

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR UNIVERSITY – ANNABA  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA



جامعة باجي مختار – عنابة

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT  
DEPARTEMENT D'ELECTROMECHANIQUE

## THESE DE DOCTORAT

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT en Electromécanique

Thème

*Modélisation, simulation et analyse expérimentale du capteur  
de vibration (accéléromètre)*

Option : ELECTROMECHANIQUE

CANDIDAT

GHEMARI Zine

DIRECTEUR DE THESE : Dr Saad Salah

Pr

Université Annaba

Devant le jury:

PRESIDENT :

Dr HADDOUCHE Ali

Pr

Université Annaba

EXAMINATEURS:

Dr HARKAT M<sup>ED</sup> Faouzi

Pr

Université Annaba

Dr LACHOURI Abderrazek

MC(A)

Université Skikda

Dr BOULOUEH Messaoud

MC(A)

Université Guelma

Dr BENSLIMENE Tarak

MC(A)

Université de M'sila

2013

## Remerciement

Je tiens à remercier Mr Salah Saad professeur à l'université Badji Mokhtar, Annaba directeur de ma thèse, pour m'avoir confié et dirigé ce projet et qui n'a jamais manqué de me conseiller et de m'orienter tout au long de ces années de travail. Il a été patient, compréhensif et attentif. Il a largement contribué à renforcer la qualité de ce travail.

Mes remerciements vont également à Mr Haddouche Ali et Mr M.F Harkat professeurs à l'université Badji Mokhtar, Annaba, Mr Abderrazek Lachouri maitre de conférence à l'université 20 août 1955-Skikda, Mr Messaoud Boulouh maitre de conférence à l'université 08 Mai 1945-Guelma et Tarek Benslimene maitre de conférence à l'université de M'sila, pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

Je tiens spécialement à remercier mes collègues du département génie électrique, faculté de technologie, université de M'sila et du département électromécanique université Badji Mokhtar Annaba pour leur soutien et disponibilité.

Des remerciements sincères pour mon père et ma mère qui m'ont toujours aidé et qui m'ont permis d'arriver au plus haut niveau d'étude.

Un gros merci à ma famille, mes frères et ma sœur. Finalement, Je remercie beaucoup ma femme et ma fille Maria pour leur soutien moral.

## Résumé

Le modèle mathématique de l'accéléromètre est développé pour déterminer les équations du module de mouvement relatif et l'erreur de mesure en fonction du taux d'amortissement et du rapport de fréquence. Ces équations sont utilisées pour calculer le module de mouvement relatif et l'erreur de mesure, puis les essais sont effectués pour choisir le taux d'amortissement pour minimiser l'erreur de mesure à 1%. Le principal avantage du modèle développé est l'amélioration du taux d'amortissement et l'erreur de mesure de l'accéléromètre.

A partir du modèle développé, la fréquence de mouvement relatif qui convient à l'accéléromètre pour éviter le cas de résonance doit être égale ou inférieure à  $1/3$  de la fréquence naturelle de l'accéléromètre. Par conséquent, pour améliorer le taux d'amortissement et la fréquence de mouvement relatif, l'erreur de mesure doit être réduite afin d'obtenir une valeur précise du module de mouvement relatif. Les tests réalisés par simulation et par expérimentation pour valider et confirmer le modèle développé ont prouvé que la précision de mesure et la fiabilité de l'accéléromètre ont été améliorés.

### Mots clés :

Capteur, Erreur, Modélisation, Simulation, Vibration

## **Abstract**

The developed accelerometer mathematical model enables to determine the equations of relative movement modulus and measurement error with respect to damping rate and frequency ratio. These equations are used to calculate the relative movement modulus and measurement error, and then tests are conducted to choose the damping rate to minimize measurement error of relative movement to 1 %. Therefore, the main advantage of the developed model is the improvement of the damping rate and precision error of the accelerometer.

From the developed model, the relative movement frequency that suits the accelerometer to avoid resonance must be equal or less than  $1/3$  of accelerometer natural frequency. Moreover, to improve damping rate and relative movement frequency, the measurement error must be reduced to obtain a precise value of relative movement modulus. The conducted tests by computer simulation and experiments to validate and confirm the developed model have proved that measurement precision and reliability of the accelerometer were improved.

## **Index Terms**

Sensor, Vibration, Simulation, Error, Modelling

## ملخص

تم تطوير نموذج رياضي لملتقط الاهتزازات لكي نقوم بتحديد معادلات مقياس الحركة النسبية و خطأ القياس بدلالة معامل التخميد و نسبة التواتر. هذه المعادلات تستعمل في حساب مقياس الحركة النسبية و خطأ القياس, ثم قمنا بتجارب لاختيار معامل التخميد الذي يخفض خطأ القياس إلى 1%. الهدف الأساسي من تطوير هذا النموذج الرياضي هو تحسين معامل التخميد و خطأ القياس لملتقط الاهتزازات.

انطلاقاً من النموذج الرياضي المطور, تواتر الحركة النسبية المناسبة لملتقط الاهتزازات لتجنب ظاهرة التجاوب هو  $1/3$  من تواتر الطبيعي لملتقط الاهتزازات. و من جهة أخرى لكي نحسن معامل التخميد و تواتر الحركة النسبية, يجب تخفيض خطأ القياس ونتحصل أيضاً على قيمة دقيقة لمقياس الحركة النسبية. الاختبارات المنجزة بالمحاكاة و بالتجارب أعطت مصداقية النموذج المطور و عن طريقها تم تحسين دقة القياس و فعالية ملتقط الاهتزازات.

## Table de matières

L'introduction générale .....	01
<b>Chapitre I : L'analyse vibratoire des machines tournantes</b>	
I.1. L'introduction .....	04
I.2. La maintenance et ses types.....	05
1.2.1. La définition de la maintenance.....	05
1.2.2. Les méthodes de gestion de maintenance.....	05
1.2.3. Les différents types de maintenance.....	05
1.2.3.1. La définition de la maintenance corrective.....	06
1.2.3.2. La définition de la maintenance préventive.....	06
I.3. Le principe de la maintenance conditionnelle.....	07
I.3.1. Les différentes techniques de la maintenance préventive conditionnelle.....	08
I.3.1.1. L'analyse vibratoire.....	08
I.3.1.2. L'analyse des huiles.....	08
I.3.1.3. La technique de la thermographie.....	08
I.3.1.4. L'analyse acoustique.....	08
I.3.2. Le choix de la technique de surveillance.....	09
I.3.2.1. La comparaisons entre les techniques de maintenance préventive conditionnelle.....	09
I.3.2.2. Les techniques de détection.....	11
I.3.3. Les avantages et inconvénients de la maintenance préventive conditionnelle.....	11
I.4. Les objectifs de la maintenance préventive conditionnelle.....	12
I.4.1. Amélioration de la fiabilité des éléments du système.....	12
I.4.2. Assurer la qualité des produits.....	12
I.4.3. Améliorer l'organisation des tâches.....	12
I.4.4. Garantir la sûreté de fonctionnement.....	12
I.4.5. Développement la gestion des stocks.....	12
I.4.6 Améliorer le climat de relation humaine.....	12
I.4.7 Réduction du coup global de la maintenance.....	13
I.5. Le choix d'une stratégie de maintenance.....	13
I.6. La surveillance, le diagnostic et le suivi.....	15
I.7. L'analyse vibratoire.....	16
I.7.1 L'objectif de l'isolation vibratoire.....	16

I.7.2 Le principe physique de l'isolation vibratoire .....	17
I.7.3. Les outils de l'analyse vibratoire.....	18
I. 7.3.1. Le capteur de vibrations.....	18
I. 7.3.2. L'équipement d'analyse.....	19
I.8. Les vibrations.....	19
I.8.1. La notions de vibration.....	19
I.8.2. L'origine des vibrations d'une machine tournante électrique et leur mesure.....	20
I.8.3. La naissance d'une vibration.....	24
I.8.4. L'évaluation du niveau de vibration (Amplitude).....	26
I.8.5. Les grandeurs associées à l'amplitude d'une vibration.....	27
I.8.6. Détermination des fréquences d'un signal.....	28
I.8.7. La nature de vibration.....	30
I.9. La conclusion.....	30
<b>Chapitre II : Le capteur de vibration</b>	
II.1. L'introduction.....	32
II.2. La chaine de mesure de vibration.....	32
II.2.1. L'importance de la précision de mesure.....	33
II.2.2. Le signal émis.....	34
II.3. Le capteur.....	34
II.3.1. Les différentes grandeurs d'influence du capteur.....	35
II.3.2. Le capteur de vibration.....	35
II.4. Les différents types de capteurs de vibration.....	35
II.4.1 L'accéléromètre à détection capacitive.....	36
II.4.2 L'accéléromètre à détection piézorésistive.....	37
II.4.3. L'accéléromètre à détection à base de piezojonction de transistor.....	38
II.4.4. L'accéléromètre à détection piézoélectrique.....	38
II.4.5 L'accéléromètre à détection à effet tunnel.....	39
II.4.6 L'accéléromètre à détection à structures résonantes.....	40
II.4.7 L'accéléromètre à détection optique.....	41
II.4.8 L'accéléromètre à détection thermique.....	41
II.4.9 Quelques détections originales.....	42
II.5. Le choix d'un capteur .....	43
II.6. Les accéléromètres piézoélectriques.....	44
II.6.1. Le principe de fonctionnement.....	44
II.6.2. Les caractéristiques métrologiques.....	46

II.6.2.1. La sensibilité et la réponse en fréquence.....	46
II.6.2.2. L'étendue de mesure (E.M.), linéarité.....	47
II.6.3. La réponse d'un accéléromètre.....	48
II.6.3.1. La fixation des capteurs.....	49
II.6.3.2. Les modes de fixation.....	50
II.6.4. Les grandeurs d'influence du capteur piézoélectrique.....	51
II.6.4.1. La température.....	51
II.6.4.2. Le vieillissement.....	51
II.6.4.3. Le bruit dus au câble de liaison.....	52
II.6.4.4. Le bruits dus à la pression acoustique ambiante.....	52
II.6.4.5. Le décalage de zéro.....	52
II.7. La conclusion.....	53
<b>Chapitre III : Modélisation et simulation du capteur de vibration (accéléromètre)</b>	
III.1. L'introduction.....	54
III.2. Le générateur de vibration (vibrateur) .....	55
III.2.1. Le vibrateur électrodynamique.....	55
III.2.2. Le vérin hydraulique.....	56
III.2.3. Le générateur de vibration harmonique.....	56
III.2.4. Le générateur des forces aléatoires connus.....	57
III.2.5. La génération de vibration par choc.....	57
III.2.6. La génération de vibration par un marteau d'impact.....	58
III.2.7. L'effet de l'embout du marteau.....	58
III.3. La modélisation et son objectif.....	59
III.3.1. Le modèle.....	59
III.3.2. Les différents types de modèles.....	60
III.3.2.1. Le modèle mathématique.....	60
III.3.2.2. Le modèle d'état .....	60
III.3.2.3. Le modèle de données (Fichiers).....	60
III.3.2.4. Le modèle à base de règles (Linguistique).....	60
III.3.2.5. Le modèle graphique.....	60
III.3.3. Les deux techniques de la modélisation.....	60
III.3.4. Les méthodes de la modélisation.....	61
III.3.4.1 La méthode de modélisation au niveau système.....	61
III.3.4.2 1 La méthode de modélisation comportementale.....	61



III.3.4.3 1 La méthode de modélisation au niveau composant.....	62
III.3.4.4 1 La méthode de modélisation au niveau physique.....	62
III.3.5. L'outil de simulation.....	63
III.3.6. Le logiciel de simulation (MATLAB).....	63
III.4. Le développement du modèle de l'accéléromètre.....	63
III.4.1. La modélisation et la simulation du module du mouvement relatif de l'accéléromètre.....	64
III.4.2. La modélisation et la simulation de l'erreur de mesure de l'accéléromètre.....	69
III.4.2.1. La modélisation de l'erreur de mesure.....	69
III.4.2.2. La simulation de l'erreur de mesure.....	69
III.4.3. L'essais pour améliorer le choix du taux d'amortissement de l'accéléromètre	72
III.4.3.1. Le premier essai.....	72
III.4.3.2. Le deuxième essai.....	73
III.4.4. La modélisation et la simulation du module du mouvement relatif et l'erreur de mesure de l'accéléromètre.....	74
III.4.4.1. La modélisation du module du mouvement relatif et l'erreur de mesure.	74
III.4.4.2. La simulation du module de mouvement relatif et l'erreur de mesure de l'accéléromètre.....	74
III.4.5. Expérimentations.....	76
III.4.6. Les résultats et les discussions.....	78
III.5. La conclusion.....	80
La conclusion générale.....	81
La bibliographie.....	82

## Liste des figures

### Chapitre I Analyse vibratoire des machines tournantes

Fig. I.1	L'organigramme des différents types de maintenance.....	05
Fig. I.2	L'intervention de la maintenance conditionnelle .....	07
Fig. I.3	Le temps d'intervention de la maintenance et son impact sur la production ...	08
Fig. I.4	La fonction globale d'une stratégie de maintenance préventive conditionnelle.....	13
Fig. I.5	La durée de vie optimale.....	14
Fig. I.6	La stratégie de la maintenance.....	15
Fig. I.7	Une transmission vibratoire par une machine tournante.....	17
Fig. I.8	Les éléments constituent la chaîne de mesure .....	18
Fig. I.9	Accéléromètre piézoélectrique.....	19
Fig. I.10	Organigramme des types de vibration.....	20
Fig. I.11	La réponse mécanique d'une structure.....	20
Fig. I.12	Origine des vibrations sur les machines tournantes.....	22
Fig. I.13	Nuisance d'une vibration.....	22
Fig. I.14	Une machine tournante vibre.....	23
Fig. I.15	Le placement du capteur de vibration et le signal capté.....	24
Fig. I.16	Les différentes positions correctes du placement du capteur.....	24
Fig. I.17	Enregistrement de la courbe (Amplitude Temps).....	25
Fig. I.18	Le signal de mouvement vibratoire.....	25
Fig. I.19	La valeur crête à crête.....	26
Fig. I.20	Les amplitudes d'un signal vibratoire quelconque.....	26
Fig. I.21	La vibration est caractérisée par 3 grandeurs (déplacement, vitesse et accélération).....	27
Fig. I.22	Grandeurs associées à l'amplitude d'une vibration.....	28
Fig. I.23	La somme de deux signaux sinusoïdaux.....	29
Fig. I.24	Le spectre d'un signal sinusoïdale.....	29
Fig. I.25	Un signal de 3 sinus et un spectre de 3 pics.....	30
Fig. I.26	La représentation temporelle de chaque nature de vibration .....	30
<b>Chapitre II Le capteur de vibration</b>		
Fig.II.1	Les composants de la chaîne de mesure.....	33
Fig.II.2	La fonction essentielle du capteur.....	34
Fig.II.3	Le principe de l'accéléromètre capacitif.....	36
Fig.II.4	Accéléromètre à détection capacitive.....	37
Fig.II.5	Principe de l'accéléromètre à détection piézorésistive.....	38
Fig.II.6	Un accéléromètre piézoélectrique à trois axes .....	39
Fig.II.7	Un accéléromètre à effet tunnel.....	40
Fig.II.8	Un accéléromètre résonnant .....	40
Fig.II.9	Un accéléromètre optique.....	41
Fig.II.10	Un accéléromètre thermique.....	42
Fig.II.11	Un accéléromètre à lévitation électromagnétique.....	43
Fig.II.12	Coupes d'accéléromètres piézoélectriques à compression axiale.....	44
Fig.II.13	Constitution des accéléromètres piézoélectriques à cisaillement; montage...	45

Fig.II.14	Principe d'un accéléromètre piézoélectrique à montage en porte-à-faux.....	46
Fig.II.15	Courbe de réponse d'un accéléromètre.....	49
Fig.II.16	Choix directionnel pour la prise de mesure.....	49
Fig.II.17	Réponse d'un accéléromètre en fonction de la fréquence selon le mode fixation.....	50
<b>Chapitre III</b> Modélisation et simulation du capteur de vibration		
Fig.III.1	La méthode de l'AME et ses utilisations .....	54
Fig.III.2	Organigramme de la chaîne de mesure.....	55
Fig.III.3	Un exemple du vibreur électrodynamique.....	56
Fig.III.4	Un signal harmonique.....	56
Fig.III.5	Un balayage en fréquence.....	56
Fig.III.6	Un signal vibratoire aléatoire.....	57
Fig.III.7	L'impact de Dirac.....	57
Fig.III.8	L'impact réel.....	58
Fig.III.9	Génération des vibrations par un marteau d'impact.....	58
Fig.III.10	Effet du choix de l'embout du marteau.....	59
Fig.III.11	Les deux techniques de la modélisation.....	61
Fig.III.12	Modélisation d'un accéléromètre.....	64
Fig.III.13	Module du mouvement relatif en fonction de $\zeta$ .....	65
Fig.III.14	Module du mouvement relatif en fonction de $\zeta$ dans la résonance.....	66
Fig.III.15	Le module de mouvement relatif en fonction du taux d'amortissement.....	67
Fig.III.16	Module du mouvement relatif en fonction du taux d'amortissement et la fréquence relative.....	68
Fig.III.17	L'erreur de mesure de l'accéléromètre.....	69
Fig.III.18	L'erreur de mesure de l'accéléromètre dans le cas résonance.....	70
Fig.III.19	L'erreur de mesure en fonction du taux d'amortissement.....	71
Fig.III.20	L'erreur de mesure en fonction du rapport fréquentiel et le taux d'amortissement.....	72
Fig.III.21	Résultats du premier essai.....	73
Fig.III.22	Résultats du deuxième essai.....	74
Fig.III.23	l'erreur de mesure en fonction du module du mouvement relatif.....	75
Fig.III.24	l'erreur de mesure en fonction du module du mouvement relatif (cas de résonance).....	76
Fig.III.25	La chaîne de mesure de l'essai expérimentale.....	76
Fig.III.26	Comparaison entre deux courbes présentes l'erreur de mesure en fonction de la fréquence relative.....	78

<b>Liste des tableaux</b>		
<b>Chapitre I</b> Analyse vibratoire des machines tournantes		
Tableau. I.1	Comparaison des outils de maintenance préventive conditionnelle.....	10
Tableau. I.2	Les défauts selon les techniques de détection.....	11
<b>Chapitre III</b> Modélisation et simulation du capteur de vibration		
Tableau.III.1	Paramètres du module de mouvement relatif.....	65
Tableau.III.2	Les données utilisées pour la détermination de l'erreur de mesure de l'accéléromètre.....	69
Tableau.III.3	Les données de première essai.....	72
Tableau.III.4	Les données du deuxième essai.....	73
Tableau.III.5	Les paramètres d'entrée du programme de simulation du module de mouvement relatif et l'erreur de mesure d'un accéléromètre.....	75
Tableau.III.6	Les résultats de simulation.....	75
Tableau.III.7	Résultats de l'essai expérimental et de simulation.....	77

<b>Nomenclature</b>		
Indice	Désignation	L'unité
<b>Chapitre I</b>		
I <sub>PC</sub>	Intervention préventive conditionnelle	
Δt	La différence entre t <sub>admissibilité</sub> et t <sub>alarme</sub>	s
t <sub>admissibilité</sub>	Le temps d'admissibilité	s
t <sub>alarme</sub>	Le temps d'alarme	s
CG	Le coût global	
CA	Le coût d'achat	
CTM	Le coût total de maintenance	
VRE	La valeur de revente éventuelle	
CF	Le coût de fonctionnement	
X	Le déplacement	m
A	L'amplitude	m
ω	L'impulsion	rad/s
t	Le temps	s
T	La période	s
F	La fréquence	Hz
N	La vitesse de rotation	tour/min
CPM	Un cycle par minute	
RPM	Une rotation par minute	
Ac	L'amplitude crête	m
ACC	L'amplitude crête à crête	m
A <sub>eff</sub>	L'amplitude efficace	m
RMS	Root mean square (amplitude efficace)	m
VRMS	Valeur d'amplitude efficace	m
V <sub>eff</sub>	Valeur efficace	m
V <sub>c</sub>	Valeur crête	m
V	La vitesse	m/s
γ	L'accélération	(m/s) <sup>2</sup>
S	Une fonction périodique	
φ	Déphasage	
<b>Chapitre II</b>		
m	Mesurande	
s	Signal électrique	
ΔS	La grandeur de sortie	
Δm	La grandeur d'entrée	
F	La force	N
A	L'accélération	(m/s) <sup>2</sup>
M	La masse	Kg
Q	La charge électrique	
S	La sensibilité	
S <sub>1</sub>	La sensibilité mécanique du système à masse sismique	
S <sub>2</sub>	La sensibilité électrique du capteur piézoélectrique	

d	La constante piézoélectrique	
c	La raideur de l'élément sensible	
$\omega_c$	La pulsation de coupure basse de l'ensemble capteur + conditionneur	Rad/s
$\omega$	La fréquence relative	Hz
$\omega_0$	La fréquence naturelle	Hz
z	Le déplacement	m
$\xi$	Le taux d'amortissement	
<b>Chapitre III</b>		
m	La masse	Kg
k	Le coefficient d'élasticité	
c	Le coefficient de frottement	
z	Le mouvement relatif	m
$\omega_n$	La fréquence naturelle de l'accéléromètre	Hz
$\xi$	Le taux d'amortissement	
Y	L'amplitude de mouvement	m
Z	Le module de mouvement relatif	m
E	L'erreur de mesure	

# Introduction générale

## **L'introduction générale**

Pendant ces dernières décennies, la surveillance et le diagnostic des machines tournantes par l'analyse des vibrations sont devenus un outil efficace pour détecter les défauts et suivre leurs évolutions dans le temps, ce qui permettra de projeter un plan d'entretien prédictive. Dans le but d'améliorer le système de surveillance et le diagnostic des équipements industriels beaucoup de chercheurs ont travaillé sur le développement et la conception des capteurs de vibration. Certain travaux [1] ont décrit le capteur de vibration de résonance réalisé à l'aide un micro-usinage du silicium pour la surveillance de l'usure des machines tournantes. D'autres [2] ont démontré une amélioration de la performance des capteurs de vibrations sans contact basés sur des lasers à semi-conducteurs à cavité externe. Cette technique réduit les pics spectraux dans les lasers à cavité externe avec rétroaction optique modérée par modulation du courant continu. Un nouveau capteur de vibrations micro-optique est réalisé en combinant "optique intégrée" et "micro-usinage" sur les technologies de silicium a été présenté par Ollier et al [3]. La sensibilité et large gamme de fréquence a été obtenue en utilisant une section multi-mode dans le circuit de détection optique. Tandis que le développement d'un nouveau capteur de vibration à fibre optique de type boucle à l'aide d'une fibre optique classique a été conçu par Oshawa et al [4]. Le principe de la détection de ce capteur est basé sur l'effet Doppler à fibre optique courbée, et la fréquence des ondes lumineuses transmises à travers une fibre courbée est décalée par vibration à la zone courbée. La proposition d'un nouveau capteur tactile utilisant la vibration piézoélectrique a été faite par Motoo et al [5]. Il comprend deux matériaux piézoélectriques, l'un est utilisé pour la vibration de l'élément capteur et l'autre est utilisé pour la mesure de la variation de l'impédance mécanique induite par une force externe.

