial  $t_0$ . On supposera que  $t_0 > 0$ , ce qui décrit une fonction causale. Cette opération appelle l'échantillonnage [44].

On réalise un programme d'échantillonnage des signaux, écrit sous Matlab, permet de tracer la courbe de l'opération de l'échantillonnage d'un signal temporel, dans un intervalle du temps déterminé et avec une valeur de période de l'échantillonnage  $T_e$ .

Il faut aussi calculer quelques paramètres de l'échantillonnage:

- la période d'échantillonnage est de :

$$T_e = 1/ f_e(IV.38)$$

- le temps total d'observation est de :

$$T_{max} = N \cdot T_e \quad (IV.39)$$

- la résolution en fréquence de la transformée de Fourier :

$$df = 1/T_{max} \quad (IV.40)$$

Avec :

$f_e$  : la fréquence de l'échantillonnage

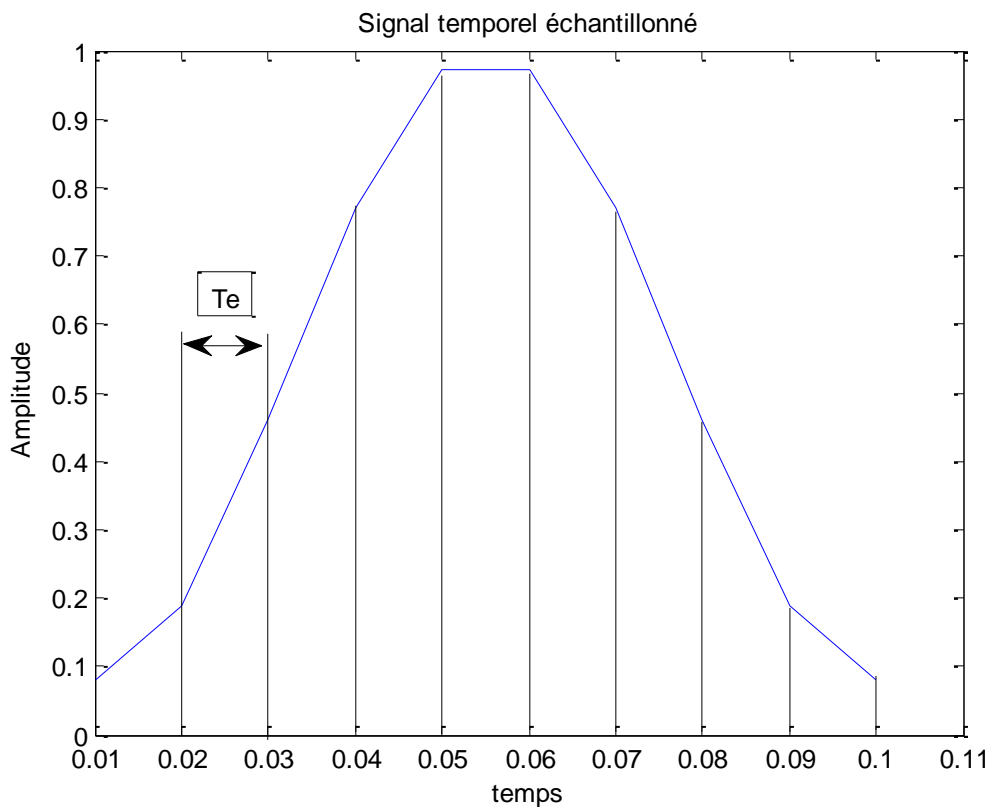
$N$  : le nombre d'échantillons

Les valeurs des paramètres d'entrée pour le programme d'échantillonnage des signaux sont présentées dans le tableau suivant (Tableau.IV.9):

**Tableau.IV.9. Paramètres d'entrées du programme d'échantillonnage**

Indice	Destination	Valeur
N	Nombre d'échantillons	10
a	L'amplitude de signal	1
$T_e$	La période d'échantillonnage	0.01

La figure (IV.16.) qui illustrée ci-dessous montre l'opération de l'échantillonnage d'un signal temporel avec une période d'échantillonnage égale 0.01 et une amplitude égale 1.