Le travail de Sebastia, J.P et al [6] présente un détecteur de vibrations à faible coût et à faible consommation d'énergie basée sur la mesure des variations du champ magnétique induit dans un récent SS501 magnétorésistance géante (GMR) de capteur magnétique, qui n'a jamais été appliquée. La vibration sur les petites pièces ferromagnétiques perturbe le champ magnétique de la terre. Ces perturbations faibles peuvent être détectés et mesurés sur le champ magnétique de la terre supposée constante, qui est uniforme sur une large zone. Une nouvelle configuration de réseau de trois capteurs GMR en demi-pont alimenté en chaîne est utilisé pour mesurer des variations de champ magnétique dans les directions X, Y, et Z avec une très faible consommation électrique. Un système de détection des vibrations à double fibre optique avec un nouveau type de membrane a été exposé par Li, Rui et al [7]. Ce capteur est basé sur une modulation d'intensité optique et caractérisé par la membrane utilisée pour détecter les vibrations. Tandis que Li Xuejun et Al [8] ont développé un nouveau procédé de fusion de données sur la base de la fonction de



corrélation pour déterminer la valeur pondérée qui améliore la précision de la mesure du signal vibratoire dans le processus de diagnostic des défauts des machines tournantes. Le procédé ne nécessite pas de connaître la connaissance a priori sur les capteurs, et la valeur pondérée des capteurs peut être déterminée sur la base de la mesure de corrélation des données en temps réel testés dans le processus de fusion. Par contre Yuelan Lu et Al [9] ont conçu un capteur de vibration distribué en utilisant la détection hétérodyne et de traitement du signal de déplacement moyen et le déplacement différentiel de la phase de temps réflectométrie optique de domaine. Les composantes à large bande de fréquences acoustiques générées par vibration crayon de rupture ont été mesurées et identifiées par notre emplacement capteur de vibrations distribuée pour la première fois. Le capteur de vibration de mode multi-longitudinal à fibre optique a été présenté par Liang Gao et Al [10]. La fréquence de battement de deux modes laser différentes est modulée par le signal de vibration. Le signal de battement peut être modulé en fréquence démodulé par un démodulateur à modulation de fréquence. Il est démontré que la vibration de 60 Hz à 20 KHz peut être mesurée avec succès. Récemment Sukwon Choi et Al [11] ont proposé un système de suivi de pipeline basé sur des capteurs piézoélectriques pour remplacer l'actuel système de détection ayant une consommation d'énergie élevé. La majorité des travaux réalisés ces dernières années sont axés sur la conception des capteurs, peu de travaux ont été réalisés sur l'amélioration des performances du capteur de vibration par la réduction de son erreur de mesure ou l'augmentation de sa sensibilité.

Actuellement, l'erreur de mesure des différents types des capteurs de vibration (accéléromètres) est estimée à plus de 5%. Cette valeur influe négativement sur le résultat de mesure réalisé par le capteur de vibration. C'est pour cette raison que nous nous sommes intéressés à la réduction de l'erreur de mesure et augmentation de la précision du capteur pour que la valeur mesurée du niveau de vibration soit proche de la valeur réelle. Pour atteindre cet objectif notre mémoire est structurée en trois chapitres dans les lignes directrices 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 présente la notion de capteur en général et le capteur de vibration en particulier.

Le troisième chapitre est la partie spéciale de cette thèse où on a présenté la modélisation, simulation et l'analyse expérimentale du capteur de vibration. Un modèle mathématique convenable à ce capteur a été développé. Ce dernier a été validé en utilisant un programme de simulation sous MATLAB qui calcule le module de mouvement relatif et son erreur de mesure. Le modèle développé facilite le choix de la gamme de fréquence proportionnelle à

## -----Introduction générale-----

l'accéléromètre et son taux d'amortissement cela permet d'améliorer les performances du capteur étudié. Finalement, une validation par des essais expérimentaux a été réalisés et les résultats obtenue ont été comparés et analysés.

Une conclusion générale qui résume les résultats obtenus et leur importance ainsi que les perspectives ont été donnés à la fin de ce travail.

# **Chapitre I : Analyse vibratoire des machines tournantes**

I.1. Introduction

I.2. La maintenance et ses types

I.3. Le principe de la maintenance conditionnelle

I.4. Les objectifs de la maintenance préventive conditionnelle

I.5. Le choix d'une stratégie de maintenance

I.6. Surveillance, diagnostic et suivi

I.7. L'analyse vibratoire

I.8. Les vibrations

I.9. Conclusion

# Chapitre I

## L'analyse vibratoire des machines tournantes

### I.1. L'introduction

Une entreprise doit exploiter ces équipements d'une manière efficace dans le but d'améliorer la qualité et le coût du produit et augmenter aussi la production. Une bonne gestion de la maintenance des équipements est le meilleur moyen qui permet d'atteindre cet objectif en prenant en considération les aspects techniques, économiques et financiers des différentes méthodes utilisées.

Le niveau de performance d'une installation industrielle dépend directement de la fonction maintenance. L'optimisation de cette dernière est une opération complexe car elle doit prendre en considération des critères parfois contradictoires tels que la disponibilité et les coûts [12], [13]. Les critères qui influent sur la maintenance d'une installation industrielle sont : le type de maintenance, les types de tâches et leur fréquence et aussi le niveau d'intervention.

L'objectif principal de la maintenance est de réduire au minimum la défaillance des équipements pour éviter les arrêts de production. L'augmentation de la fiabilité des équipements et la maîtrise des défaillances et des pannes dépend du développement de la maintenance préventive.

La maintenance joue un rôle très important dans le domaine industriel, la plus parts des industries appliquent la politique de maintenance pour réduire ou éliminer les réparations inutiles, empêcher les pannes des installations industrielles et minimiser l'impact négatif de l'opération de maintenance sur le rendement des entreprises.

La maintenance préventive conditionnelle est la plus utilisable dans les différents organismes industriels car sa surveillance et son suivi ne nécessitent pas l'arrêt de production.

Généralement la machine tournante en opération génère des efforts qui causent par fois la défaillance des éléments de la machine. Pour réaliser un bon diagnostic, il faut choisir l'outil de la maintenance préventive conditionnelle tel que l'analyse vibratoire, analyse des huiles, thermographies ...etc.

Pour la détection précoce de la plupart des défauts rencontrés sur les machines de production, il faut réalisées des mesures suivi par des techniques d'analyse sur les machines en fonctionnement (par exemple l'analyse vibratoire). Les différents défauts captés par la technique de l'analyse vibratoire sont : le désalignement des arbres, le mauvais accouplement

des machines, la dégradation des accouplements, les jeux, l'usure des roulements et même les défauts électriques peuvent être détectés suffisamment tôt pour planifier une intervention avant la panne.

Dans ce chapitre, l'analyse vibratoire est largement décrite et expliquée pour montrer son importance dans le but de prévoir et détecter les pannes des équipements (maintenance préventive conditionnelle). Cette méthode est riche en information et son objectif principal est d'éviter les pannes des machines tournantes.

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

**1.2.1. La définition de la maintenance**

La maintenance est définie dans la norme NF EN 13306 comme un ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de gestion pendant la durée de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction bien déterminée [14].

**I.2.2. Les méthodes de gestion de maintenance**

Deux directions concernant les procédures de maintenance dans l'industrie sont nécessaires:

La première, pendant l'arrêt ou le ralentissement de la production, les ingénieurs de maintenance profitent pour inspecter les machines. La seconde approche est de réagir à une panne lorsqu'elle se produit [15].

**I.2.3. Les différents types de maintenance**

L'organigramme illustré dans la Fig. I.1 montre les deux types de maintenance (préventive et corrective) et résume leur fonction.

On remarque que la maintenance préventive est divisée en deux types de maintenance :

- 1- maintenance systématique,
- 2- maintenance conditionnelle qui conduit à la maintenance prévisionnelle programmée pour diagnostic précis de l'état de l'installation effectué pendant le fonctionnement.

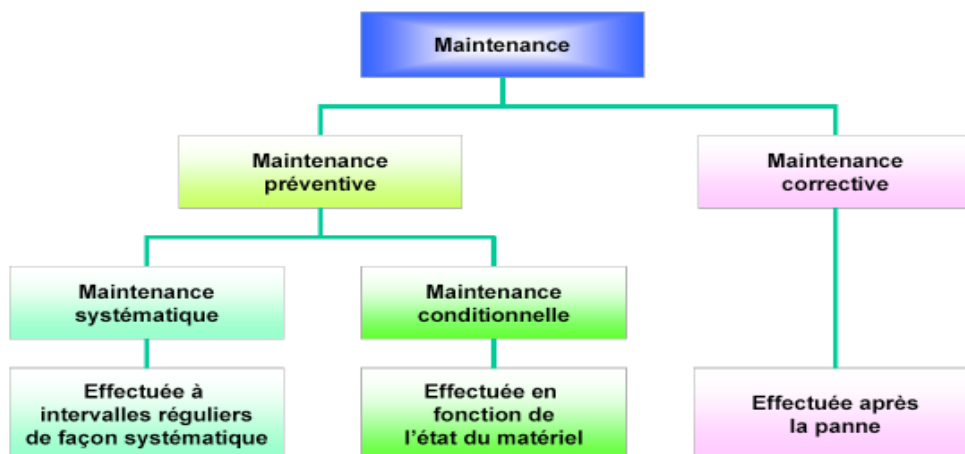


Fig. I.1. L'organigramme des différents types de maintenance [29]

### **I.2.3.1. La définition de la maintenance corrective**

La norme NF EN 13306 définit la maintenance corrective comme suit : exécution d'une opération après détection d'une panne pour remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise [14].

Dans ce type de maintenance on attend l'apparition de la panne pour intervenir. On distingue deux aspects de maintenance : la maintenance palliative et la maintenance curative.

- ✓ Maintenance palliative : est défini par l'opération de dépannage dans le cas d'une panne partielle, son objectif est de gommer les conséquences de la panne et permettre au matériel de fonctionner jusqu'à l'arrêt préventif.
- ✓ Maintenance curative : est défini par l'opération de réparation dans le cas d'une panne totale, le but de cette maintenance est de remettre le matériel en marche [14].

### **I.2.3.2. La définition de la maintenance préventive**

La maintenance préventive destinée à minimiser la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien [15]. Les opérations de cette maintenance sont réalisées par des interventions prévues, préparées et programmées selon des critères différents pour éviter la défaillance probable. Il existe plusieurs opérations de maintenance préventive [16]:

- le nettoyage,
- lubrification des points de frottement,
- la visite et l'inspection réalisées à l'arrêt et en marche, par les utilisateurs comme par les professionnels de la maintenance,
- le contrôle,
- la révision partielle ou totale,
- l'analyse des vibrations (mesure) et des huiles.

Dans ce type de maintenance on distingue :

#### **a) La maintenance préventive systématique**

La maintenance préventive systématique définit par la norme AFNOR X 60-010 [17] comme étant un ensemble des activités correspondantes déclenchées selon un plan établi à partir d'un nombre prédéterminé d'unité d'usage. Les changements des pièces et des fluides ont lieu quel que soit leurs états de dégradation, et ce de façon périodique.

#### **b) La maintenance préventive conditionnelle**

Cette maintenance se traduit par une surveillance des points sensibles des équipements et définit par la norme AFNOR X 60-010 [17] comme étant un ensemble des activités de maintenance déclenchées selon des critères prédéterminés et significatifs de l'état de dégradation du bien ou du service.

**c) La maintenance prédictive (prévisionnelle)**

La maintenance prédictive est l'étape finale de l'entretien, elle est réalisée d'après les prévisions imaginées de l'analyse et de l'appréciation des critères significatifs de la dégradation du bien (norme NF EN 13306) [17].

**I.3. Le principe de la maintenance conditionnelle**

La Fig. I.2 montre le principe de la maintenance conditionnelle (les interventions de la maintenance préventive conditionnelle). Une intervention préventive conditionnelle (IPC) programmée, s'il y a une mesure périodique d'une dégradation touchant le seuil d'alarme (un arrêt préventif) [17].

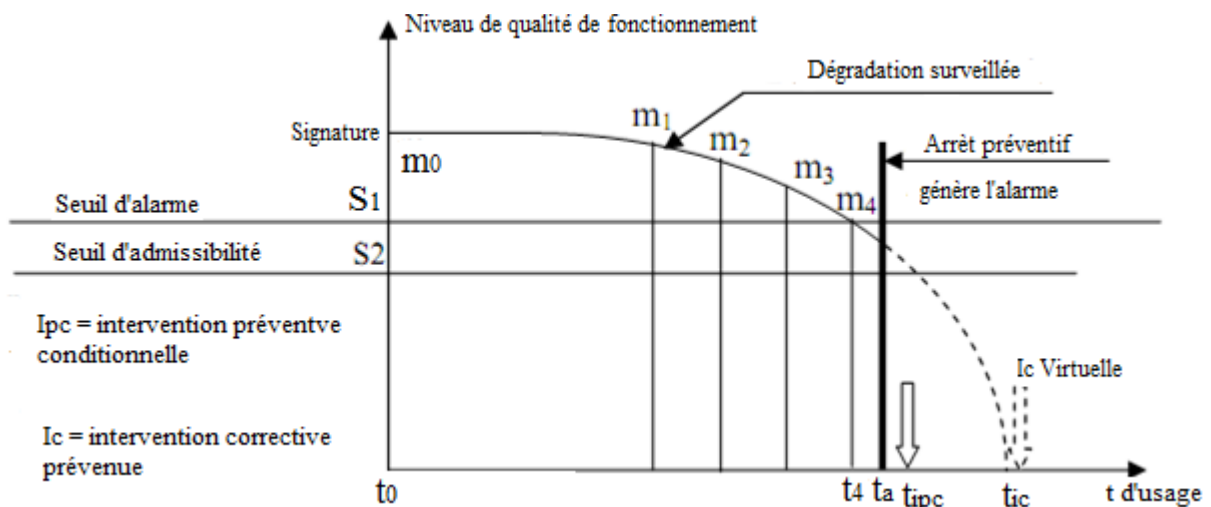


Fig. I. 2. L'intervention de la maintenance conditionnelle [17].

La signature est définie par une prise de référence de l'état de bon marche à l'origine.

Les mesures sont de simples observations visuelles, des images (spectre...). Probablement, elles sont changées par des alertes présélectionnées, ou des visites espacées de  $\Delta t$  de telle façon que la dégradation à prévenir ne puisse échapper à la surveillance :

$$\Delta t < t_{\text{admissibilité}} - t_{\text{alarme}}$$

La connaissance de la loi de dégradation, nous permet de prendre des mesures qui ne peuvent pas débuter à  $t_0$  (sauf signature). Les mesures peuvent être collectées par rondes au niveau du centre de surveillance.

- l'arrêt sera demandé automatiquement par l'alarme, ou différé par une décision volontaire jusqu'à l' $I_{PC}$  programmée et organisée.
- l'intervention préventive conditionnelle sera préparée à partir de l'alarme, selon un temps de réflexe du service de maintenance prédéterminé.

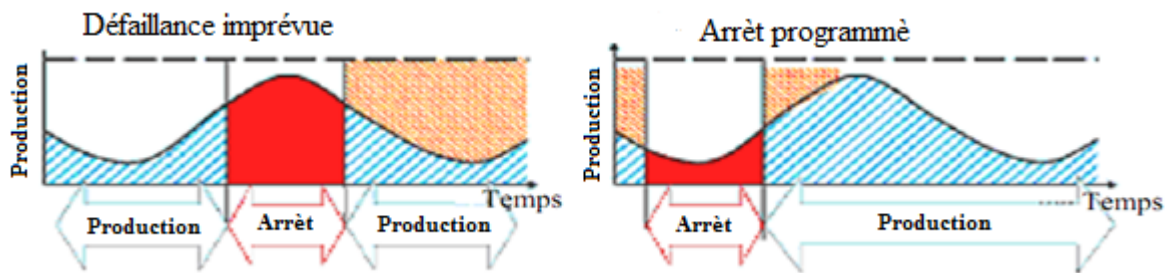


Fig. I.3. Le temps d'intervention de la maintenance et son impact sur la production [18].

### I.3.1. Les différentes techniques de la maintenance préventive conditionnelle

Les techniques de la maintenance préventive conditionnelle sont utilisées pour suivre et surveiller les installations industrielles ou les systèmes électromécaniques, parmi ses techniques on distingue :

#### I.3.1.1. L'analyse de vibrations

La surveillance par l'analyse vibratoire des systèmes électromécaniques dans les installations industrielles est l'outil préventif de la maintenance. Cette technique est largement utilisée dans la majorité des installations. Elle détecte pratiquement toutes les anomalies susceptibles d'apparaître dans les machines tournantes. Un défaut d'alignement, un roulement usé, ou un jeu, s'explique par un changement des efforts internes que subit la machine, cela conduit à une modification de son comportement vibratoire [19].

On peut suivre et surveiller l'état d'un équipement, si on place des capteurs de vibration aux endroits où se transmettent ces efforts (sur les paliers des machines). L'avantage principal de l'analyse vibratoire est la facilité de prendre des mesures, la détection des défauts à un stade précoce et la possibilité de réaliser un diagnostic approfondi pour déterminer l'origine [19].

#### I.3.1.2. L'analyse des huiles

L'analyse des huiles est une autre technique de surveillance, qui décide l'état d'huile ou de graisse utilisée dans l'appareillage. La méthode consiste à analyser les particules d'usure drainées par le lubrifiant, afin d'en inférer l'état de l'installation [20].

#### I.3.1.3. La technique de la thermographie

Dans le domaine de la maintenance, la thermographie infrarouge joue un rôle très important. Elle est réservée pour le contrôle d'installations électriques et peut être utilisée dans la surveillance des machines tournantes.

Pour déterminer la condition de fonctionnement, elle emploie l'instrumentation conçue pour surveiller l'émission de l'énergie infrarouge (température de surface). En décelant des anomalies thermiques (les endroits qui sont plus chauds ou plus froids), un expert peut identifier et expliquer les problèmes débutants au sein de l'usine.



Les éléments de base d'un appareil infrarouge industriel sont le système optique, les capteurs de rayonnement, et d'autre forme d'indicateur. Le système optique collecte l'énergie sur un capteur pour la transformer en signal électrique, puis un dispositif électronique amplifie le signal de sortie et le transforme en une mode affichable.

La thermographie autorise d'accomplir des mesures à distances, et de procurer instantanément une représentation thermique de la zone contrôlée [19].

#### **I.3.1.4. L'analyse acoustique**

L'analyse acoustique est une technique de la maintenance préventive conditionnelle, permet de détecter les défauts par l'étude des ondes et des vibrations sonores acoustiques générés par les systèmes électromécaniques.

La mesure de son (bruit) effectuée à l'aide d'un sonomètre qui évalue le niveau de pression acoustique. Ce dernier est ainsi transformé en un signal électrique, comparable en amplitude et en fréquence au phénomène acoustique. Le signal électrique peut être conditionné, échantillonné et traité de manière à caractériser le bruit mesuré. On peut ainsi par exemple déterminer des valeurs acoustiques exprimées en dB(A), effectuer des analyses fréquentielles, des analyses statistiques, et intégrer le signal sur une durée déterminée.

#### **I.3.2. Le choix de la technique de surveillance**

Chaque technique de surveillance, ne permet pas de capter les mêmes types de défauts, ni d'opérer un diagnostic détaillé pour connaître l'origine, la gravité du défaut et le domaine d'application favorisé pour chaque technique de surveillance, voir (Tableau I.1, et I.2). Donc, avant de préférer la technique de surveillance, il doit déterminer la criticité de sa machine à l'aide de l'historique de défaillances qui touchent cette dernière et son dossier technique [20].

##### **I.3.2.1. La comparaison entre les techniques de maintenance préventive conditionnelle**

Les éléments de comparaisons entre les différentes techniques de la maintenance préventive conditionnelle [20] sont montrés dans le tableau ci-dessous:

Tableau. I.1. Comparaisons des outils de maintenance préventive conditionnelle

	<b>Principaux privilèges</b>	<b>Principales limitations</b>	<b>Domaine d'applications favorisé</b>
Analyse de vibration	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Découverte de défauts à une étape précoce</li> <li>- Occasion d'effectuer un diagnostic détaillé</li> <li>- Permet une surveillance continue</li> <li>- Autorise le contrôle de l'équipement à distance (télémaintenance)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Spectres parfois difficiles à expliquer</li> <li>- Dans le cas de la surveillance continue, équipements relativement coûteuses</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Découverte des défauts de tous les éléments cinématiques de la machine (balourd, défauts d'alignement, jeux, etc.) et de sa structure</li> </ul>
Analyse d'huiles	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dépistage d'une pollution anormale du lubrifiant, avant que celle-ci n'entraîne une usure ou un dommage</li> <li>- Occasion de connaître l'origine de l'anomalie par analyse des particules</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- N'autorise pas de localiser régulièrement le défaut</li> <li>- Nécessite de prendre de nombreuses précautions dans le prélèvement de l'échantillon</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vérification des propriétés physico-chimiques du lubrifiant, découverte d'un manque de lubrification, analyse des éléments d'usure, analyse de transmission par le processus (étanchéité), etc.</li> </ul>
Thermographie	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permet d'effectuer un contrôle rapide de l'installation</li> <li>- Interprétation souvent immédiate des résultats</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Découverte de défauts à un stade moins précoce que l'analyse vibratoire</li> <li>- Contrôle limité à ce que "voit" la caméra (échauffements de surface)</li> <li>- Ne permet pas d'accomplir un diagnostic approfondi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Localisation de tous les défauts produisant un échauffement (manque de lubrification en particulier)</li> </ul>
Analyse acoustique	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permet de déceler l'apparition de défauts audibles</li> <li>- Autorise une surveillance continue</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sensibilité au bruit ambiant</li> <li>- Diagnostic souvent difficile à effectuer</li> <li>- Problèmes de répétition des mesures</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Découverte d'un bruit inhabituel qui peut être expliqué par analyse vibratoire</li> </ul>

### I.3.2.2. Les techniques de détection

Les principales techniques de détection selon les défauts potentiels [20] sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau. I.2. Les défauts selon les techniques de détection

Type de défauts	Analyse vibratoire	Thermographie IR	Analyse d'huiles	Analyse acoustique
Déséquilibres, balourd	Oui	Non (sauf s'il y a usure)	Oui (s'il y a un échauffement)	Non
Jeux, défauts de serrage	Oui	Non (sauf s'il y a usure)	Oui (s'il y a un échauffement)	Oui (s'il y a une résonance)
Défauts spécifiques aux Roulements	Oui	Oui	Oui	Oui
Défauts spécifiques aux Engrenages	Oui	Oui	Oui	Oui
Défauts de courroies	Oui	Non	Oui	Oui
Défauts d'alignement	Oui	Non	Oui	Non
Défauts liés à la lubrification : - dégradation de la qualité de l'huile	Non (sauf paliers fluides)	Oui	Non	Oui
manque d'huile	Oui	Oui	Oui	Oui
Défauts de nature électrique ou électromagnétique	Oui	Non	Oui	Oui
Défauts liés aux écoulements (pour pompes et machines hydrauliques)	Oui	Non	Non	Oui

### I.3.3. Avantages et inconvénients de la maintenance préventive conditionnelle

Le principal avantage de la maintenance préventive conditionnelle est d'éviter les arrêts des machines tournantes et des systèmes électromécaniques. Il faut utiliser des outils de ce type de maintenance pour contrôler l'état de la machine pour réduire sa probabilité de défaillance. Il existe quatre outils principaux utilisés en maintenance préventive conditionnelle [20]:

- La thermographie infrarouge
- L'analyse des huiles
- L'analyse vibratoire et l'analyse acoustique

L'inconvénient principal de la maintenance préventive conditionnelle est la mise en place de ces techniques.