**La Fig.IV.16. Échantillonnage d'un signal (résultat de simulation)**

Échantillonner revient donc à sélectionner, à des instants différents, certaines valeurs du signal continu. L'opération d'échantillonnage est effectuée périodiquement sur le signal temporel à une période notée  $T_e$ .

### IV.5.5. Calcul du spectre de signal

Pour présenter un spectre de signal, il faut réaliser un programme, écrit sous Matlab, permet de calculer le spectre de signal dans le domaine fréquentiel par la transformation de Fourier avec une période d'échantillonnage  $T_e$  et une durée  $t_{max}$  [44].

$$S_{xx} = \text{FFt}(x) \text{ (IV.41)}$$

$S_{xx}$  : la dimension du signal d'entrée

$x$  : le signal d'entrée choisi

On prend un exemple pour exécuter le programme de calcul du spectre de signal:

- Pour un signal sous la forme d'une somme des harmoniques (Nombre des harmoniques égal 3), on a donc l'équation suivante:

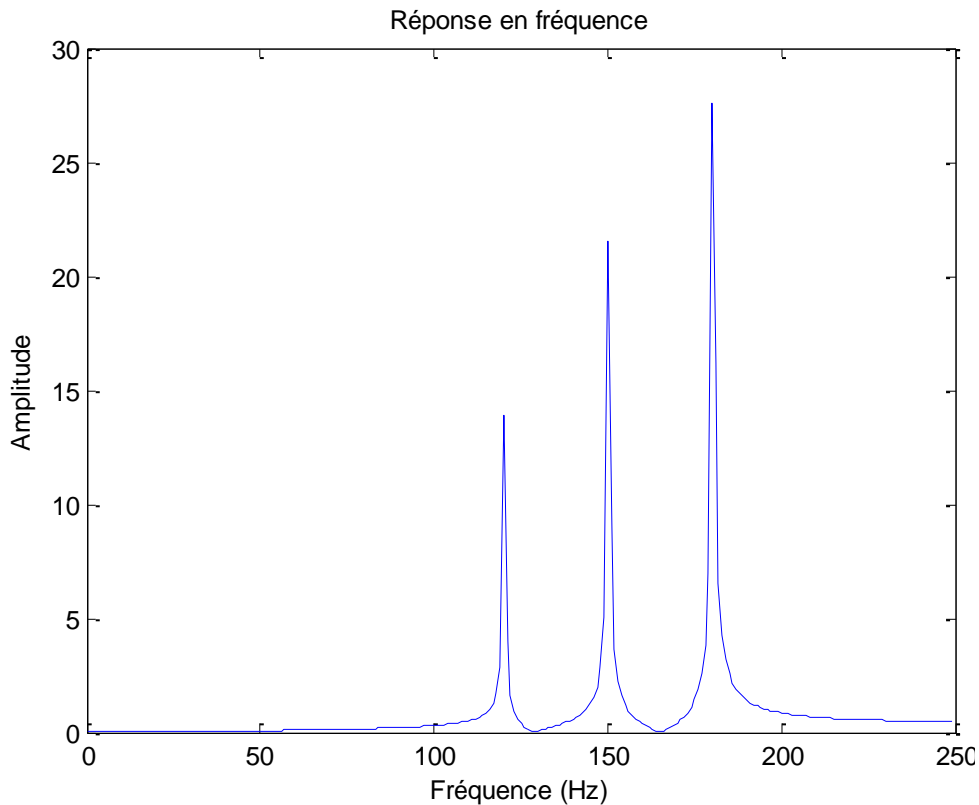
$$x(t) = a_1 \sin(2.\pi .f_1 .T_e .t) + a_2 \sin(2.\pi .f_2 .T_e .t) + a_3 \sin(2.\pi .f_3 .T_e .t) \text{ (IV.42)}$$

Les valeurs des paramètres d'entrée du programme de calcul du spectre de signal sont présentées dans le tableau suivant (Tableau. IV.9) :

**Tableau. IV.9. Paramètres d'entrée du programme de calcul du spectre de signal**

Indice	Destination	Valeur
$a_1, a_2$ et $a_3$	Les amplitudes de 1 <sup>ère</sup> , 2 <sup>ème</sup> et 3 <sup>ème</sup> harmoniques	15, 25, 35
$f_1, f_2$ et $f_3$	Les fréquences de 1 <sup>ère</sup> , 2 <sup>ème</sup> et 3 <sup>ème</sup> harmoniques	120, 150, 180
$t_{max}$	le temps maximal	$N \cdot T_e$
$N$	nombre d'échantillons	500
$T_e$	La période d'échantillonnage	0.002
Int temps	L'intervalle du temps	0 : $T_e$ : $t_{max}$

Le résultat d'exécution du programme de calcul du spectre de signal illustré dans la figure (IV.17.).



**La Fig.IV.17. Spectre fréquentiel d'un signal (résultats de simulation)**

Le programme de calcul du spectre de signal visualise un spectre fréquentiel à partir d'un signal temporel d'entrée quelconque (quel que soit la forme de signal). Il est basé sur l'équation (IV.41) de la transformation de Fourier.

La figure (IV.17.) montre que le signal temporel d'entrée transféré à un signal fréquentiel (spectre fréquentiel), à partir la transformation discrète de Fourier, on échantillonne le signal avec une période  $T_e$  (période d'échantillonnage) et la durée  $t_{max} = N \cdot T_e$  du signal (temps maximal de transfert).

La transformée de Fourier sur cette durée du signal, on déduit le spectre de signal sur  $N/2$  ( $N$  nombre d'échantillons) points dans le domaine fréquentiel.

#### **IV.5.6.La pondération des signaux par différentes fenêtres de pondération**

La représentation de la pondération des signaux pour différentes fenêtres de pondération à l'aide d'un programme écrit sous Matlab, permet de diminuer les perturbations d'un signal par l'utilisation des différentes fenêtres de pondération, le principe de ces fenêtres est de minimiser l'erreur de troncation en garantissant la continuité du signal aux extrémités.

Les fenêtres utilisées dans ce programme sont:

1- la fenêtre Rectangulaire donne par la formule suivante :

$$w = \text{boxcar (N)} \quad (\text{IV.43})$$

2- la fenêtre Hanning donne par la formule suivante :

$$w = \text{Hanning (N)} \quad (\text{IV.44})$$

3- la fenêtre Hamming donne par la formule suivante :

$$w = \text{Hamming (N)} \quad (\text{IV.45})$$

4- la fenêtre Triangulaire donne par la formule suivante :

$$w = \text{Triang (N)} \quad (\text{IV.46})$$

5- la fenêtre Bartlett donne par la formule suivante :

$$w = \text{Bartlett (N)} \quad (\text{IV.47})$$

6- la fenêtre Blackman donne par la formule suivante :

$$w = \text{Blackman (N)} \quad (\text{IV.48})$$

Avec : N : le nombre d'échantillons

La formule de la pondération d'un signal par fenêtre est de :

$$X = x . w \quad (\text{IV.49})$$

X: le signal pondéré par la fenêtre

x : le signal d'entrée

w : la fenêtre de pondération.

On suppose que le signal d'entrée sous la forme suivante :

$$x = a_1 . \text{Sin} (2\pi . f . t + \varphi) \quad (\text{IV.50})$$

Les valeurs des paramètres d'entrée du programme de la pondération des signaux par différentes fenêtres de pondération présentées dans le tableau suivant (Tableau.IV.10) :