#### **I.4. Les objectifs de la maintenance préventive conditionnelle**

Plusieurs objectifs sont atteints, si on applique la maintenance préventive conditionnelle. Ces objectifs sont résumés comme suit [21, 22 et 18]:

##### **I.4.1. Amélioration de la fiabilité des éléments du système**

L'application de la maintenance préventive conditionnelle nécessite des analyses techniques du comportement du système. Cela permet de supprimer certains défauts et pratiquer une maintenance préventive optimale.

##### **I.4.2. Assurer la qualité des produits**

La surveillance habituelle facilite la détection des signes de défaillance. On règle les paramètres toute en respectant le fonctionnement des systèmes électromécaniques. Dans ce cas, la qualité des produits est assurée et le rendement est augmenté.

##### **I.4.3. Améliorer l'organisation des tâches**

La surveillance permanente des machines de production assure la réduction de risque d'avarie grave et la garantie de fonctionnement sans arrêt. Cela engage une bonne coordination entre les services de production et de maintenance pour la programmation des interventions et le respect du plan de maintenance.

##### **I.4.4. Garantir la sûreté de fonctionnement**

L'assurance de la sécurité humaine et la sûreté de fonctionnement sont basés sur les interventions de la maintenance préventive et les critères de la sécurité pour éviter les risques dangereux.

##### **I.4.5. Développement de la gestion des stocks**

Le fonctionnement d'organe au maximum de leur durée de vie demande une surveillance rapprochée. La demande en pièce de rechange peut être réduite, avec la provision des pièces de rechange suivant les nécessités réelles. Une disposition et une amélioration de la gestion des stocks est nécessaire pour minimiser les coûts des pièces de rechange.

##### **I.4.6. Améliorer le climat de relation humaine**

L'intervention rapide par les opérations de la maintenance réduit le temps d'arrêt et la perte de production. Certaines difficultés, comme l'absence de pièces de rechange, entraînent un arrêt de la machine pendant un temps considérable, cela provoque un déséquilibre entre la production et la maintenance. La maintenance préventive conditionnelle demande un personnel qualifié dans le domaine de maintenance pour des interventions ciblées et organisées.

### I.4.7. Réduction du coût global de la maintenance

L'amélioration et l'augmentation de la disponibilité des équipements est le but principal de la maintenance préventive conditionnelle. Ce type de maintenance réduit les arrêts systématiques et augmente le rendement du système.

Le cout total de la maintenance est réduit car la surveillance permet de découvrir les petits défauts de la conception ou du fonctionnement, et aussi l'observation de l'évolution d'une dégradation évite les destructions d'organes voisins par défaillance secondaire. Le risque de rupture importante de la machine est éloigné et la durée de vie de l'installation est prolongée.

### I.5. Le choix d'une stratégie de maintenance

Généralement la maintenance exige une combinaison permanente rationnelle des moyens, donc elle demande une politique d'entretien préalablement établie. La stratégie de maintenance, qui résulte de la politique de maintenance, impose des choix pour atteindre, voire dépassé, les objectifs fixés

Dans le domaine de maintenance, les recherches ont pour but de mettre une stratégie de maintenance préventive conditionnelle basée sur l'utilisation d'outils appropriés et adaptée à un système électromécanique. Cette stratégie de maintenance permettra au groupe de surveillance de localiser et d'identifier les défauts qui apparaissent sur le système en fonctionnement, et d'établir les opérations de maintenance correctives soit le dépannage ou la réparation (Fig. I.4) [23].

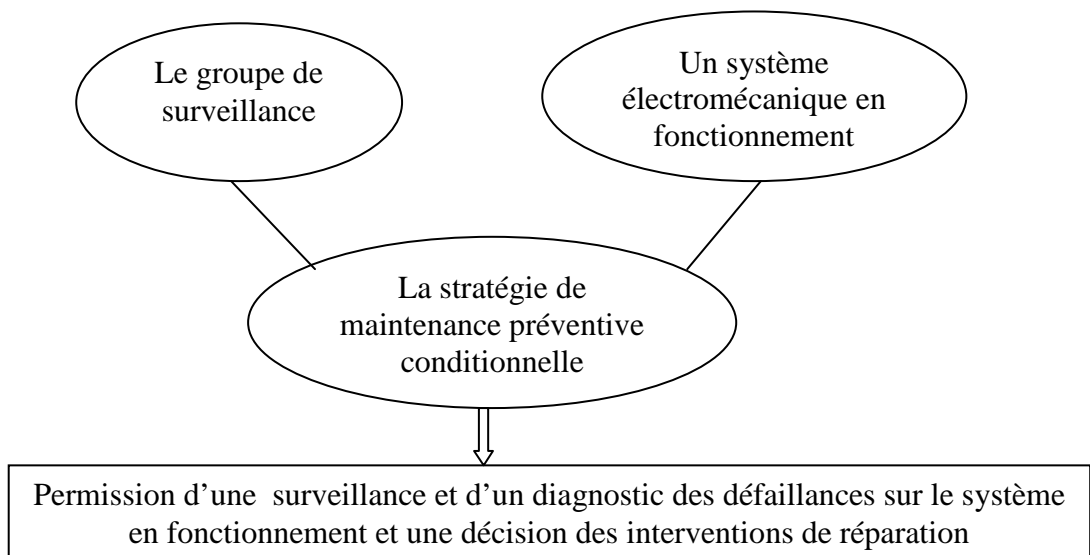


Fig. I.4. La fonction globale d'une stratégie de maintenance préventive conditionnelle

La définition de la stratégie de maintenance au niveau de l'entreprise comme étant des objectifs technico-économiques, fréquemment doublés d'impératifs de sécurités et de contraintes réglementaires proportionnels à la prise en charge des installations par le service de maintenance.

Le choix de la stratégie de maintenance est déterminé par l'estimation du coût global de la durée de vie, en se basant sur des contraintes bien identifiées.

La détermination de la somme globale des coûts selon la durée de vie optimale d'une machine est déterminée par l'expression suivante:

$$CG = CA + CF + CTM - VRE \quad (I.1)$$

CA: coût d'achat ;

CF: coût de fonctionnement;

CTM : coût total de maintenance ;

VRE : valeur de revente éventuelle ;

Le coût global de la maintenance augmente avec le temps de fonctionnement de la machine et la valeur de revente diminue [14].

La durée de vie idéale coïncide avec l'abscisse du point de contact de la tangente à la courbe passant par l'origine Fig. I.5 [14].

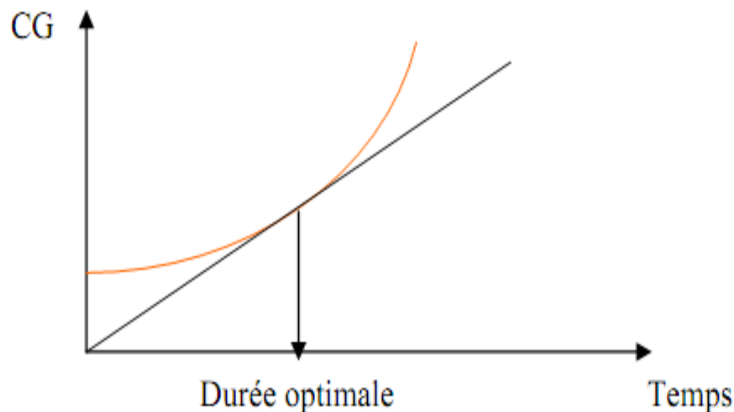


Fig. I.5. La durée de vie optimale

L'estimation du coût global de la maintenance est réalisée par le choix d'un type de maintenance adéquate pour chaque machine ou groupe de machines.

On prend des paramètres de choix simple, comme résumés dans la Fig. I.6 [14].

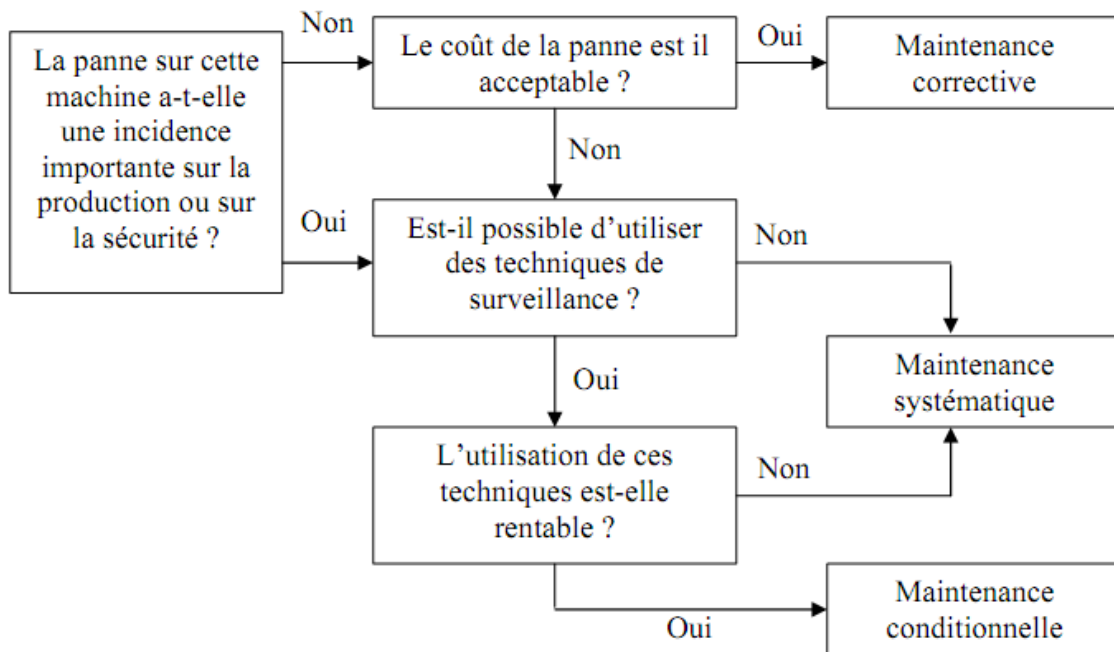


Fig. I.6. La stratégie de la maintenance

### I.6. La surveillance, le diagnostic et le suivi

L'analyse vibratoire est divisée en trois niveaux qui sont: la surveillance, le diagnostic et le suivi. La surveillance consiste à contrôler l'état de fonctionnement des systèmes électromécaniques à travers des indicateurs dans un intervalle de temps déterminé. Il est nécessaire de prendre des mesures correctives, si un indicateur dépasse un seuil admissible donné par l'historique du système, sinon utiliser le deuxième niveau d'analyse qui s'appelle diagnostic.

Le diagnostic force les outils de traitement du signal pour extraire les informations concernant l'état de fonctionnement. Plusieurs études sont basées sur ce niveau d'analyse et ces outils de diagnostic sont de plus en plus nombreux et pointus.

Les objectifs de diagnostic sont d'isoler, de localiser et de caractériser le défaut. La localisation et la caractérisation permettent de suivre dans le temps de l'évolution de la sévérité de la défaillance. Le suivi constitue le niveau le plus élevé dans l'analyse vibratoire et son objectif est la qualification et la prédiction en termes de fiabilité. Pour réaliser ces différents niveaux d'analyses, il est nécessaire d'instrumenter les systèmes étudiés et de traiter les signaux enregistrés [24], [25].

## **I.7. L'analyse vibratoire**

L'intégration de plus en plus de l'intelligence dans les conceptions des systèmes de production est devenue possible grâce au développement rapide dans le domaine de l'informatique qui a entraînée progressivement la diminution du personnel d'exploitation et les interventions directes de l'homme sur la machine.

L'homme, de moins en moins présent sur les lignes de fabrication, maîtrise moins le fonctionnement que par le passé, ce qui tend à fragiliser tout l'appareil de production. La connaissance des machines et leur comportement ne sont plus capitalisés par la mémoire des exploitants.

Avant, le bruit, la couleur, les odeurs, les situations anormales attiraient l'attention et ces symptômes servaient de base au diagnostic et à la remise en état.

Les outils de la maintenance conditionnelle, nous permettent de mieux évaluer l'état des machines et des systèmes. Les capteurs, les équipements de mesures et de traitement des données fournissent de précieuses informations sur les évaluations du comportement de certains organes basés sur des principes physiques indiscutables, les outils de maintenance conditionnelle facilitent aussi la rationalisation de l'acte de diagnostic [26].

La surveillance vibratoire des machines est la technique la plus utilisée dans l'industrie. Vu l'importance de la vibration dans notre travail, il est nécessaire de s'intéresser à la théorie et l'analyse vibratoire.

### **I.7.1 L'objectif de l'isolation vibratoire**

Une difficulté souvent rencontrée en analyse vibratoire est celle où une structure vibrante influe sur son environnement direct, la transmission des vibrations par l'intermédiaire de ses points de fixation. Puis la source de vibration est formée par la structure vibrante, tandis que les structures recueillant ces vibrations sont nommées les structures réceptrices. La Fig. I.7 illustre un exemple où la transmission des vibrations d'une machine tournante à une structure réceptrice par l'intermédiaire du piédestal de fixation de la machine.



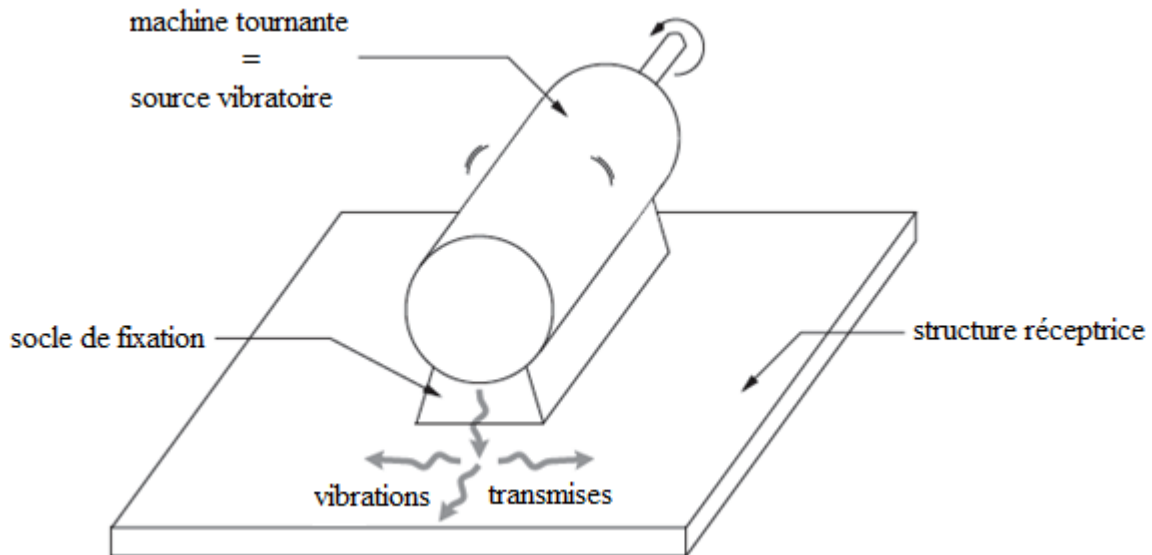


Fig. I.7 Une transmission vibratoire par une machine tournante [27].

L'objectif de l'isolement des vibrations est de réduire la transmission de ces dernières de la source vers les structures réceptrices, même si cette réduction peut conduire à l'augmentation du niveau vibratoire global de la source. Contrairement, l'atténuation vibratoire globale, qui a pour but de minimiser le niveau vibratoire global de la source, mais qui peut provoquer l'augmentation de la quantité de vibrations transmises à son environnement direct [27].

### I.7.2. Le principe physique de l'isolation de vibrations

Le principe de la diminution des vibrations ou l'isolation vibratoire d'un système est effectué par différentes méthodes de contrôle de vibrations, ces dernières sont classées en deux catégories:

- les méthodes de contrôle passives
- les méthodes de contrôle actives

La méthode de contrôle passive basé sur la modification de la structure du système tel que la conformation et la fixation de la source par des matériaux absorbant les vibrations.

Plusieurs méthodes appliquant ce principe ne nécessitent pas d'apport complémentaire d'énergie au système. Le coût de réalisation peut devenir exorbitant (comme, le changement des matériaux constitutifs ou la configuration d'une machine existante). De plus, elles sont peu efficaces sur les vibrations situées dans les basses fréquences (précisément en dessous de 1 à 2 kHz) [27].

Ces inconvénients peuvent être éliminés par l'utilisation des actionneurs extérieurs au système comme ressources d'action sur les vibrations. Les actionneurs les plus utilisés sont : les électroaimants, les vérins hydrauliques ou pneumatiques, les actionneurs piézoélectriques, etc. Leurs réalisations nécessitent un apport d'énergie extérieure, ce qui explique l'appellation de méthode active. La bande passante de ces actionneurs permet un contrôle influant pour les basses fréquences où les méthodes passives n'ont que peu d'effet, et leur coût de revient est lié au type et au nombre d'actionneurs utilisés [27].

### I.7.3. Les outils de l'analyse vibratoire

La chaîne de mesure est l'élément principal de l'analyse vibratoire pour l'acquisition des signaux étudiés. Le capteur de vibration est le premier élément de la chaîne de mesure, il converti les forces mécaniques engendrés par les vibrations aux signaux électriques. L'amplificateur est destiné à amplifier l'intensité du signal mesuré pour le traiter en utilisant les outils de traitement du signal. La limitation de la gamme fréquentielle est réalisée grâce à des filtres passe haut et passe bas. Les éléments constituant la chaîne d'acquisition et de visualisation du signal sont présentés sur la Fig. I.8 [28].

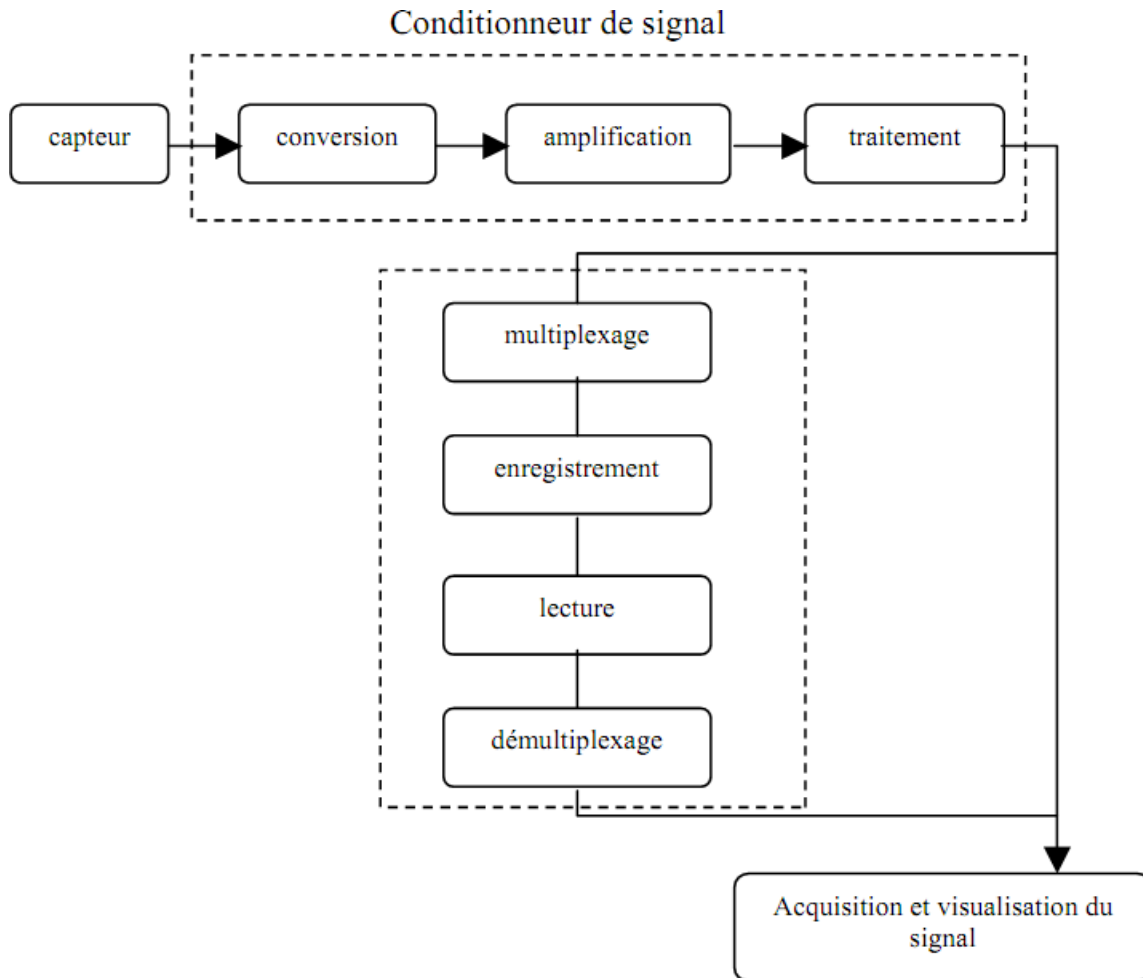


Fig. I.8. Les éléments constituent la chaîne de mesure [28].

Les outils qu'on utilise dans l'analyse vibratoire sont décrits et résumés comme suit :

#### I. 7.3.1. Le capteur de vibration

Le capteur de vibration le plus utilisé est l'accéléromètre piézo-électrique. Il est composé d'une masselotte montée sur un cristal piézo-électrique dont les deux faces opposées ont été rendues conductrices par dépôt métallique (Fig. I.9). Il possède une très bonne linéarité et une large bande passante. Pour mesurer les mouvements vibratoires, il faut fixer le capteur de vibration d'une seule direction sur la paroi d'un bâti. Sa masse est légère (environ 20 g), influence malgré tout les

mesures, car sur des parois de grandes dimensions et relativement peu épaisses, une masselotte additionnée peut réduire les fréquences propres de quelques pour cent [28].

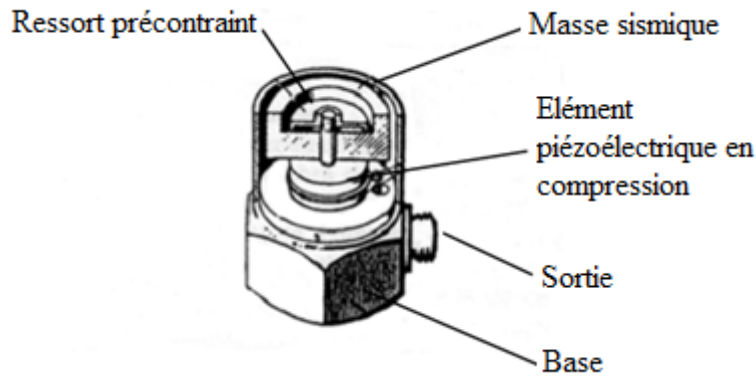


Fig. 1.9. Accéléromètre piézoélectrique [28].