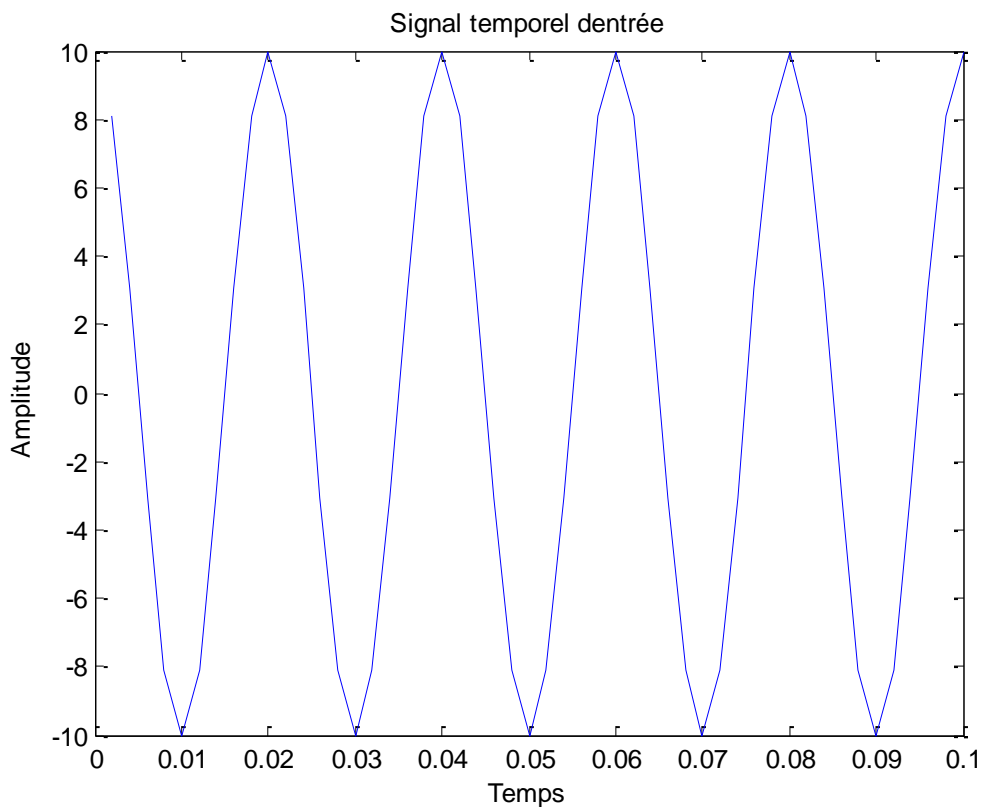
Tableau.IV.10. Paramètres d'entrée du programme de la pondération des signaux

Indice	Destination	Valeur
a <sub>1</sub>	L'amplitude de signal	10
f	La fréquence de signal	50
φ	Le déphasage de signal	0
t	La plage du temps	(0 : Te : N*Te)
N	Le nombre d'échantillons	100
Te	La période d'échantillonnage	0.002
	Le choix de la fenêtre de pondération	Soit 1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6

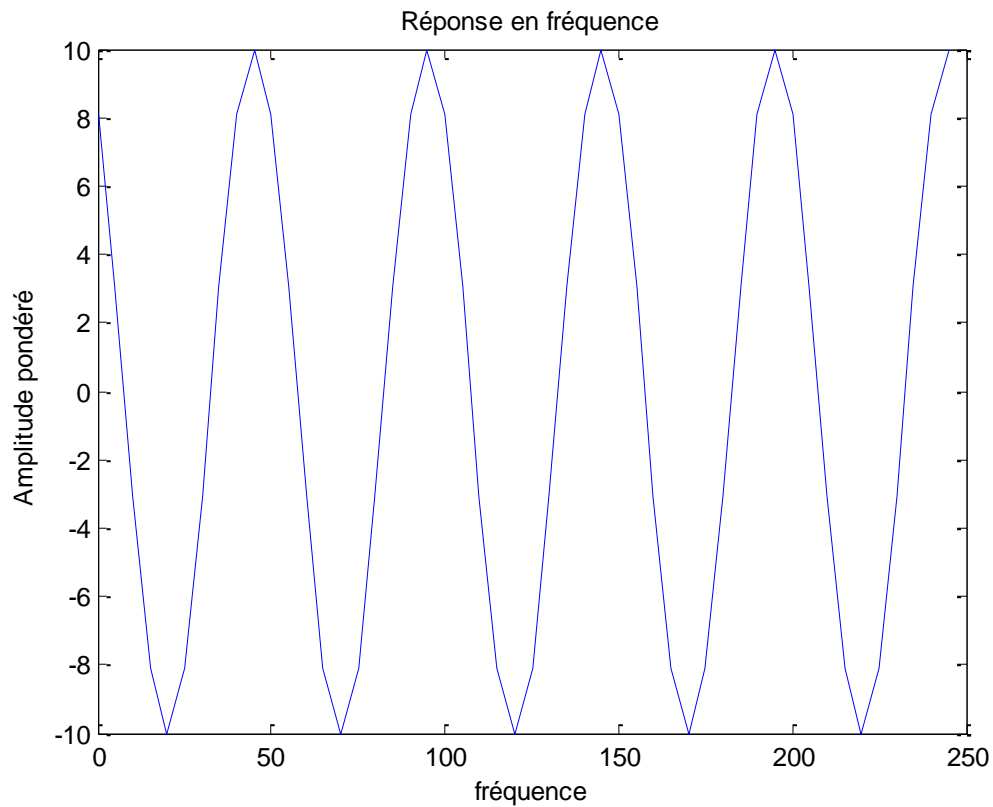
D'après les valeurs qui sont présentées dans le tableau. IV.10, le programme de la pondération des signaux par différentes fenêtres de pondération donne les résultats suivants:

- une figure de signal d'entrée
- une figure de signal pondéré
- une figure de spectre de signal pondéré

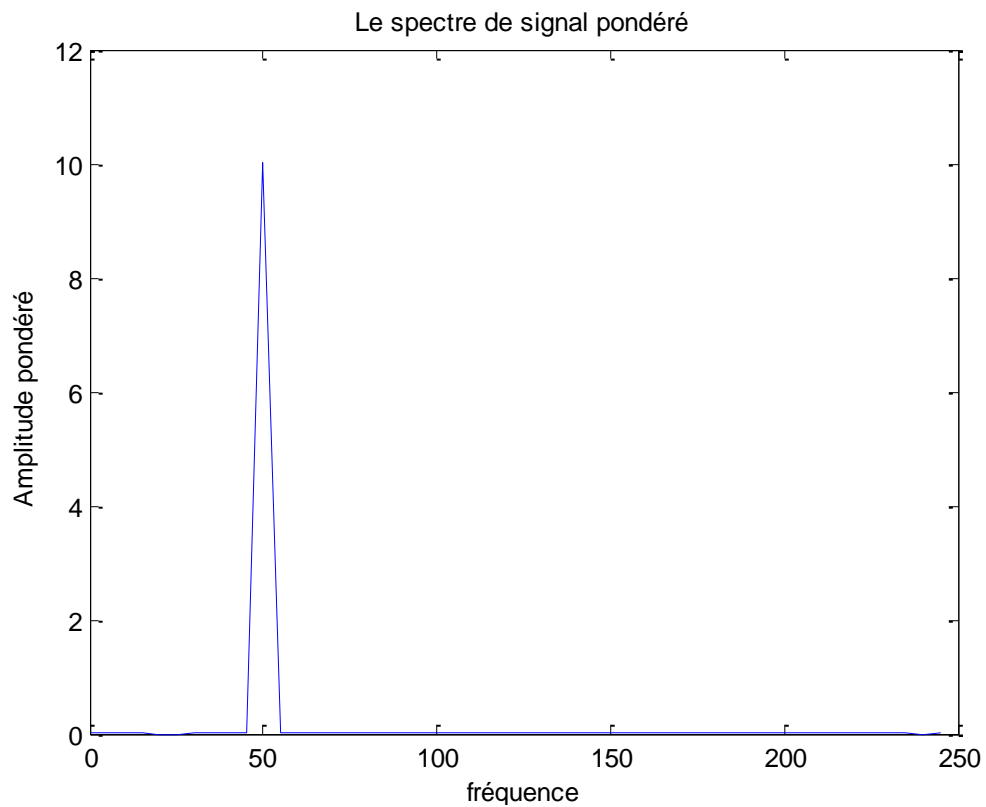
On prend la fenêtre rectangulaire comme un choix de la fenêtre de pondération de signal temporel d'entrée, on obtient les résultats suivants :



La Fig.IV.18. Le signal temporel d'entrée (résultat de simulation)



La Fig.IV.19. Le signal pondéré par la fenêtre rectangulaire (résultat de simulation)



La Fig.IV.20. Le spectre de signal pondéré par la fenêtre rectangulaire (résultat de simulation)

Les résultats obtenus par le programme de la pondération des signaux par différentes fenêtres de pondération, montrent qu'il y a un changement sur les extrémités du signal pondéré voir figure (IV.19), donc la fenêtre utilisée minimise la perturbation de signal temporel d'entrée a ses extrémités.

La figure(IV.20) montre que le fait d'avoir utilisé la fenêtre rectangulaire permet d'avoir une bonne estimation de l'amplitude et de la fréquence du signal.