Pour obtenir une bonne qualité du signal, il faut choisir la meilleure direction de la fixation du capteur sur la structure. Le choix de la fixation est très important parce qu'elle influe sur la mesure.

Pour que la reproductibilité et la fiabilité des mesures soient bonnes même en basses fréquences, il est mieux d'utiliser des embases collées (cyanoacrylate de méthyle). L'accéléromètre doit être installé dans des endroits de la structure où la mobilité est maximale pour la bande de fréquences étudiée. La tendance actuelle est toujours de mettre le capteur près du composant à suivre, pour que le signal soit moins perturbé [28].

### I. 7.3.2. L'équipement d'analyse

Le traitement du signal mesuré est réalisé par l'analyseur de spectres multivoies, ce dernier est l'outil de base de traitement. Il existe d'autres types de matériel tels que les collecteurs de données qui sont dédiés à la surveillance des machines dans le domaine industriel [28].

## I.8. Les vibrations

Dans cette section on va définir et décrire la vibration vu son importance dans ce travail.

### I.8.1. La notions de vibration

Une vibration est le mouvement oscillatoire d'un système mécanique autour d'une référence dans une période du temps. Le nombre de cycles complets du mouvement dans une période de temps d'une seconde est appelé fréquence et leur unité hertz (Hz).

Dans la pratique, Les signaux vibratoires sont composés d'une grande quantité de fréquences apparaissant en même temps au point que l'on ne peut pas juger directement au vu de la caractéristique amplitude-temps du nombre d'éléments synchroniques et à quelle fréquence elles se génèrent. Ces éléments peuvent être mis en évidence par la représentation graphique de la caractéristique des vibrations amplitude-fréquence, une technique probablement considérée

comme base du diagnostic de mesures des vibrations [18].

Les forces générées par les différents éléments internes du système en mouvement appelés phénomènes vibratoires, ce sont des phénomènes périodiques ou apériodiques plus ou moins complexes. Les forces générées sont présentées et résumées ci-dessous:

- ◆ Forces impulsionnelles (chocs)
- ◆ Forces transitoires (variations de charge)
- ◆ Forces périodiques (balourd)
- ◆ Forces aléatoires (frottements)

Il y a plusieurs types de vibration, l'organigramme ci-dessous présent les différents types de vibration.

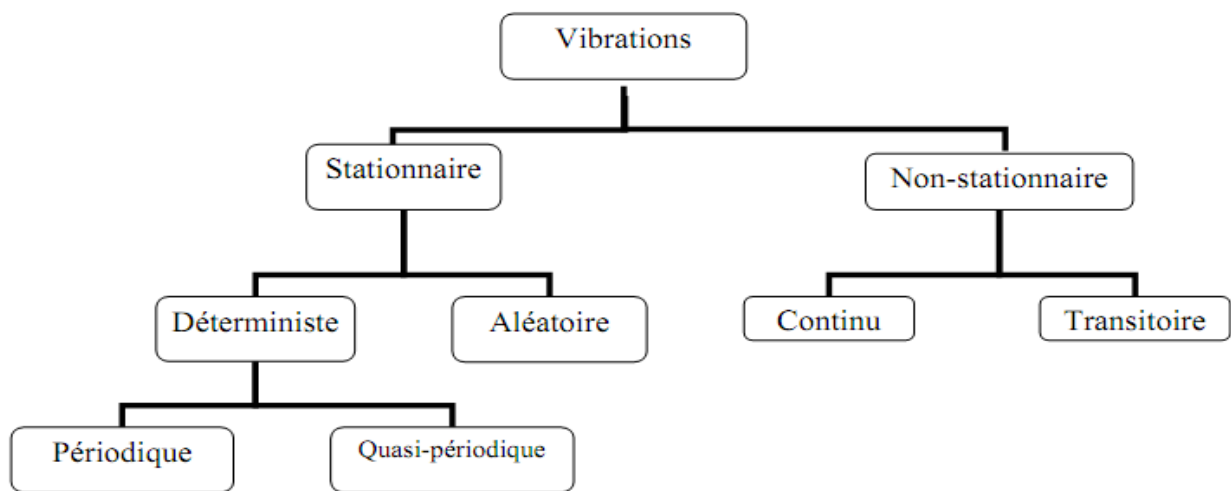


Fig. I.10. Organigramme des types de vibration [18].

### I.8.2. L'origine des vibrations d'une machine tournante électrique et leur mesure

L'origine des vibrations sont les forces excitatrices exercées sur une structure. Le changement entre ces forces et les vibrations qu'elles produisent est la réponse mécanique de la structure, comme illustrée par la Fig. I.11.

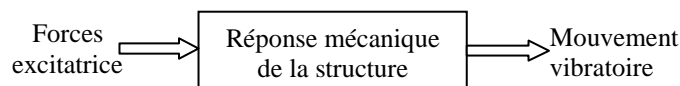


Fig. I.11. La réponse mécanique d'une structure [27]

Il y a trois natures différentes des forces générées par le fonctionnement de la machine tournante électrique:

- aérodynamique,
- mécanique,
- électromagnétique.

Dans les différentes parties du moteur, l'écoulement du fluide de refroidissement génère les forces d'origine aérodynamique. Cet écoulement incite des transformations aléatoires de pression dans le moteur, ce qui produit des forces possédant particulièrement une propriété de large bande. Donc, elles peuvent mouvoir les résonances mécaniques de la machine et enfantent des vibrations qui sont également aléatoires et de large bande.

Néanmoins, dans le cas de la machine avec ventilateur de refroidissement, les vibrations sinusoïdales dont la fréquence est la multiplication du nombre d'ailettes du ventilateur par la fréquence de rotation peuvent apparaître. Pour la machine refroidie à l'air et ne comprenant pas de ventilateur, ses vibrations d'origine aérodynamique ont un type seulement aléatoire large bande.

Les forces d'origine mécanique sont dues à des anomalies de fabrication, de jeu ou de corrosion. On peut signaler le phénomène de balourd dynamique incité par un mauvais équilibrage du rotor, ou la corrosion de l'accouplement raccordant deux machines distinctes. En général, ces phénomènes engendrent des forces périodiques, auquel les fréquences sont attachées à la fréquence de rotation de la machine. Les vibrations qu'elles produisent seront donc périodiques, et leur spectre de fréquence est un ensemble de raies spectrales, de fréquences harmoniques ou sous harmoniques de la fréquence de rotation. Particulièrement, ces vibrations se limitent au balourd mécanique, produisant des raies spectrales de fréquence identique à la fréquence de rotation ainsi qu'à ses premiers harmoniques [27].

Les forces d'origine électromagnétique sont généralement des forces de Maxwell, relatives au carré du champ d'induction existant dans l'entrefer de la machine.

La répartition de ce champ n'est jamais une sinusoïde pure et ceci pour un nombre de raisons (répartition spatiale approximative des forces magnétomotrices générées par les enroulements et/ou les aimants, entrefer non constant, courants d'alimentation non sinusoïdaux, etc). Les harmoniques de l'induction créent alors un nombre important de champs de force tournants à distribution périodique, qui excitent la structure de la machine. À ces forces s'additionnent celles dues à des anomalies de fabrication comme le balourd magnétique, interprétant une excentricité du champ d'induction de la machine. Par exemple, une machine synchrone engendre des vibrations périodiques de fréquence harmonique égale à la fréquence de rotation [27].

L'analyse vibratoire est classée parmi les techniques de la maintenance préventive conditionnelle pour la surveillance des machines tournantes. Ces machines sont des équipements ou on peut distinguer [29]:

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

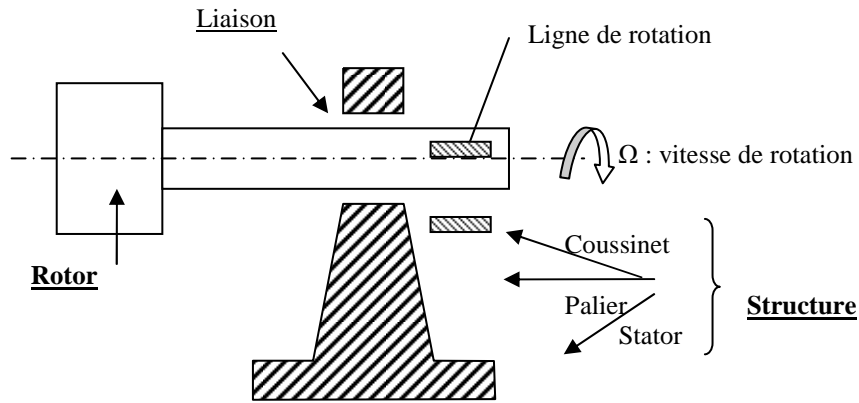


Fig. I.12. Origine des vibrations sur les machines tournantes [29].

La rotation du rotor autour d'une ligne par l'intermédiaire de liaisons ayant pour support la structure de la machine. Cette rotation produit des forces qui concernent l'état des machines. Ces derniers vont se résonner sur tous les éléments de la machine.

La figure ci-dessous montre la nuisance d'une vibration dans une machine tournante.

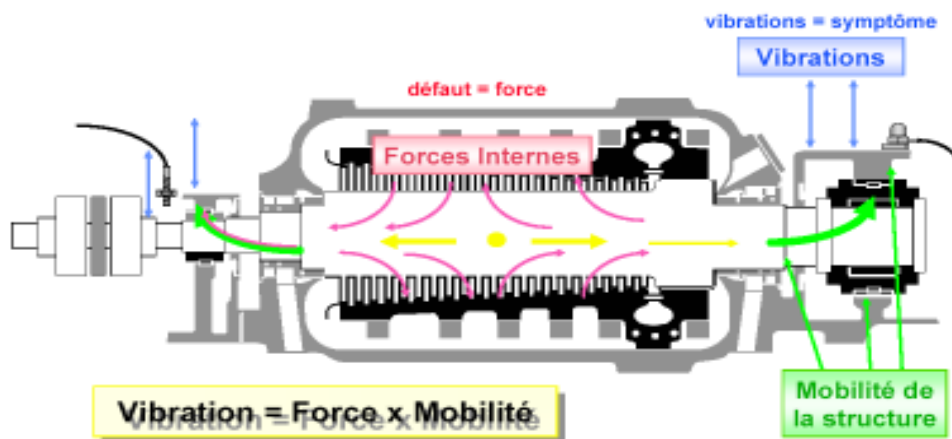


Fig. I.13. Nuisance d'une vibration [29].

Réellement, les machines ne sont jamais typiques, elles sont touchés par des défauts de fabrication, jeux de fonctionnement et paramètres de fonctionnement (température, vitesses de rotation,...).

Une machine réelle décrite par le schéma ci-dessous où les défauts ont été excessifs. La vibration dépend des conditions de marche. Le signal vibratoire comporte des informations sur les efforts produits par la marche de la machine, mais aussi sur l'état mécanique des structures [29].

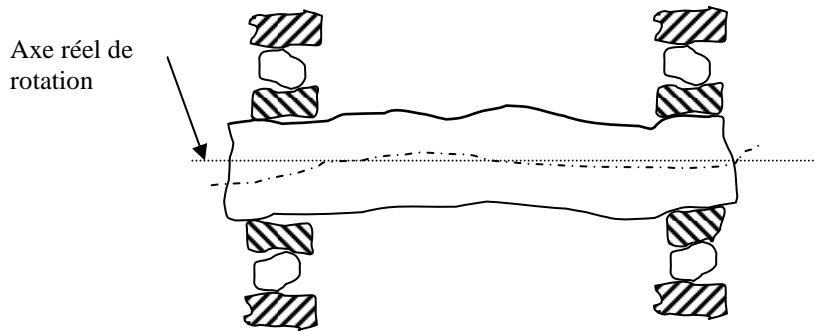


Fig. I.14. Une machine tournante vibre [29].

Il permet par conséquent d'avoir une représentation des contraintes internes et de voir un certain nombre d'anomalies de fonctionnement. Mais en raison même de la richesse des renseignements qu'il peut apporter, il n'est pas directement utilisable. Il comprend trop d'informations qu'il faut analyser et trier.

En conclusion, les vibrations et les bruits sont des indicateurs objectifs de l'état de santé des matériels comportant au moins une pièce en mouvement.

Ces indicateurs sont en étroite corrélation avec les balourds, les désalignements, les défauts d'engrènement, les usures, les déformations, etc.

Ainsi, le suivi vibratoire apporte la connaissance de l'état réel de la machine. A tout moment, il permet de suivre son changement donc de planifier l'arrêt du système en tenant compte de :

- la production
- la disponibilité de l'équipe d'intervention
- l'approvisionnement des pièces de rechange.

En outre, ce suivi permet :

- D'annuler les arrêts pour les inspections et les visites
- De découvrir précocement les risques de défaut
- De mieux programmer les interventions
- De diminuer la durée de l'arrêt
- De minimiser les coûts directs et indirects de maintenance.

La meilleure méthode de mesure des vibrations est l'utilisation du capteur. Le but de ce capteur est de transformer la vibration en un signal exploitable et qu'on peut traiter [29].

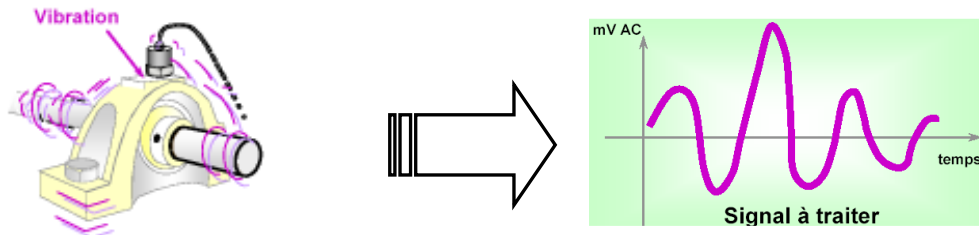


Fig. I.15. Le placement du capteur de vibration et le signal capté [29].

Les trois grandeurs à mesurer en technique vibratoire sont le déplacement, la vitesse et l'accélération. La figure ci-dessous montre l'utilisation des accéléromètres au niveau des paliers des machines tournantes.

Les positions correctes des accéléromètres sont A (position « radial ») et C (position « axial »). Le capteur B est trop loin du palier, Le palier D n'est pas sur une structure rigide.

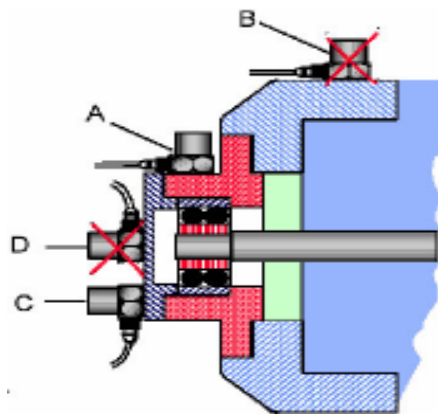


Fig. I.16. Les différentes positions correctes du placement du capteur [29].

Les vibrations dépendent des mobilités des structures (jeu, manque de rigidité), il faut choisir la bonne position qui est près des paliers sur les structures rigides.

### I.8.3. La naissance d'une vibration

Le déplacement de la masse (la boule) de sa position d'équilibre à une position maximale ou minimale génère une vibration (naissance d'une vibration). La boule vibrera indéfiniment entre ses deux états Max et Min, si l'on considère que le mouvement n'est pas amorti [30].

Equipons maintenant notre boule d'un système de marquage et faisons passer à vitesse constante une bande de papier dans une direction vertical au mouvement. Nous enregistrons ainsi la courbe (amplitude - temps) :  $X(t)$



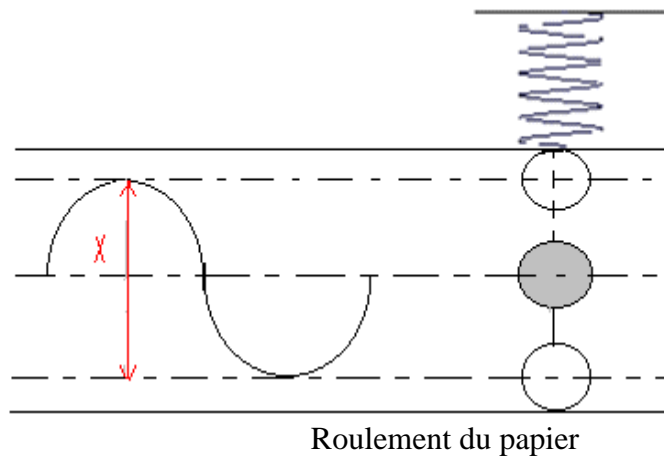


Fig. I.17. Enregistrement de la courbe (Amplitude Temps) [30].

Le mouvement vibratoire le plus simple à apprendre est celui qui traduit le déplacement d'un point (A) installé sur un cercle et tournant à une vitesse de rotation  $\omega$  [33].

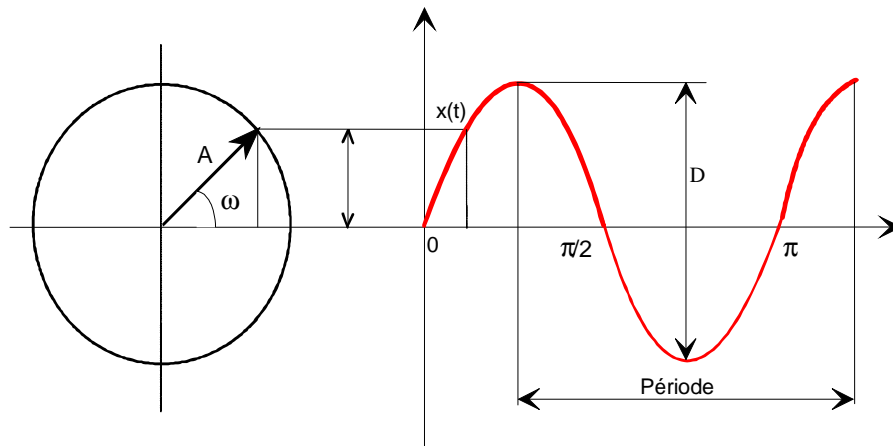


Fig. I.18. Le signal de mouvement vibratoire [29].

La rotation du point A crée une variation sinusoïdale de sa extrapolation X, cette variation est donnée par l'équation suivante:

$$X(t) = A \sin(\omega t) \quad (I.2)$$

La fréquence est le nombre de fois qu'un phénomène se répète dans un intervalle du temps déterminé. Lorsque l'unité choisie est la seconde, la fréquence s'exprime en Hertz.

Une vibration qui se créera 50 fois par seconde aura une fréquence de 50 hertz.

$$1\text{Hertz} = 1\text{tour/seconde}$$

La période T du signal coïncide à la durée d'un tour.

Si la fréquence d'un phénomène est de 50 hertz, c'est à dire 50 tours par seconde, la durée d'un tour (c'est à dire la période T) est de 1/50 de seconde.

$$f = \frac{1}{T} \quad (I.3)$$

La période T est exprimée en fonction de la vitesse de rotation : plus on tourne rapidement ( $\omega$  élevé) et plus la période sera petite, donc plus la fréquence sera élevée. Il existe une relation entre la fréquence et la vitesse de rotation:

$$\omega = 2\pi f \text{ et } f = \frac{N}{60} \text{ avec } \omega \text{ en rad/s, } f \text{ en Hz et } N \text{ en tr/min} \quad (I.4)$$

Dans les machines tournantes industrielles, on exprime l'unité de la vitesse de rotation par tour /minute, parfois noté CPM (cycle par minute) ou RPM (rotation par minute) [29].

$$1\text{Hz} = \frac{1 \text{ CPM}}{60} = \frac{1 \text{ RPM}}{60} = \frac{1 \text{ tr/min}}{60} \quad (I.5)$$

#### I.8.4. L'évaluation du niveau de vibration (Amplitude)

Pour évaluer la vibration, on utilise différentes manières comme le calcul d'amplitude. Sur le schéma ci-dessous, sont illustrées les formules exprimant le signal entre la valeur crête à crête, la valeur crête, les valeurs moyennes et efficace d'un signal sinusoïdal [30].

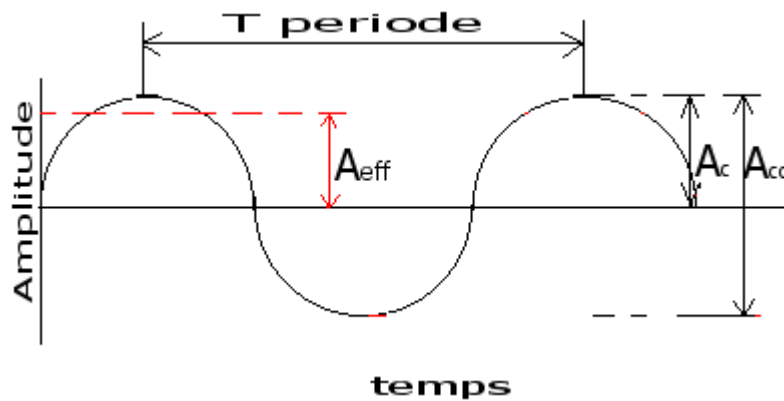


Fig. I.19. La valeur crête à crête [30]

On peut déterminer l'amplitude d'une onde et la valeur de ses écarts au point d'équilibre par:

- L'amplitude crête ( $A_c$ ) est l'amplitude maximale par rapport au point d'équilibre;
- L'amplitude crête à crête ( $A_{cc}$ ) est l'amplitude double,
- L'amplitude efficace ( $A_{eff}$ ), appelée RMS en anglais (root mean square) ou niveau efficace [31, 32] (Voir Fig. I.24).

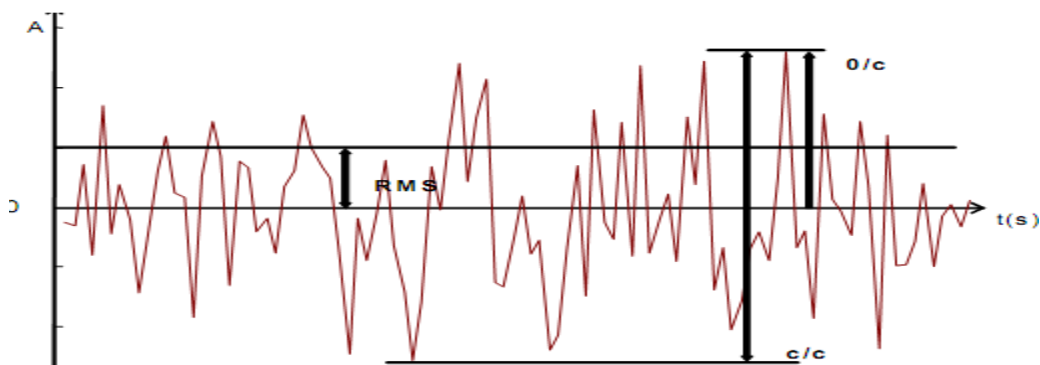


Fig. I.20. Les amplitudes d'un signal vibratoire quelconque [32].

La valeur d'amplitude efficace (RMS) comprend toute l'énergie du signal c'est-à-dire toute l'information pertinente mais aussi le bruit de fond [33]. La valeur RMS est décrite par l'expression suivante:

$$VRMS(X_{eff}) = \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt \tag{I.6}$$

$$VRMS(X_{eff}) = \frac{1}{T} \sum_{n=1}^N [x(n)]^2 \tag{I.7}$$

Equations représentant le RMS d'un signal continu et d'un signal discret.

On peut écrire l'équation de la valeur efficace pour un signal sinusoïdal comme suit:

$$V_{eff} = \frac{v_c}{\sqrt{2}} = 0.707 A_c \tag{I.8}$$

L'équation (I.8) devient fausse, dès qu'on est devant un signal aléatoire [34, 35]. Généralement les mesures d'amplitude sont prisent comme montré dans le tableau suivant:

Tableau I.3. L'indicateur de surveillance et l'amplitude mesurée [31].

Indicateur de surveillance	Amplitude mesurée en
Déplacement x	Valeur/crête (VC) Valeur crête à crête (VCC)
Vitesse v	Valeur crête Valeur efficace (Veff)
Accélération $\gamma$	Valeur efficace (Veff)

### I.8.5. Les grandeurs associées à l'amplitude d'une vibration

Les grandeurs associées à l'amplitude d'une vibration d'un système mécanique simple qui est constitué d'une masselotte «M» suspendue à un ressort sont [30]:

- Le déplacement est la variation de la position de masselotte d'une part et d'autre du point d'équilibre de la limite supérieure à la limite inférieure du mouvement.
- La vitesse sera nulle au point (haut et bas) du mouvement de la masselotte et sera maximale dans le point d'équilibre.
- L'accélération permet de passer la masselotte de la vitesse minimale vers la vitesse maximale.

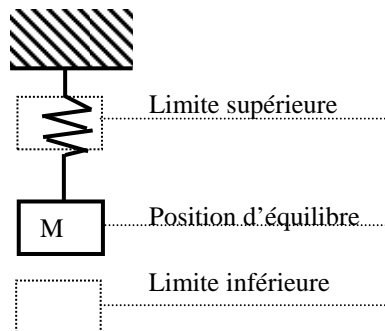


Fig. I.21. La vibration est caractérisée par 3 grandeurs (déplacement, vitesse et accélération)

[30].

On déduit que la vibration de système masse-ressort est caractérisée par trois grandeurs:

- le déplacement,
- la vitesse,
- l'accélération.

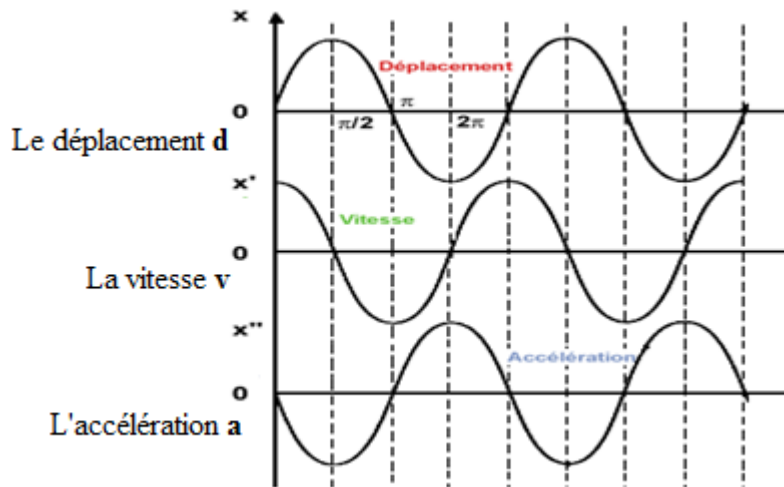


Fig. I.22. Grandeurs associées à l'amplitude d'une vibration [30].

La figure ci-dessus montre le décalage entre les maximums de chaque sinusoïde. Ce décalage est appelé une phase du signal.

- La représentation en accélération accentue les hautes fréquences.
- La représentation en déplacement accentue les basses fréquences.
- La représentation en vitesse n'accroît pas les basses et les hautes fréquences [30].

Il existe des relations mathématiques entre les trois grandeurs de la vibration déplacement, vitesse et accélération, ces relations sont:

$$x = \frac{v}{2\pi f} = \frac{\gamma}{(2\pi f)^2} \tag{I.9}$$

$$v = \frac{\gamma}{2\pi f} = 2\pi f \cdot x \tag{I.10}$$

$$\gamma = 2\pi f v = (2\pi f)^2 \cdot x \tag{I.11}$$

### I.8.6. La détermination des fréquences d'un signal

La naissance de phénomène de la vibration crée d'après la rotation de l'arbre d'une machine tournante. La nature de la rotation étant périodique, tout signal périodique selon Fourier se décompose d'une somme de sinusoïdes que l'on appelle série de Fourier.

Si « S » (S peut désigner l'accélération, la vitesse ou le déplacement) est une fonction périodique du temps, on peut écrire :

$$S(t) = \sum S_n \cdot \sin(\omega_n \cdot t + \varphi) \tag{I.12}$$

Le résultat de la somme de 2 signaux sinusoïdaux est montré dans la figure ci-dessous

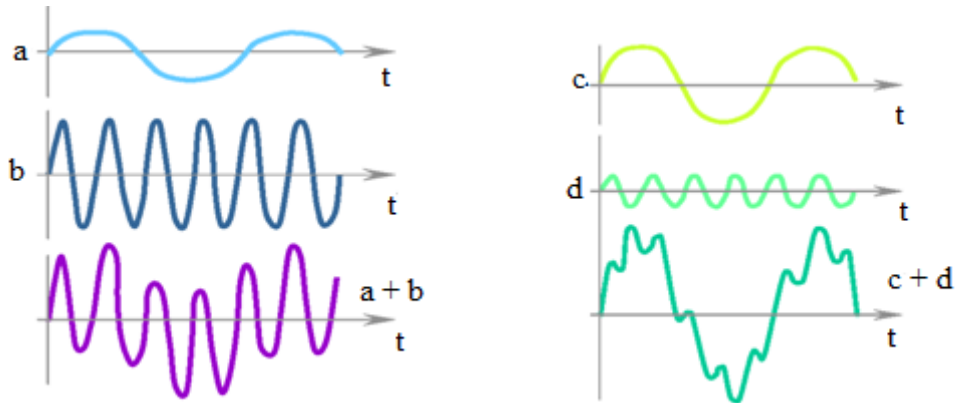


Fig. I.23. La somme de deux signaux sinusoïdaux

La représentation du signal vibratoire ne permet pas l'analyse, car tous les termes sont superposés. On a donc besoin d'un outil mathématique supplémentaire.

Si on applique la transformée de Fourier sur une fonction du temps comme l'accélération, la vitesse ou le déplacement, le résultat obtenu est une autre fonction en relation avec la fréquence. Cette nouvelle fonction est appelé spectre.

On peut conclure que la représentation de l'amplitude en fonction de la fréquence est appelée spectre.

Ex : le spectre d'un signal sinusoïdal est un pic à la fréquence du signal comme présenté sur la Fig. I.24 [29].

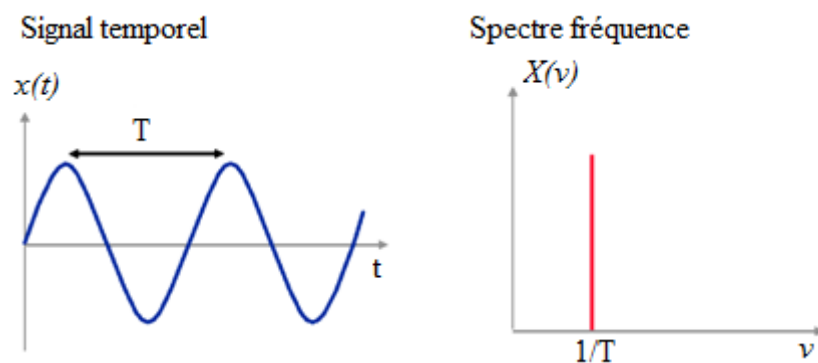


Fig. I.24. Le spectre d'un signale sinusoïdale [29].

La somme de plusieurs sinus compose un signal vibratoire, son spectre sera une succession de pic aux différentes fréquences caractéristiques du signal de départ.

La Fig. I.25, ci-dessous illustre un signal temporel constitué par une somme de 3 sinus, le spectre est donc constitué de 3 pics dont les fréquences sont celles des 3 sinus.

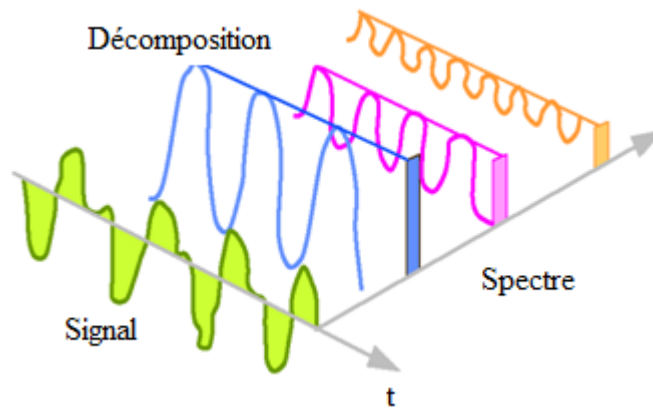


Fig. I.25. Un signal de 3 sinus et un spectre de 3 pics [29].

### I.8.7. La nature de vibration

Chaque nature de vibration connaît par sa représentation temporelle, plus de détails dans les références [22, 31], la Fig. I.26 illustre ces natures.

Nature de vibration	La représentation temporelle de vibration	Les causes
Périodique de type sinusoïdal simple		Balourd
Périodique de type sinusoïdal complexe		Engrènement
Périodique de type impulsionnel		Ecaillage des roulements
Aléatoire de type impulsionnel		Défauts de lubrification sur des roulements cavitation

Fig. I.26. La représentation temporelle de chaque nature de vibration

### I.9. La conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons étudié la maintenance en générale et la maintenance préventive conditionnelle en particulier.

La maintenance des systèmes de production n'est pas une tâche facile. Ceci exige entre autres, des ressources humaines compétentes, des outils et du matériel adapté aux équipements ainsi qu'aux installations à maintenir. Plusieurs outils peuvent être utilisés comme l'analyse d'huile, thermographie et l'analyse vibratoire pour assurer une maintenance conditionnelle efficace.

Cependant, l'analyse vibratoire qui a fait ses preuves est la plus connue et la plus largement utilisée. Il faut dire qu'elle permet de détecter pratiquement tous les défauts susceptibles

d'apparaître dans les machines tournantes. Un balourd, un jeu, un défaut d'alignement, un roulement usé ou endommagé se traduisent par une variation des efforts internes que subit la machine et donc à un changement de son comportement vibratoire.

En plaçant des accéléromètres aux endroits où se transmettent ces efforts (fixation de l'accéléromètre sur les paliers des machines) en signal électrique, on peut alors suivre l'état de santé de l'équipement par l'analyse de ce signal. La méthode présente trois grands avantages : les mesures sont faciles à prendre, les défauts sont détectés à un stade précoce et il est possible de réaliser un diagnostic approfondi pour en connaître l'origine.

Le chapitre qui suit sera consacré à l'étude du premier élément de la chaîne de mesure qui est le capteur de vibration.

# **Chapitre II : Le capteur de vibration**

II.1. Introduction

II.2. La chaîne de mesure de vibration

II.3. Le capteur

II.4. Les différents types de capteurs de vibration

II.5. Choix d'un capteur

II.6. Accéléromètres piézoélectriques

II.7. Conclusion



# Chapitre II

## Le capteur de vibration

### II.1. L'introduction

Les nouvelles exigences imposées aux installations industrielles dans leur fonctionnement et dans la qualité de leur production, nécessitent une stratégie très élaborée pour maîtriser ces installations. La difficulté est d'avoir des informations adéquates et sûrs qui permettent de concevoir une action correctrice efficace. Le développement des capacités de traitement de l'information permet le contrôle et l'automatisation des systèmes de plus en plus complexes. Les possibilités de calcul des parties commandes ne semblent limitées que par la quantité et la qualité des données qui leur sont fournies. Au fur et à mesure les parties commandes augmentent en puissance, le calcul nécessite un flux d'informations de plus en plus grand. Le capteur et spécialement l'accéléromètre joue un rôle important dans le contrôle et la commande des systèmes industriels. Ce chapitre sera réservé aux capteurs, leurs fonctionnements, leurs importances dans la chaîne de mesure de vibration et leurs classifications.

Dans le milieu industriel, le mot capteur est souvent réservé à des appareils compacts. Pour des appareils plus encombrants on parlera de transmetteurs, ou pour des appareils spécialisés dans des mesures physico-chimiques, on parlera d'analyseurs industriels. Ils sont souvent classés en deux grandes familles [36]. En fonction de la nature de l'information émise :

- Les capteurs tout ou rien (TOR): ce sont des capteurs émettant un signal binaire 0 ou 1 (vrai ou faux) en fonction de la position de la valeur de la grandeur mesurée par rapport à une consigne. Ils sont utilisés dans les automatismes séquentiels.
- Les capteurs analogiques ou continus: ils émettent un signal analogique ou numérique. Une fonction généralement linéaire lie le signal émit à la grandeur mesurée.

### II.2. La chaîne de mesure de vibration

La chaîne de mesure est composée d'éléments [36] montés comme illustré sur la Fig. II.1.

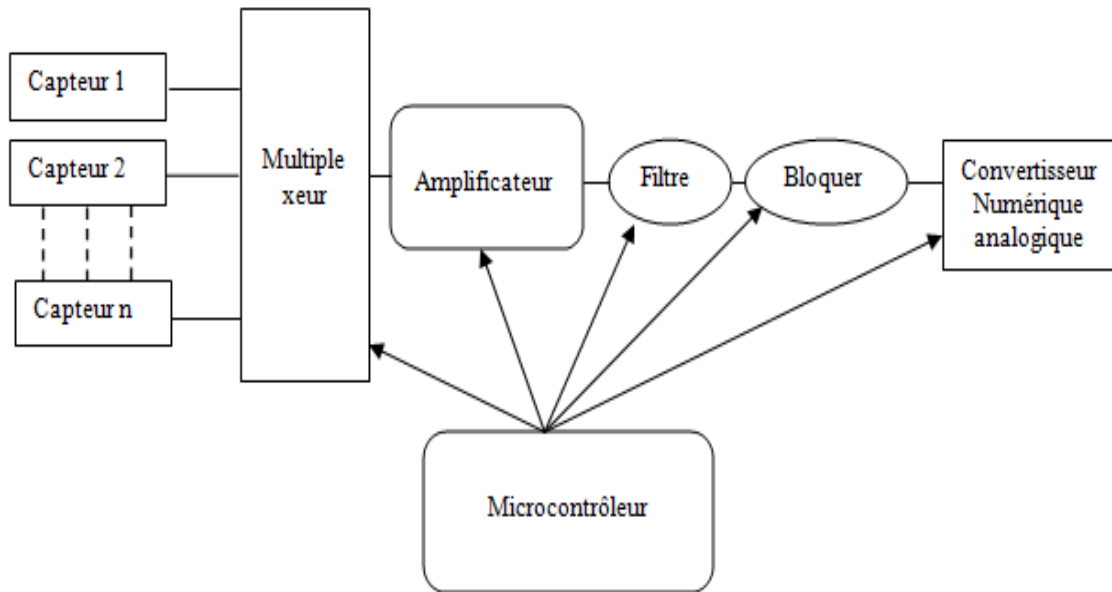


Fig. II.1. Les composants de la chaîne de mesure

- un ou plusieurs capteurs qui fournissent à l'entrée de la chaîne de mesure le signal électrique porteur de l'information du mesurande. Ce signal est donné directement par le capteur actif ou par l'intermédiaire du conditionneur du capteur passif.
- Un multiplexeur analogique chargé de choisir l'un des signaux électriques dans le cas d'un dispositif comprenant plusieurs capteurs.
- Un amplificateur de signal
- Un filtre analogique qui limite la bande passante aux fréquences significatives du signal.
- Un échantillonneur-bloqueur qui enregistre le niveau analogique pendant le temps nécessaire à son traitement.
- Un convertisseur analogique-digital qui donne l'information numérique.
- Un microcontrôleur qui assure une, deux ou trois tâches indiquées ci-dessous :
  - \*arrangement de la chaîne de mesure en sélectionnant les voies, les gains, et les filtres,
  - \*opérations mathématiques de traitement du signal et d'analyse des données
- Affichage ou communication des résultats de la mesure sur une interface d'entrée-sortie informatique.

### II.2.1. L'importance de la précision de mesure

La précision de mesure est importante pendant l'utilisation d'un capteur. L'amélioration de cette caractéristique parvient du traitement suivant [37]:

- Pour l'opération de filtrage ou l'opération d'extraction des paramètres du signal, il faut une implantation d'algorithmes de traitement du signal.

- La compensation des grandeurs d'influence en réalisant une structure à plusieurs capteurs sur laquelle se base la fusion des données.

### II.2.2. Le signal émis

Le signal émis par le capteur est en général, un signal analogique en courant (4 - 20mA) ou en tension (1-5volts). On alimente le capteur par l'énergie électrique par l'intermédiaire d'une ligne de communication [38].

### II.3. Le capteur

Le mesurande (m) est la grandeur physique mesurée et capturée par diverses opérations expérimentales, que l'on rassemble sous le terme de mesurage, qui dans plusieurs cas produit un signal électrique (s) image de la grandeur physique et de ses vibrations [36]. Le dispositif physique qui soumit à l'action du mesurande appelé un capteur, non électrique, produit la caractéristique électrique :

$$S = F(m) \tag{II.1}$$

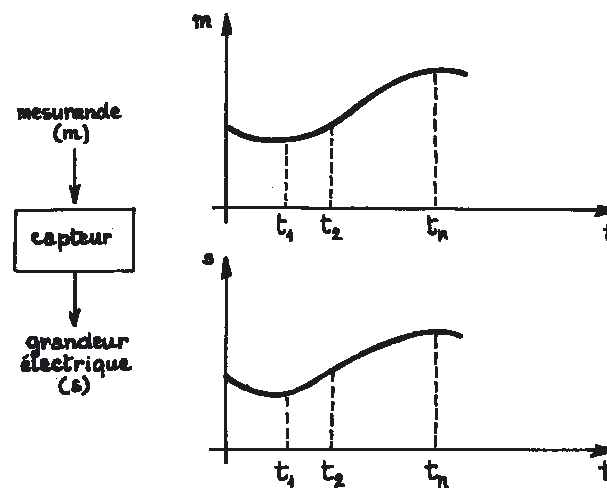


Fig. II.2. La fonction essentielle du capteur

Théoriquement, cette relation découle des lois physiques qui gèrent le fonctionnement du capteur. Numériquement, cette relation dépend de la conception du capteur, ses matériaux et de son environnement. Par conséquent, la formule numérique est fréquemment obtenue par une opération d'étalonnage, qui produit une courbe plus ou moins linéaire. Cette dernière est utilisée dans une zone linéaire dans laquelle la sensibilité S du capteur est constante et en fonction des variations de la grandeur de sortie  $\Delta S$  et d'entrée  $\Delta m$  :

$$\Delta S = S * \Delta m \tag{II.2}$$

La technique de l'instrumentaliste consiste à utiliser la sensibilité S du capteur en réduisant les effets de la non-linéarité du mesurande m, de sa bande passante, du vieillissement, ainsi que l'influence des autres grandeurs physiques présentes dans l'environnement du capteur mais qui ne

sont pas l'objet de la mesure [36].

### II.3.1. Les grandeurs d'influence

Les grandeurs d'influence sont des grandeurs qui peuvent générer des perturbations sur le capteur et cause des erreurs qui agissent sur le signal de sortie. La plupart des grandeurs d'influence sont liées à l'environnement des capteurs tels que [39]:

- la température (la plus importante)
- la pression environnante,
- les vibrations mécaniques ou acoustiques, les chocs, le temps,
- la position du capteur et sa fixation,
- l'humidité, la projection d'eau, l'immersion,
- les ambiances corrosives,
- les perturbations électromagnétiques,
- les rayonnements nucléaires,
- les accélérations et la pesanteur,
- l'alimentation électrique du capteur

### II.3.2. Le capteur de vibration

Le premier élément de la chaîne de mesure est le capteur de vibrations. Dans l'industrie le type le plus utilisable est l'accéléromètre ou capteur piézoélectrique. Généralement, le principe de fonctionnement des accéléromètres est de produire un signal électrique relatif au niveau de vibration [40].

Le choix de la façon d'utilisation de l'accéléromètre joue un rôle essentiel dans la prise de mesure. Les résultats des accéléromètres sont affectés par leur mode de fixation et leur emplacement. Il faut une liaison parfaite pour réaliser la fixation du capteur sur la structure vibrante. Il existe plusieurs modes de fixation tels que le goujon vissé, l'embase collée, l'embase magnétique et la pointe touche. Ces différents modes jouent un rôle important dans la mesure correcte des vibrations. La conception du capteur est en fonction du choix de l'emplacement de ce dernier. L'accéléromètre doit être placé à un endroit où la mobilité est maximale. Pour éviter les interférences extérieures, il faut placer le capteur près du défaut potentiel.

### II.4. Les différents types des capteurs de vibration

Dans la dynamique, La loi fondamentale est la relation entre l'accélération (A) appliquée à un corps et la force (F), alors on écrit :  $(F=M*A)$ ; où m est la masse. L'interaction entre la force et l'accélération est réciproque. La plupart des accéléromètres fonctionnent selon ce principe. L'évaluation de l'accélération est faite par la mesure de la force exercée sur un corps d'épreuve,

ou encore la déformation que cette dernière produit sur une structure. Divers techniques existes pour estimer le déplacement du corps d'épreuve. Les principaux types d'accéléromètres existants sont décrits et résumés ci-dessous [41].

#### II.4.1 L'accéléromètre à détection capacitive

Actuellement, les accéléromètres à détection capacitive sont les capteurs les plus utilisés. Leur principe de fonctionnement est illustré dans la Fig. II.3. La partie du capteur sensible à l'accélération est le corps d'épreuve (est une électrode mobile). Entre le corps d'épreuve et une partie fixe du système, la capacité est formée. Lors de l'accélération, l'éloignement et le rapprochement du corps d'épreuve à l'élément fixe varie la capacité, dans ce cas la détection consiste à évaluer l'accélération.