**IV.6. Recommandations pour le choix du type de fenêtre**

Le tableau. IV.11 indique le type de fenêtre recommandé en fonction du type de signal et du type de renseignement recherché. La plupart des analyseurs de spectre que l'on trouve dans le commerce offrent une panoplie de fenêtres à choisir.

*Tableau. IV.11. Choix des fenêtres*

Type de signal	Fenêtre
Force d'impact	Rectangulaire
Réponse à un impact	Exponentielle
Aléatoire	Hanning

**IV.7.Effet du fenêtrage dans l'analyse de Fourier**

Les fenêtres d'analyse ou de pondération jouent un rôle très important dans l'observation spectrale. Une fenêtre est caractérisée par :

- la largeur de son lobe principal, elle fixe la résolution de l'analyse, c'est-à-dire l'aptitude à pouvoir séparer deux fréquences proches l'une de l'autre.
- les amplitudes des lobes secondaires, ils fixent la dynamique de l'analyse, c'est-à-dire l'aptitude à mesurer les amplitudes très différentes de deux composantes de fréquence relativement éloignées l'une de l'autre.

Pour un nombre d'échantillons N fixé la fenêtre rectangulaire est celle qui donne la meilleure résolution; la largeur du lobe principal est égale à  $2F_e/N$ . La fenêtre rectangulaire ne permet pas par contre d'obtenir une bonne dynamique car les lobes secondaires décroissent très lentement. En général on caractérise une fenêtre par l'atténuation A (en dB) du premier lobe secondaire. Dans le cas d'une fenêtre rectangulaire, A est égal à 13 dB; cette valeur est indépendante du nombre de points N. Pour obtenir une meilleure dynamique, on construit d'autres fenêtres; Triangulaire, Hanning, Hamming, Blackman ... .

La fenêtre de Hanning, Hamming et Blackman sont des fenêtres dites trigonométriques. On peut remarquer que toutes ces fenêtres ont un lobe principal plus large que  $2F_e/N$ , ( $4F_e/N$  pour Hanning, Hamming et  $6F_e/N$  pour Blackman) [46], donc une résolution moins bonne que la fenêtre rectangulaire. Elles ont par contre des lobes secondaires plus faibles que ceux de la fenêtre rectangulaire, elles offrent donc une meilleure dynamique. On peut se poser la question : pourquoi ces différentes fenêtres ? le choix d'une fenêtre se fait en fonction de l'écart en fréquence entre les deux composantes de fréquence dont on veut mesurer les amplitudes. Prenons le cas par exemple des fenêtres de Hanning et Hamming, si les deux fréquences à distinguer sont relativement proches l'une de l'autre, une fenêtre de Hamming s'impose car le premier lobe secondaire, ainsi que les suivants, sont à environ -45 dB du lobe principal, par contre si l'écart entre les deux fréquences est grand une fenêtre de Hanning est mieux appropriée car l'atténuation des lobes décroît quand la fréquence augmente et elle peut être inférieure à -45 dB.

#### **IV.8. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons modélisé le comportement physique de l'accéléromètre piézoélectrique, dont le modèle développé de la partie mécanique montre deux formules importantes d'où la première est l'expression du mouvement relative en fonction du taux d'amortissement, la fréquence naturelle de l'accéléromètre et la fréquence relative du mouvement et la deuxième formule exprime l'erreur de mesure en fonction des paramètres de l'accéléromètre, par contre la nouvelle formule de la sensibilité relative relie les paramètres électriques et mécaniques de l'accéléromètre. Nous avons fait des tests de simulation pour valider ce modèle développé et d'après les résultats obtenus, nous avons constaté que le choix approprié du taux d'amortissement est de 0.68. Ce choix permet de minimiser l'erreur de mesure à une valeur réduite égale à 0.28%, agrandir la précision de mesure à une valeur égale à 99.72% et limiter la variation de la sensibilité relative à une valeur ne dépasse pas à 0.62%.

Pour comprendre le traitement du signal de sortie de l'accéléromètre piézoélectrique, nous avons étudié les différentes opérations de traitement de signal telles que la génération des signaux, décomposition des signaux, calcul du spectre de signal, pondération des signaux.