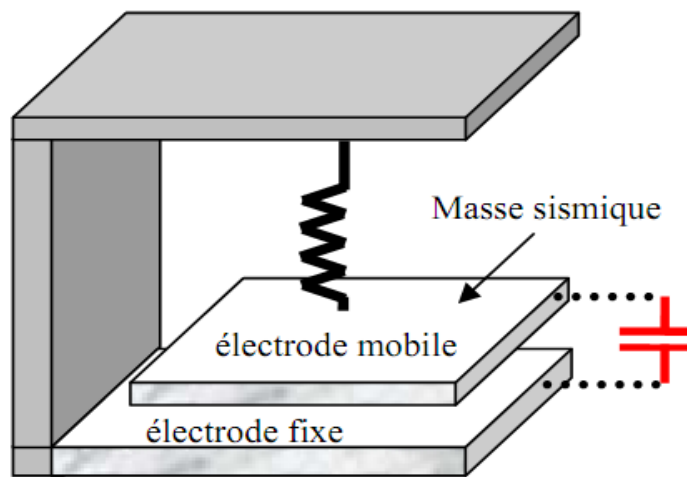


Fig. II.3. Le principe de l'accéléromètre capacitif [41]

Deux types de gravure sont utilisés pour les accéléromètres à détection capacitive. Deux étapes post-process sont nécessaires pour la gravure en volume (bulk micromachining) : l'une pour supprimer le diélectrique et l'autre pour libérer la partie mobile. Pour obtenir des structures suspendues, il faut utiliser la gravure en surface (surface micro-machining) qui consiste à éliminer des couches superficielles. Le gap entre les différents doigts étant très petit (de l'ordre du micron) cette technique permet de réaliser des capacités (de l'ordre du femto Farad). Les avantages des structures capacitives sont: une faible sensibilité aux variations de température, une bonne réponse statique et une bonne performance en termes de bruit. À l'aide d'une force électrostatique, on utilise un retour de la force sur les structures qui permettra d'augmenter la robustesse du système face à des chocs élevés ou des vibrations de très grande amplitude, d'augmenter la linéarité et la stabilité, d'améliorer la réponse en fréquence, et enfin d'élargir la bande passante [41]. Ces structures sont sensibles aux interférences électromagnétiques à cause de leur nature capacitive. Le conditionnement de l'électronique devient ainsi plus complexe. Une électronique

performante est exigée pour obtenir une bonne résolution de petites variations de capacité lors du fonctionnement. La Fig. II.4 montre une structure d'accéléromètre à détection capacitive. Les capacités sont formées par des poutres disposées de façon à établir des peignes inter-digités. Le corps d'épreuve est un peigne mobile inter-digité avec un peigne fixe. Des capacités sont obtenues entre les doigts des peignes. Il y a des problèmes d'alignement des éléments capacitifs car les poutres formant les capacités se courbent à l'issue de la fabrication.

Pour les accéléromètres verticaux, les performances en termes de bruit sont de l'ordre du  $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$  et pour les accéléromètres latéraux sont de l'ordre de la centaine de  $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ .

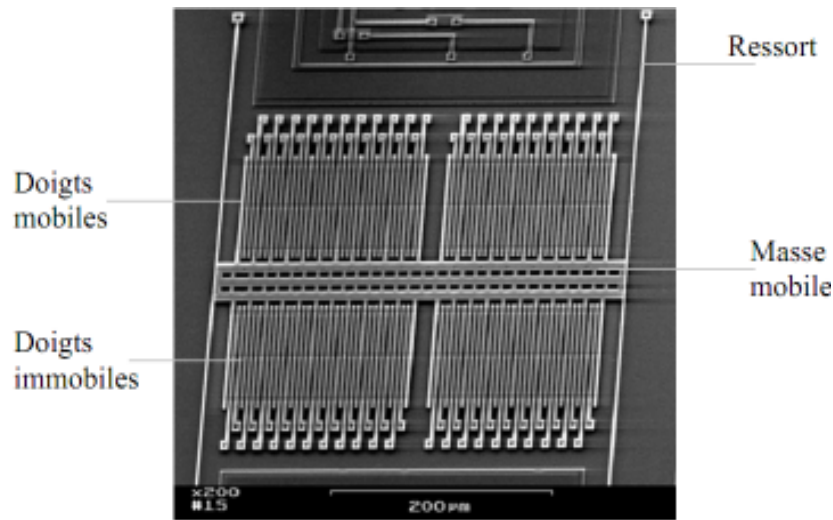


Fig. II.4. Accéléromètre à détection capacitive [41].

#### II.4.2 L'accéléromètre à détection piézorésistive

Dans les premiers accéléromètres, généralement la détection piézorésistive est utilisée jusqu'à présent dans certains capteurs commercialisés. Les microsystemes à détection piézorésistive sont réalisés exclusivement par l'utilisation de procédé de gravure en volume (bulk micromachining). Tirant profit de la philosophie de la technologie de fabrication des capteurs de pression, les accéléromètres à détection piézorésistive micro-usinés en volume ont été développés et sont aujourd'hui en production [41].

Le corps d'épreuve est une poutre ou une masse suspendue, la variation de la résistance d'un élément piézorésistif permet de mesurer la déformation de la structure lors de l'accélération, la Fig. II.5 illustre ce principe. L'intégration de ces capteurs est facile en technologie.

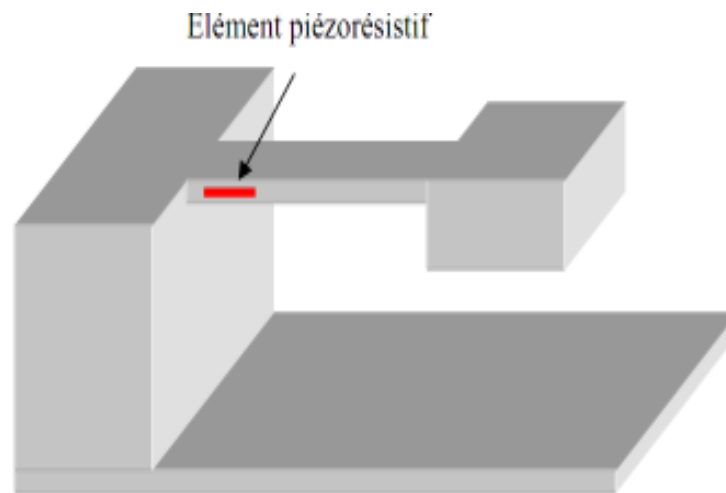


Fig. II.5 Principe de l'accéléromètre à détection piézorésistive [41]

#### II.4.3. L'accéléromètre à détection à base de piezojonction de transistor

Les conséquences des contraintes mécaniques sur le comportement des transistors ont été étudiées car des contraintes sur les circuits électroniques peuvent apparaître lors de l'encapsulation.

Dans ce type d'accéléromètre la piézo-sensibilité des transistors bipolaires est utilisée à la place des jauges piézo-résistives pour la mesure du signal. La contrainte exigée entraîne une repopulation des électrons dans le canal du transistor et échange ainsi le mouvement des électrons. Dans ce cas, on utilise un transistor comme un élément sensible qui réduit considérablement la taille de l'élément de transduction à la place de piézo-résistances. Cette approche a l'avantage de diminuer largement la puissance consommée par rapport à la détection piézo-résistive, ce qui représente un atout pour certaines applications [41].

#### II.4.4. L'accéléromètre à détection piézoélectrique

Un corps ayant la propriété de montrer un potentiel à ses bornes lorsqu'il est soumis à une force est appelé un corps piézoélectrique. Les matériaux utilisés sont souvent le ZnO ou le PZT (Piezoelectric lead Zirconate Titanate). Pour réaliser une contre réaction sur la structure, on utilise la propriété inverse de la piézoélectricité. Pour ce type d'accéléromètre, on peut utiliser un élément piézoélectrique unique (dans ce cas on échantillonne le temps et on le partage entre l'actionnement et la mesure) ou alors deux éléments piézoélectrique (ici les deux éléments forment un sandwich, l'un servant à l'actionnement et l'autre à la mesure). L'avantage de cette détection est la transduction à puissance consommée nulle (les variations de contraintes engendrant un potentiel).

Deux types de gravure sont utilisés dans les accéléromètres à détection piézoélectrique, le premier type est bulk-micromachining et le deuxième type est surface-micromachining. Cette méthode de

détection n'est pas acceptable avec une fabrication complètement CMOS (full-CMOS), il a besoin de dépôt de films piézoélectriques sur les structures. La Fig. II.6 illustre un accéléromètre à détection piézoélectrique [41].

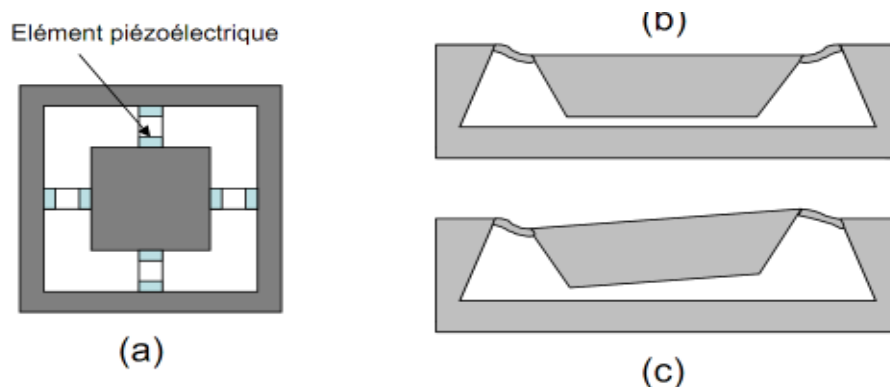


Fig. II.6. Un accéléromètre piézoélectrique à trois axes [41]

(a) vue de dessus de la structure, (b) accélération verticale, (c) accélération latérale

#### II.4.5 L'accéléromètre à détection à effet tunnel

Ce type d'accéléromètre est développé par les chercheurs du JPL (Jet Propulsion Laboratory, Pasadena), en se basant sur l'exploitation de l'effet des microscopes à effet tunnel. Pour produire l'effet tunnel, il faut une pénétration d'électrons entre deux électrodes métalliques, cela donne une plus faible barrière isolante entre ces deux électrodes [41].

Il nécessite entre une pointe attachée à la structure mobile et une électrode fixe un courant de (1 à 2 nA), l'espace de séparation étant de l'ordre de quelques angströms.

À l'aide d'une force électrostatique on asservit la position de la pointe. On mesure la tension nécessaire lors de l'accélération (pour produire la force électrostatique) au maintien à la même position de la pointe tunnel de façon à conserver le courant de tunnel constant. Un exemple d'accéléromètre à effet tunnel présenté dans la Fig. II.7. Ces dispositifs peuvent prendre de très grandes sensibilités (résolution de l'ordre du  $\mu\text{g}$ ), on double le courant de tunnel à chaque Angström de déplacement, des changements de l'ordre du milli-Angström sont mesurables. Pour une bande passante de 1.5kHz, on obtient des résolutions de 0,5 $\mu\text{g}$ .



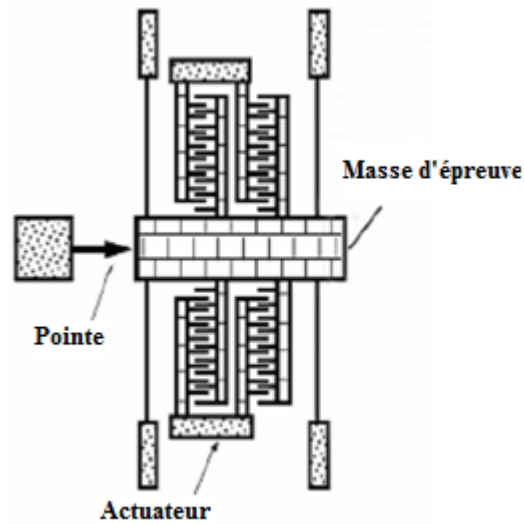


Fig. II.7. Un accéléromètre à effet tunnel [41]

#### II.4.6 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 [41].

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 (Fig. II.8).

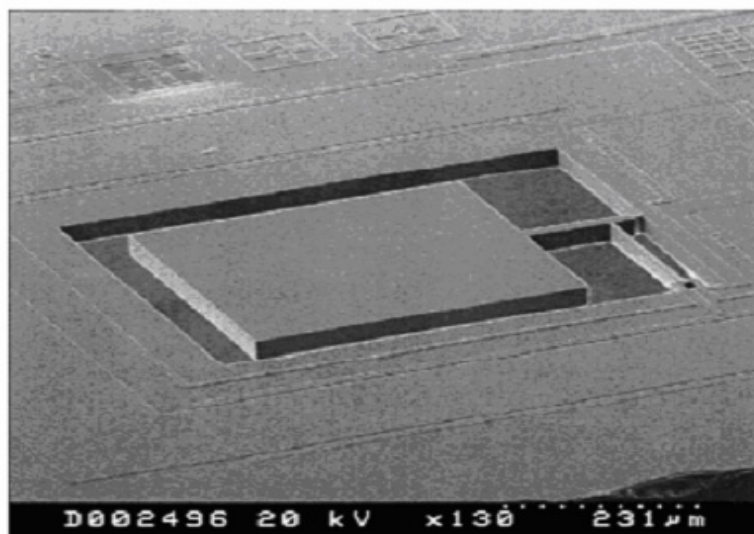


Fig. II.8. Un accéléromètre résonnant [41].

### II.4.7 L'accéléromètre à détection optique

On profite des avantages des deux domaines par l'association de l'optique et du micro-usinage, cette association conduit à des capteurs miniatures insensibles au bruit d'interférence électromagnétique avec une réponse à l'accélération linéaire.

Il existe deux types de détections. La première consiste à mesurer l'intensité de la lumière modulée par l'accélération (Fig. II.9) [41]. La deuxième 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 à une longueur d'onde qui concernera la distance miroir fibre optique (interféromètre de Fabry-Perrot).

Ces capteurs possèdent des inconvénients tels que la nécessité d'une source lumineuse, l'alignement parfait des fibres optiques et un coût trop élevé.

Aujourd'hui, exception pour quelques capteurs de pressions pour des applications hautes températures, aucun capteur MEMS à fibre optique n'est compétitif sur le marché. Ces capteurs sont spécialement destinés à des fonctionnements en environnement hostile (hautes températures, hautes interférences électromagnétiques ...).

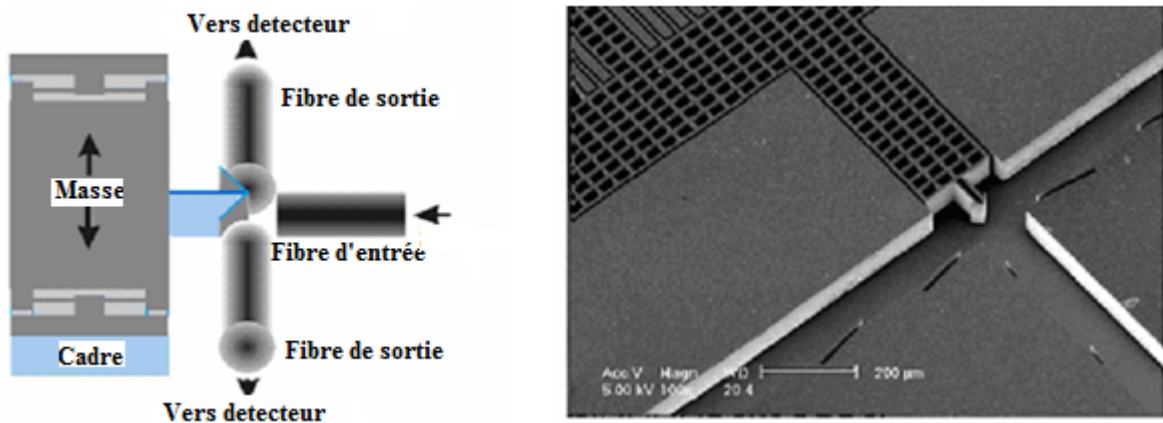


Fig. II.9. Un accéléromètre optique [41]

### II.4.8 L'accéléromètre à détection thermique

On distingue deux types d'accéléromètres à détection thermique.

Le premier type possède une masse sismique suspendue au-dessus d'une source de chaleur (une simple résistance chauffante). La distance séparant la source de chaleur et le corps d'épreuve est changée par l'accélération qui joue le rôle de "puits de chaleur". Un flux de température de l'élément chauffant vers la masse sismique est entraîné par la différence de température. Si la distance à la masse est petite, ce flux devient plus important. Ce dernier dépend de l'accélération et la température proche de la résistance chauffante peut être mesurée à l'aide de thermocouples (polysilicium-aluminium) ou de thermistance [41].

Le deuxième type à détection thermique est un capteur sans masse d'épreuve. Ce type est basé sur le principe du transfert de chaleur par convection, d'une résistance chauffante vers des thermistances. La Fig. II.10 illustre ce type d'accéléromètre. La résistance chauffante produit une distribution symétrique de la température. Lorsqu'une accélération est appliquée, la distribution devient asymétrique et les capteurs latéraux permettent de mesurer la différence de température. La réalisation des accéléromètres thermiques est très simple, ces accéléromètres sont exclusivement de type FSBM (gravure en volume par face avant). La cavité dans le silicium permet de séparer thermiquement la résistance chauffante et aussi de provoquer une réduction de l'énergie consommée. Une attention particulière doit être portée à la conception de tels capteurs. Lorsque les détecteurs sont suffisamment proches de la résistance chauffante, il est possible de mesurer le gradient de température (remarquable qu'une rapidité de décroissance de la température quand on s'en éloigne); pourtant lorsque les détecteurs sont trop proches de l'élément central la sensibilité est réduite, en effet la sensibilité est relative à  $\Delta T/T_0$ ,  $T_0$  étant la température des détecteurs en manque d'accélération. La diminution de la sensibilité provoque une augmentation de la température ambiante (exigence de balancer l'effet de la température). Elle est relative à la puissance de chauffe et au carré de la pression de l'air dans la cavité, acceptant ainsi d'approcher des résolutions moindres au micro-g [41].

La fréquence de coupure de ces accéléromètres est de l'ordre de quelques centaines de hertz. Ensuite, l'inclinaison du diagramme de Bode étant du deuxième ordre, le signal n'est plus exploitable. Il doit agrandir la pression, diminuer les dimensions de la cavité et modifier la nature du gaz pour augmenter la bande passante (qui dépend de la constante thermique).

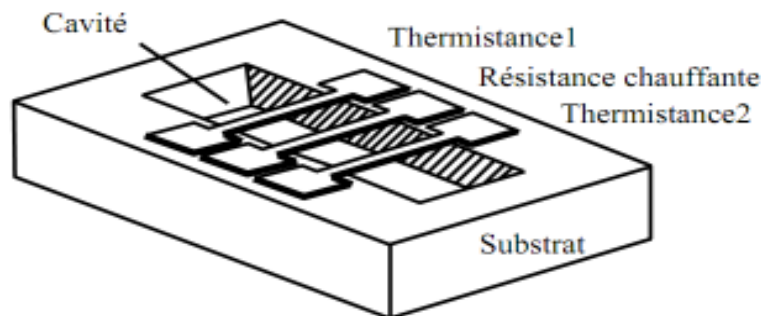


Fig. II.10. Un accéléromètre thermique [41]

#### II.4.9 L'accéléromètres à détections originales

Une fluide magnéto-rhéologique utilisé pour un accéléromètre à détection capacitive comme diélectrique a été étudié [41]. 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 électro-magnétique de la sphère besoin une tension nécessaire pour maintenir la sphère à la même position qui nous renseigne sur la valeur de l'accélération. La Fig. II.11 illustre une photo de l'accéléromètre à lévitation électromagnétique. Cet accéléromètre mesure l'accélération verticale et latérale avec une grande résolution. L'inconvénient de fabrication atypique de cet accéléromètre nécessite une tension d'alimentation élevée (15-30V).

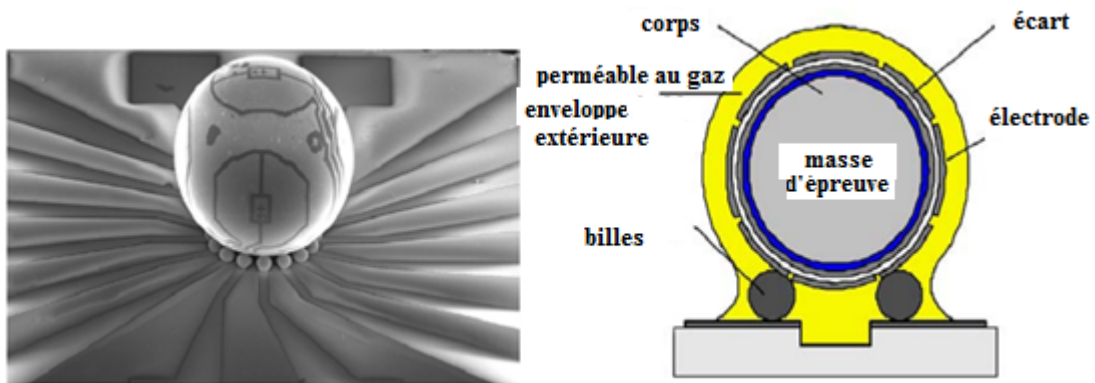


Fig. II.11. Un accéléromètre à lévitation électromagnétique [41]

Deux inductances sont utilisé dans cet accéléromètre, l'une sur la masse sismique et l'autre, séparée par de l'air, sur la partie immobile. Si on impose un courant à la première inductance, un champ magnétique est créé, il en résulte dans le second enroulement un courant proportionnel à l'amplitude du premier courant qui est proportionnel a son tour à la distance séparant les deux enroulements [41].

## II.5. Le choix d'un capteur

Pour faire un choix du capteur, on est conduit à connaitre leurs caractéristiques. Il est évident que la nature de la grandeur à mesurer limite l'éventail des capteurs à utiliser. Un autre facteur important est le prix qui est souvent un élément déterminant. Les contraintes de fonctionnement imposées par le système sur lequel on fera la mesure et les caractéristiques métrologiques imposées par le cahier de charge sont aussi des critères essentiels pour le bon fonctionnement du capteur [37].

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

- utilisable sur de très grandes gammes fréquentielles;
- large bande passante;

- bonne dynamique (rapport signal/bruit) ;
- taille réduite;
- solidité (aucune pièce en mouvement)

## II.6. Les accéléromètres piézoélectriques

### II.6.1. Le principe de fonctionnement

Dans ce modèle d'accéléromètre, la masse sismique est supportée par un élément piézoélectrique, qui donne un signal électrique relatif à la force de rappel, donc un déplacement de la masse sismique. L'ensemble est associé d'une embase rigide, le tout étant contenu dans un boîtier étanche.

L'accélération couramment mesuré dans les deux sens, le long de la direction de l'axe sensible, que la résistance mécanique du matériau piézo-électrique et des moyens de liaison nécessaires (collages ...) est différente en fonction de la nature de la contrainte appliquée (la compression, la traction, la cisaillement), il est nécessaire dans la plupart des cas pour assurer une précontrainte mécanique sur l'élément sensible afin d'étendre la zone de mesure dans les deux sens de l'accélération [36].

Ceci n'est pas toujours réalisable est accompli différemment suivant le mode de travail du matériau : mode longitudinal (accéléromètre dit en compression), mode de cisaillement, et mode de flexion.

#### A) Un accéléromètre piézoélectrique à compression

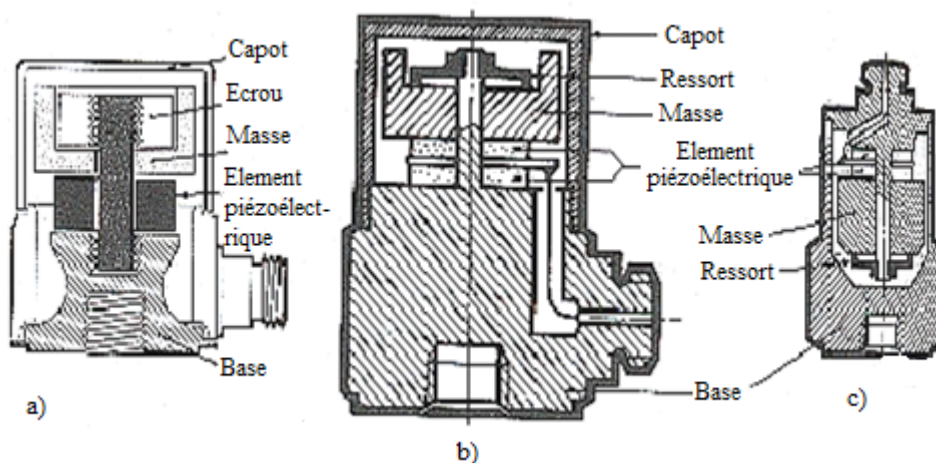


Fig. II.12. Coupes d'accéléromètres piézoélectriques à compression axiale [36].

Les caractéristiques propres à ces capteurs sont :

- Une fréquence de résonance assez grande car c'est le mode de fonctionnement correspondant par nature à la plus grande rigidité de l'élément piézoélectrique (module de compression)
- Une grande robustesse
- Une certaine sensibilité aux contraintes de base, qu'il est nécessaire de diminuer en rendant la base massive et découplée mécaniquement du cristal : forme adéquate de la base (Fig. II.12.a), montage inversé (Fig. II.12.c).
- Une sensibilité aux effets piézoélectriques qui nécessite d'apporter des moyens de compensation ou d'isolation lorsque les conditions de fonctionnement sont défavorables (mesures en très basse fréquence, température pouvant changer) [36].

**B) Un accéléromètre piézoélectrique à cisaillement**

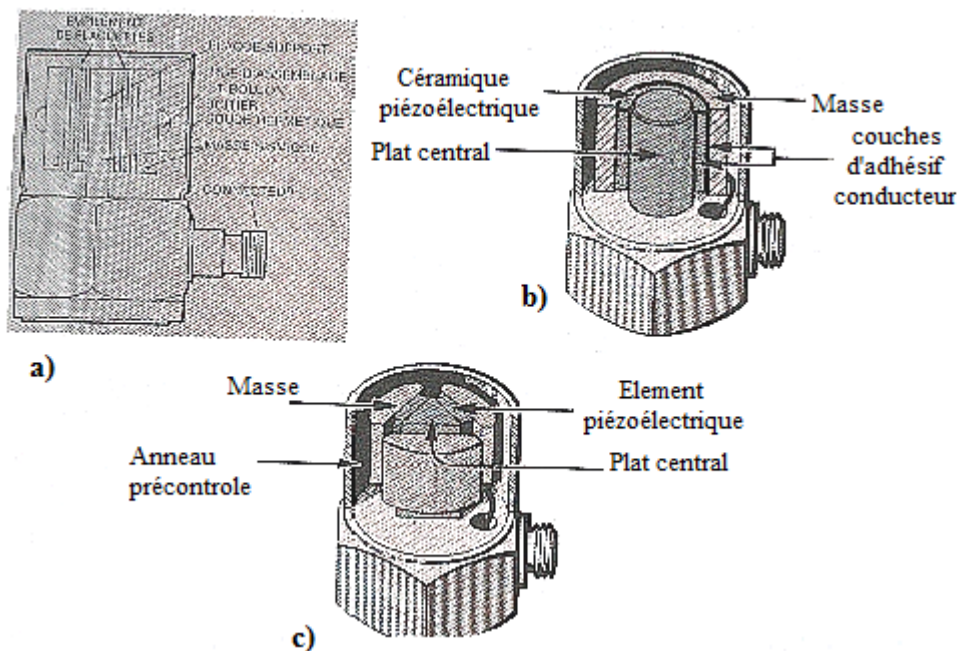


Fig. II.13. Constitution des accéléromètres piézoélectriques à cisaillement; montage : a- à empilement de plaquettes; b- à élément tubulaire; c- à cisaillement en delta [36].

Ces accéléromètres sont composés :

- Soit d'un empilement de plaquettes piézoélectriques boulonnées entre deux pièces métalliques servant de masse sismique (a).
- Soit d'un élément piézoélectrique en forme d'anneau (b) ou formé de plusieurs éléments plans (c), serti de force entre la ou les masses sismiques périphériques et la colonne centrale.
- Une certaine fragilité due au mode de travail du matériau piézoélectrique.

Le montage à empilement de plaquettes (a) et les montages à symétrie de révolution (b) et (c) se prêtent mieux à un assemblage mécanique précis, garant d'une faible sensibilité transversale, et à la miniaturisation, permettant d'obtenir une grande finesse.

**C) Un accéléromètre piézoélectrique à montage en port-à-faux**

Dans leur principe, ils utilisent la flexion d'un couple de minces plaquettes piézoélectriques collées Fig. II.14, dont l'extrémité porte une masse lotte. La sensibilité que leur confère cette forme peut être très grande, au détriment de la fréquence de résonance; leur champ d'applications est limité aux accélérations vibratoires de faible niveau et basse fréquence, où d'autres modèles, non piézoélectriques, ont des performances supérieures mais sous un encombrement généralement plus important [36].

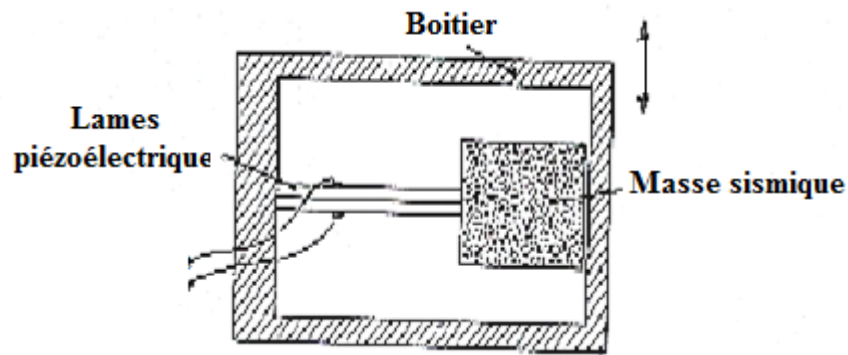


Fig. II.14. Principe d'un accéléromètre piézoélectrique à montage en porte-à-faux [36].

**II.6.2. Les caractéristiques métrologiques**

**II.6.2.1. La sensibilité et la réponse en fréquence**

La sensibilité du capteur (accéléromètre) est déterminée par la l'expression suivante [36]:

$$S = Q / \gamma = S_1 \cdot S_2 \tag{II.3}$$

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

$z$  : le déplacement relatif de la masse sismique,

$Q$  : la charge électrique résultante,

$S$  : la sensibilité

$S_1$  : la sensibilité mécanique du système à masse sismique

$S_2$  : la sensibilité électrique du capteur piézoélectrique .

$$|S_1| = \left| \frac{z}{\gamma} \right| = \frac{1}{\omega_0^2 \sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + (2\zeta \omega / \omega_0)^2}} \quad (\text{II.4})$$

$$|S_2| = \left| \frac{q}{z} \right| = d \cdot c \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_c}{\omega}\right)^2}} \quad (\text{II.5})$$

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 aux fréquences moyennes  $S_m = d \cdot c / \omega_0^2$

$$\left| \frac{s}{S_m} \right| = \frac{\frac{1}{\omega_0^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_c}{\omega}\right)^2} \sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + (2\zeta \omega / \omega_0)^2}} \quad (\text{II.6})$$

Ordres de grandeur (type à compression et cisaillement):

$$S_m \approx 10 \text{ à } 100 \text{ pc/g}$$

$$f_0 = \omega_0 / 2\pi \approx 10 \text{ à } 50\text{kHz}$$

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  $[-5\% \text{ } +5\%]$  sont:

$$\text{Pulsation limite inférieure: } \omega_1 \approx 5\omega_c$$

$$\text{Pulsation limite supérieure : } \omega_2 \approx 0.2 \omega_0$$

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].

### II.6.2.2. L'étendue de mesure (E.M), linéarité

L'étendue de mesure est limitée :

- vers le bas, par les bruits électriques dus au câble de liaison et à l'amplificateur, et les effets pyroélectriques éventuels ; avec des accéléromètres de sensibilité de l'ordre de 10 pc/g, cette limite est d'environ 0.001g
- vers le haut, par la solidité structurelle du capteur, soit couramment et selon la sensibilité, 5000 à 10000g, voir 10000g (accéléromètres pour chocs violents).

Dans le cas des accéléromètres à compression à précontrainte, celle-ci est un élément déterminant de l'étendue de mesure.



Dans un accéléromètre piézoélectrique, l'écart de linéarité dépend de:

- la non-linéarité propre du matériau piézoélectrique (le coefficient piézoélectrique varie avec la contrainte appliquée); pour le quartz est très faible et pour le céramique diminuée par la précontrainte.
- la non-linéarité d'ordre mécanique affectant le ressort de précontrainte axiale (ou son équivalent dans le cas d'une compression par écrou) et qui n'intervient donc pas dans le cas des accéléromètres à cisaillement.

La non-linéarité se manifeste par un agrandissement de la sensibilité, allant de 0.5% (cisaillement) à 5% (compression à vis) par 1000g dans les accéléromètres piézoélectriques à céramiques [36].

### II.6.3. La réponse d'un accéléromètre

La réponse d'un accéléromètre piézoélectrique est montrée sur la courbe illustrée par la Fig. II.15.

Dans cette figure, il existe deux zones :

- une zone de linéarité du capteur : c'est la plage de fréquences à l'intérieur de laquelle la réponse du capteur correspond à l'amplitude du signal mesurée avec une bonne sensibilité. Cette zone identifie la plage de fréquences pour une bonne utilisation du capteur.
- Une zone contenant la résonance du capteur à l'intérieur de laquelle les mesures d'amplitude sont amplifiées, de façon non contrôlée. Cette zone sera évitée puisque la mesure est fautive [42].

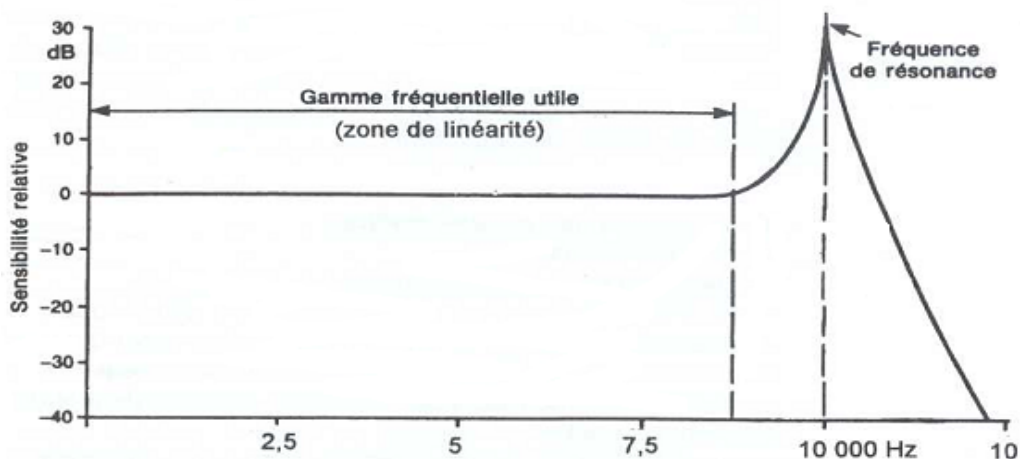


Fig. II.15. Courbe de réponse d'un accéléromètre [42].

#### II.6.3.1. La fixation des capteurs

- Le placement des capteurs doivent être lié directement avec les paliers, en bornant au strict minimum le nombre de pièces garantissant l'interface entre l'élément mouvant et le capteur (Fig. II.16).

- L'endroit des points de mesure doit être propre (pas de traces de graisse ou de peinture) et les surfaces de contact avec les capteurs lisses, planes et verticales a la direction de mesure.
- La prise de la mesure est opérée par un capteur au point judicieusement choisi en fonction des raideurs lorsque le palier est difficilement abordable de manière directe.
- Les mesures sont procédées toujours au même lieu sur la machine. Les points de mesure sont repérés, soit par la peinture, soit par place de goujons [42].

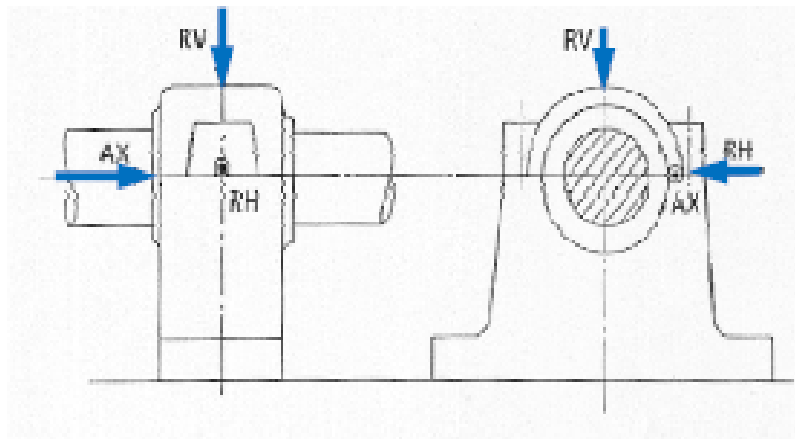


Fig. II.16. Choix directionnel pour la prise de mesure [42].

### II.6.3.2. Les modes de fixation

L'effet de la fixation du capteur sur la structure peut agir sur la qualité du signal capté. Il existe diverses façons de fixer le capteur sur la machine : lié à même structure, fixé sur une embase collée, magnétique pour les structures ferriques, ou collé avec une pointe touche. Cette fixation joue un rôle important sur les mesures, et la largeur de la bande peut être affectée. Afin que la reproductibilité et la fiabilité des mesures soient bonnes même en basses fréquences, il est recommandé d'utiliser des embases collées (cyanoacrylate de méthyle). L'accéléromètre doit être installé en des lieux (pas toujours abordables) de la structure où la mobilité est maximale pour la bande de fréquences étudiée. La tendance actuelle est de fixer le capteur près du composant à suivre, en limitant les distances et les contacts, le signal sera moins perturbé. La réponse des accéléromètres est linéaire sur une large gamme de fréquences, qui peut être réduite en fonction de leur mode de fixation (Fig. II.17). Il faut effectuer les mesures dans une gamme de fréquences inférieures à la fréquence de résonance du capteur pour obtenir des résultats fiables et précis [42].

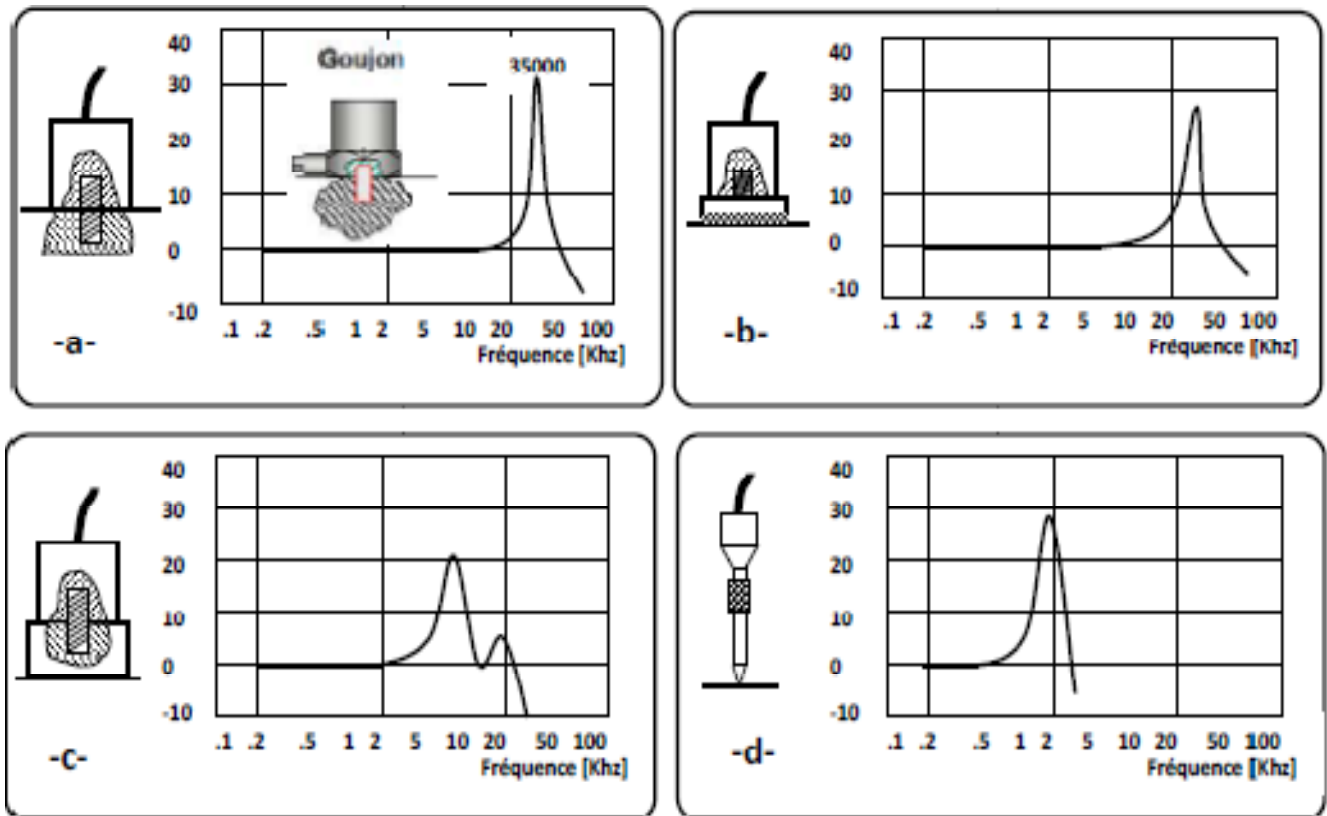


Fig. II.17. Réponse d'un accéléromètre en fonction de la fréquence selon le mode de fixation

**-a-** fixation par goujon **-b-** fixation par embase collée **-c-** fixation par aimant **-d-** fixation par pointe de touche [42]

#### II.6.4. Les grandeurs d'influence du capteur piézoélectrique

On retrouve ici les facteurs qui agissent sur les capteurs piézoélectriques (grandeurs d'influences), les différentes grandeurs d'influence sont [36] :

##### II.6.4.1. La température

La valeur et la variation de la température agit de deux façons différentes sur tout élément piézoélectrique.

L'importance de la valeur de la température sur la sensibilité électrique  $S_2$  du capteur, cette valeur influée directement sur le coefficient piézoélectrique et probablement sur des facteurs mécaniques intervenant dans la fonction de transfert mécanique-électrique (par exemple la contrainte mécanique imposée par les dimensions des pièces et leurs dilatations relatives). Cette influence sur la sensibilité ne peut se juger qu'à température stabilisée.

Les variations de température de l'élément piézoélectrique entraînent la production de signaux électriques même dans le cas de l'absence de grandeur d'entrée vibratoire. Ces signaux sont dus à

des contraintes mécaniques subies par l'élément piézoélectrique du fait d'allongements différentes par exemple et à la propriété de conversion pyroélectrique accompagnant la majorité du temps la piézoélectricité.

Généralement, les matériaux les moins performants sous l'aspect de la sensibilité accélérométrique sont les matériaux les moins influencés par la température. Par exemple, le quartz comparé aux matériaux du type titanozirconate de plomb est environ 50 fois moins sensible mais a un coefficient de température qui est de 20 à 50 fois plus faible. Entre matériaux différents, on peut utiliser des techniques de compensation.

Les effets pyroélectriques à très basse fréquence (dérives) sont filtrés de manière naturelle par le passe-haut que constitue le conditionneur associé au capteur, auquel il importe donc de ne pas donner une bande passante vers les basses fréquences plus étendue que nécessaire. L'utilisation des accéléromètres dont l'embase est refroidie par mobilité forcée de fluide pour les mesures sur des structures portées à hautes températures (jusqu'à 2000 °C). Pour bien préciser les mesures, il est nécessaire de connaître les courbes de variation de sensibilité en fonction de la température [36].

#### **II.6.4.2. Le vieillissement**

La transformation irréversible de certaines caractéristiques du capteur sous l'influence des facteurs : temps, température, sollicitations mécaniques, est appelée le vieillissement. La sensibilité de l'accéléromètre est le paramètre le plus critique (perte partielle de polarisation du matériau). Le quartz est la matière la plus utilisée dans les capteurs destinés à l'étalonnage par méthode de comparaison à cause de ses performances élevées.

Les vieillissements sont dus à la marche permanente à une température trop proche de la limite d'emploi. Un étalonnage cyclique permet de pallier les dérives dans le temps, ou dues à une surcharge accidentelle [36].

#### **II.6.4.3. Le bruit dus au câble de liaison**

Une source de bruit au câble de liaison est due à l'influence de divers coefficients mécaniques ou thermiques. En effet les déformations des isolants ou les mouvements proportionnels entre isolants ou conducteurs engendrent des mouvements de charge par conséquences triboélectriques principalement, voir piézoélectriques ou pyroélectriques et aussi par changement géométrique des capacités distribuées.

Si le conditionneur de signal miniaturisé, est inclus dans le capteur, les problèmes de câble ne se posent plus. De mise en œuvre simple, ce type des accéléromètres, appelés à électrique insérée,

montrent évidemment une faible finesse, et leur tenue en température et aux chocs est limitée par la faiblesse de la partie électronique [36].

#### **II.6.4.4. Le bruits dus à la pression acoustique ambiante**

Dans un champ acoustique de puissante intensité, son effet probablement gêne lors de mesures de faibles accélérations. De préférence, s'il y a une action directe sur l'élément piézoélectrique, il faut craindre la conséquence sur lui de l'action de pressions acoustiques sur l'embase et le boîtier, qui ne sont pas d'une rigidité absolue. L'élément piézoélectrique et l'ensemble embase-boîtier du capteur sont bien découplés (accéléromètres à cisaillement) [36].

#### **II.6.4.5. 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 [36].

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.

### **II.7. La conclusion**

Dans l'industrie, on rencontre des procédés ayant des dizaines de points de mesure. L'exploitant se base sur les informations données par les capteurs, pour suivre l'évolution de son procédé. Il remet souvent en cause la fiabilité et l'efficacité de ces capteurs.

La technicité et la conception des capteurs fait appel à de multiples domaines tel que la mécanique, l'électronique, l'informatique, la métrologie, ce qui rend complexe le travail du technicien. On choisit un capteur souvent en fonction des contraintes métrologiques et de fonctionnement. On doit l'installer convenablement pour avoir une information juste et précise, dans le but d'envisager son entretien pour assurer un fonctionnement sur une longue période. Pour assurer un bon choix du capteur, on est conduit à connaître ses caractéristiques. Il est évident que la nature de la grandeur à mesurer limite l'éventail des capteurs à utiliser. Un autre facteur important est le prix qui est souvent un élément déterminant. Les contraintes de fonctionnement imposées par le système sur lequel on fera la mesure et les caractéristiques métrologiques imposées par le cahier de charge sont aussi des critères essentiels pour le bon

fonctionnement du capteur. Dans l'industrie, l'accéléromètre le plus utilisé est l'accéléromètre piézoélectrique pour son utilisation sur de très grandes gammes fréquentielles, une bonne bande passante, une taille réduite, et une bonne robustesse. Le chapitre qui suit sera consacré au développement du modèle mathématique de l'accéléromètre, et sa validation par simulation et par test expérimental.

# **Chapitre III : Modélisation et simulation du capteur de vibration (accéléromètre)**

III.1. Introduction

III.2. Générateur de vibration (vibrateur)

III.3. La modélisation et son objectif

III.4. Développement du modèle de l'accéléromètre

III.5. Conclusion

# Chapitre III

## Modélisation et simulation du capteur de vibration (accéléromètre)

### III.1. L'introduction

Dans ce chapitre important de la thèse on va décrire en détail la chaîne de mesure des vibrations et les différents types de modèles. Le développement du modèle de l'accéléromètre sera expliqué et présenté ainsi que sa validation par simulation et par tests expérimentaux. Les résultats obtenus seront comparés, analysés et discutés.

Dans le processus de conception des systèmes dynamiques et des structures vibrantes, on doit faire appel dans la modélisation à des hypothèses de travail avant la conception du prototype.

Le calcul dynamique de la structure vibrante commence par la détermination analytique des grandeurs modales (amortissement, fréquence, module du mouvement relatif, l'erreur de mesure). Ensuite, on passe à la vérification des hypothèses de travail par la méthode d'Analyse Modale Expérimentale (AME) une fois le prototype est conçu. Les fréquences naturelles, les modes de déformation, les rapports d'amortissement, et le nombre de degrés de liberté du modèle dans une gamme de fréquence sont aussi déterminés par l'utilisation de la méthode AME.

A l'aide du modèle analytique, on réalise la simulation théorique du modèle développé et on identifie les forces qui perturbent le système et les réponses vibratoires (réponse fréquentielle), une fois le modèle théorique est vérifié. La Fig.III.1 illustre l'utilisation de l'Analyse Modale Expérimentale (AME) [37].

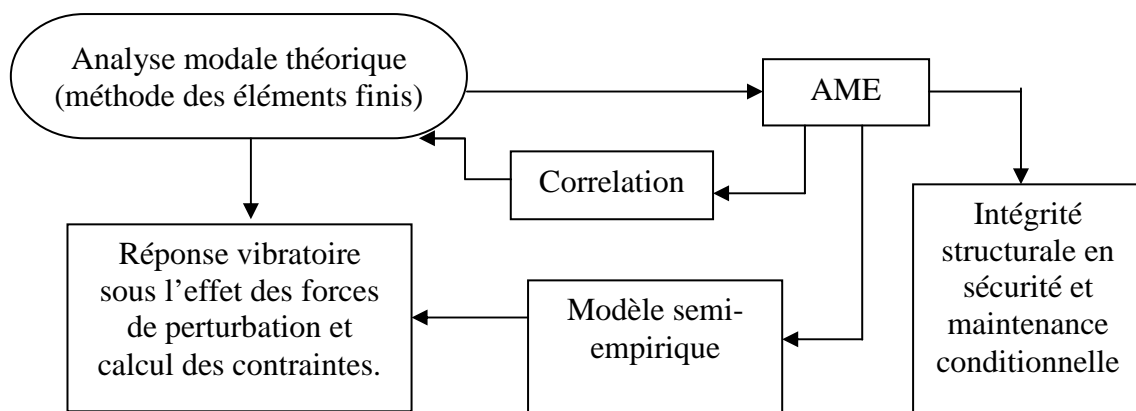


Fig. III.1. La méthode de l'AME et ses utilisations

La chaîne de mesure est généralement composée d'une source d'excitation (marteau d'impact ou vibreur) qui produit une force mesurée et contrôlée à l'aide d'un capteur de force, une conversion d'un mouvement mécanique en signal électrique par un capteur (accéléromètre,



vibromètre), l'information fréquentielle du signal est donnée à l'aide des conditionneurs de signal et un analyseur FFT à 2 canaux minimum, la Fig.III.2 montre le système de mesure.

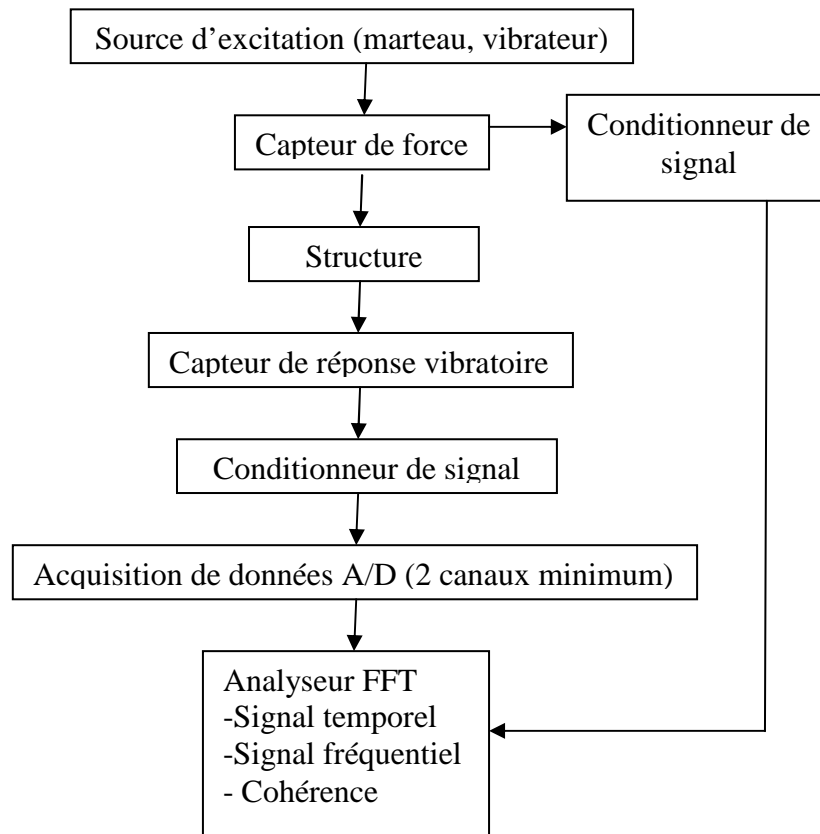


Fig. III.2. Organigramme de la chaîne de mesure

### III.2. Le générateur de vibration (vibrateur)

Le générateur de vibrations produit l'excitation, son avantage est le pouvoir d'entretenir l'énergie de perturbation, mais nécessite la conception d'une structure d'attache qui peut fausser les résultats si elle vibre. En outre, un vibrateur est généralement limité à des fréquences comprises entre 3 à 2000 Hz [37].

Plusieurs types de vibrateurs sont utilisés comme excitateurs:

#### III.2.1. Le vibrateur électrodynamique

La Fig.III.3, montre un vibrateur électrodynamique. La circulation d'un courant  $I$  dans une bobine installée dans un champ magnétique engendre une force relative à l'induction. Un vibrateur électrodynamique est capable de générer des forces de l'ordre de 10 000 N dans une gamme de fréquence de 3 à 2000 Hz [37].



Fig. III.3. Un exemple du vibreur électrodynamique [37].

### III.2.2. Le vérin hydraulique

Le vérin hydraulique est commandé par un clapet qui change la pression de l'huile et permet de produire de grandes forces (supérieures à 100 000 N). L'avantage d'un vérin hydraulique est sa capacité d'exciter les basses fréquences (0.5 à 200 Hz) et son inconvénient majeur réside dans son incapacité à exciter les hautes fréquences. A l'aide de ces excitateurs, la vibration peut être créée de plusieurs façons. Il faut noter que le clapet est attaché à un capteur de force [37].

### III.2.3. Le générateur de vibration harmonique

Le générateur de vibration (vibreur) joue deux rôles importants, le premier rôle est de générer des vibrations harmoniques comme illustré sur la Fig.III.4 et le deuxième est d'effectuer des balayages en fréquence à l'aide de vibrations harmoniques montré sur la Fig.III.5. Un signal sera moyenné 100 fois, pour l'obtention d'une bonne précision en excitation harmonique. Lors d'un balayage en fréquence, il faut vérifier que la variation de fréquence soit suffisamment lente pour que la structure ait le temps d'atteindre la vibration qu'elle aurait à cette fréquence en régime stabilisé.



Fig. III.4. Un signal harmonique



Fig. III.5. Un balayage en fréquence

L'excitation sinusoïdale sera toujours celle qui donne le meilleur rapport signal/bruit dans le cas où le niveau de force requis est à la limite des possibilités du système d'excitation [37].

### III.2.4. Le générateur des forces aléatoires connus

Le principe de ce générateur des forces est identique à celui du générateur de vibration harmonique, l'unique différence est qu'on ne varie pas progressivement la fréquence. L'avantage de ce type de vibreur, est l'obtention rapide de l'image de tous les modes vibratoires de la structure. La chose la plus intéressante dans ce mode est la fonction de transfert est non pas la réponse de la structure [37].

Pour disposer d'une information valable, il faut moyenner suffisamment, car dans un signal aléatoire, la valeur instantanée ne comprend pas toute l'information. Généralement, pour une mesure acceptable, on observera 500 moyennes. Les moyennes actuelles de traitement des signaux permettent de réaliser cette analyse sans obstacle, ce qui explique que l'excitation aléatoire soit de plus en plus utilisée.

La vibration aléatoires qui à la caractéristique d'exciter tous le spectre des fréquences est présentée sur la Fig.III.6.

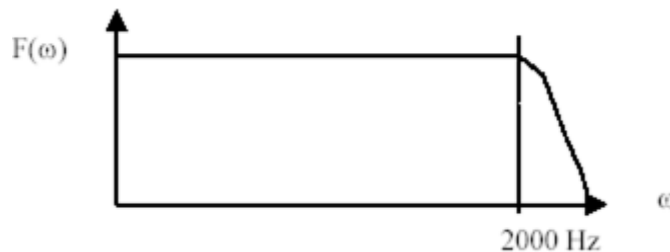


Fig. III.6. Un signal vibratoire aléatoire

### III.2.5. La génération de vibration par choc

Si on suppose que le spectre d'une impulsion est plat et couvre une gamme de fréquence large, donc la génération de vibration par choc peut être assimilée à une excitation aléatoire [37].

Un impact théorique de Dirac est une impulsion de durée nulle, d'amplitude infinie et excite toutes les fréquences Fig. III.7.

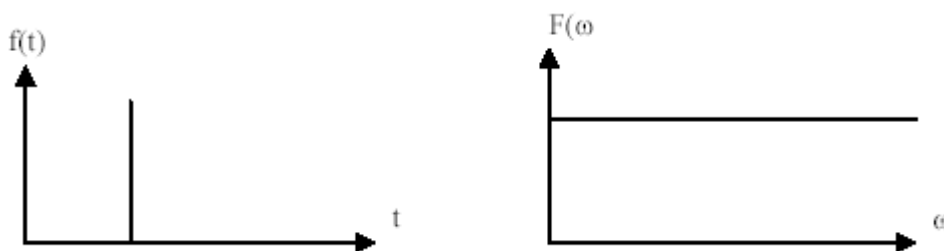


Fig. III.7. L'impact de Dirac [37].

Si le choc est limité, son spectre n'a plus la même forme et si le temps d'impact a une durée est trop longue, alors on n'obtient pas réellement une fonction de Dirac. Aussi la réponse en fréquence de la force n'est plus une droite, mais plutôt une fonction périodique Fig.III.8. Plus la durée T de l'impact est longue, plus la gamme utile en fréquence sera diminué et plus la durée de l'impact sera courte, plus la gamme utile sera élevée.

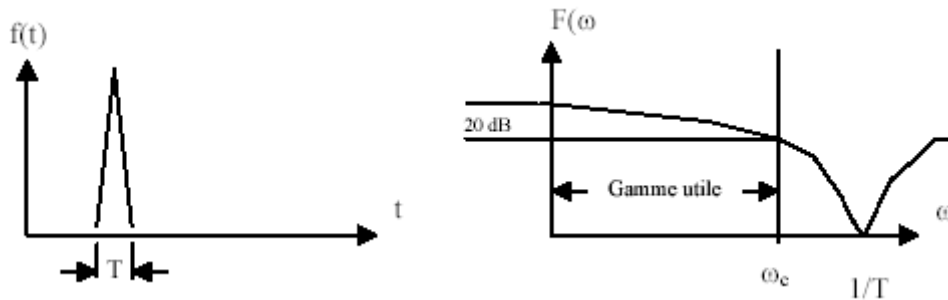


Fig. III.8. L'impact réel [37].

La fréquence de coupure  $\omega_c$  est définie lorsque l'amplitude est diminuée de 20 dB (10 fois l'amplitude maximale). Au delà de cette fréquence, la structure ne reçoit pas assez d'énergie pour être excitée. On peut réaliser l'analyse des fréquences propres à partir des chocs à l'aide d'un vibreur ou à l'aide d'un marteau de choc.

### III.2.6. La génération de vibration par un marteau d'impact

Les éléments constituant un marteau d'impact sont la masse, le capteur de force et l'embout. La force d'impact est relative à la masse du marteau et à la vitesse d'impact, si le marteau d'impact est utilisé. Ce dernier a la propriété d'exciter une grande gamme de fréquence Fig.III.9. Le marteau d'impact est un appareil facile à mettre en œuvre par rapport au vibreur, mais il peut avoir moins d'énergie de perturbation, selon sa grosseur, pour exciter convenablement une structure. La fréquence de coupure  $\omega_c$  diminue si la masse du marteau est augmentée et augmente si la rigidité de l'embout du marteau est augmentée [37].

Pour adapter le type de choc aux fréquences recherchées, il faut agir sur la forme du choc (par exemple, en interposant entre le marteau et la structure un matériau élastique).

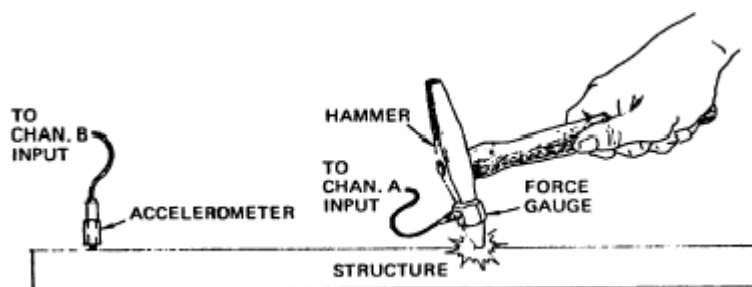


Fig. III.9. Génération des vibrations par un marteau d'impact [37]

### III.2.7. L'effet de l'embout du marteau

La durée de l'impulsion est contrôlée par la masse, la rigidité du marteau et de son embout ainsi que la structure. La dureté de l'embout commande la forme du spectre et la gamme opérationnelle en fréquence lorsqu'on frappe sur une structure rigide Fig.III.10.

La gamme opérationnelle sera élevée avec une réponse moins sensible à la force si l'embout du marteau est solide. Mais dans le cas où l'embout du marteau est souple, la gamme opérationnelle sera faible, mais la réponse sera plus sensible à la force [37].

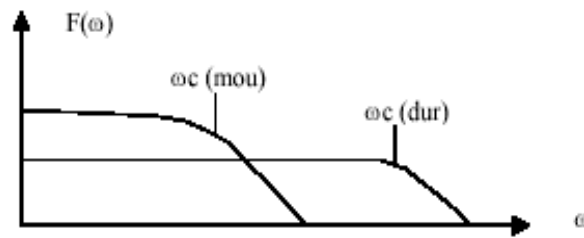


Fig. III.10. Effet du choix de l'embout du marteau

### III.3. La modélisation et son objectif

#### III.3.1. Le modèle

On utilise la modélisation pour comprendre un phénomène physique et validé la théorie développée. Dans notre travail le modèle de l'accéléromètre à 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 [43] dont les plus importants sont :

#### Modèles de connaissance

Le but du modèle de connaissance est de donner la variation temporelle des grandeurs physiques du processus. Un modèle de connaissance est un modèle dont les propriétés et les relations ont été établies en faisant appel à des modèles plus généraux mettant en œuvre les lois de la physique, de la chimie et de l'économie. Les grandeurs d'un modèle sont: la pression, la température, la tension, le courant, la force et enfin l'accélération.

#### Modèles de représentation

Souvent ces modèles ne permettent pas la traduction physique des phénomènes étudiés. Ils sont composés d'une collection de relations mathématiques. Les caractéristiques de ces modèles peuvent n'avoir aucun sens physique particulier.

#### Modèles pour l'optimisation

Par une approche de conception, ce modèle doit permettre la détermination de la configuration optimale du système.

#### Modèles pour la conception de la commande

Ces modèles sont applicables pour la conception de la commande des systèmes complexes possédant des choix de réglage. Comme exemple l'introduction des convertisseurs de l'électronique de puissance pour la centrale photovoltaïque, tous les paramètres du système sont affectés par les fonctions de transformation ou les rapports cycliques des convertisseurs. L'adaptation d'un modèle pour créer une bonne commande par le réglage de ces fonctions de transformation est alors essentielle.

### III.3.2. Les différents types de modèles

Pour réaliser les objectifs de la modélisation, il existe plusieurs types de modèles [43].

#### III.3.2.1. 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.

#### III.3.2.2. Le modèle d'état

Le modèle d'état, il est défini par un ensemble de variables, en nombre minimum, rassemblées dans un vecteur  $x$  de  $\mathbb{R}^n$  appelé vecteur d'état, dont la connaissance à l'instant  $t_0 \in \mathbb{R}^n$  collaborée à la connaissance de transformation des entrées  $u \in \mathcal{R}^1$  sur un intervalle  $T = [t_0, \tau]$  accepte à partir du modèle, de fournir la transformation de  $x(t)$  sur  $T$ .

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

Les modèles de données composés d'informations, sous forme de tableaux de données, rassemblant 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.

#### III.3.2.4. 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.

#### III.3.2.5. Le modèle graphique

La structuration des modèles graphiques par une manière de figuration en général assez aisée 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.

### III.3.3. 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. La Fig.III.11 montre les deux techniques de la modélisation.

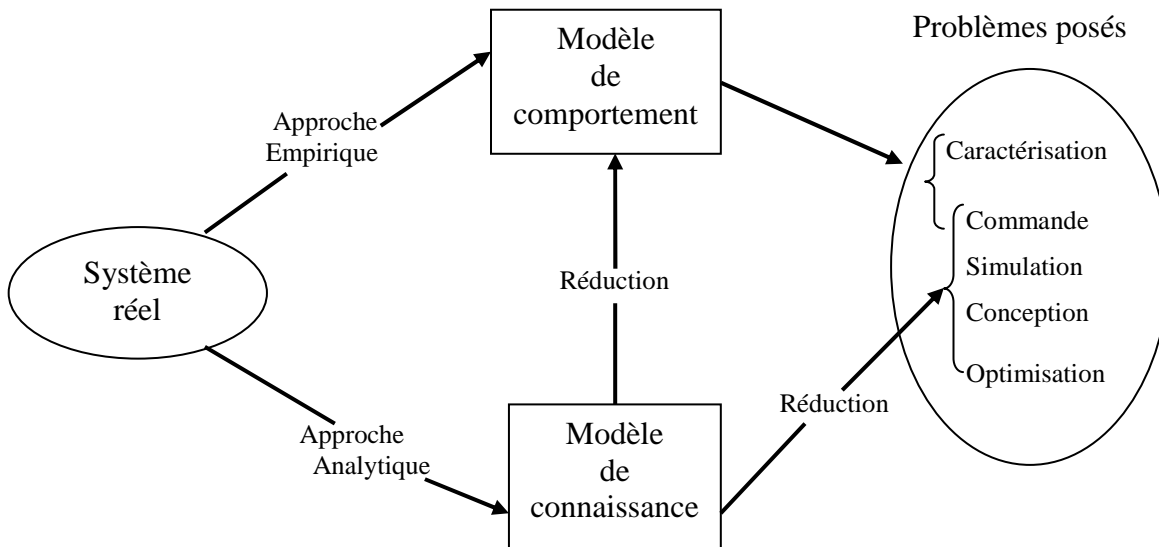


Fig. III.11. Les deux techniques de la modélisation

### III.3.4. Les méthodes de la modélisation

Il existe plusieurs méthodes de la modélisation [44] dont les plus importants sont résumés ci-dessous.

#### III.3.4.1. 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 microsysteme.

#### III.3.4.2. 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 [44]: 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 (exemple, 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.

#### **III.3.4.3. 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.

#### **III.3.4.4. 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.

### **III.3.5. 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 [45].

### **III.3.6. 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 a l'opportunité d'effectuer instantanément des calculs difficiles 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 créer 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 [45].

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.

### **III.4. Le développement du modèle de l'accéléromètre**

Un accéléromètre est un capteur fixé directement sur la structure dont on veut mesurer les vibrations. Comme il vibre avec la structure, il ne mesure pas le mouvement absolu  $y(t)$  de la

structure, mais il mesure le mouvement relatif  $z(t)$  qu'il faudra interpréter pour en extraire l'information sur le mouvement absolu.

Considérons l'accéléromètre comme un système masse, ressort, et amortisseur, défini par  $m$ ,  $k$  et  $c$  respectivement Fig.III.12.

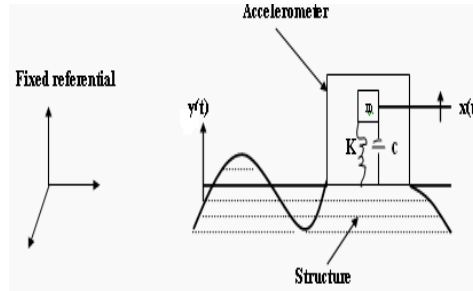


Fig. III.12. Modélisation d'un accéléromètre [46].

Avec :  $m$  : la masse,  $k$  : le coefficient d'élasticité,  $c$  : le coefficient de frottement.

On définit le mouvement relatif comme :

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

D'où  $z(t)$ , représente le mouvement relatif de la masse  $m$  par rapport à la base de la structure.

Si on applique la loi de Newton, l'équation du mouvement est :

$$m \ddot{x}(t) = -k(x(t) - y(t)) - c(\dot{x}(t) - \dot{y}(t)) \quad (III.2)$$

$$m \ddot{x}(t) + c(\dot{x}(t) - \dot{y}(t)) + k(x(t) - y(t)) = 0 \quad (III.3)$$

D'après (III.1), on a :

$$\dot{x}(t) - \dot{y}(t) = \dot{z}(t) \quad (III.4)$$

$$\ddot{x}(t) = \ddot{y}(t) + \ddot{z}(t) \quad (III.5)$$

Si on remplace l'équation (III.1) dans l'équation (III.4) et l'équation (III.5) dans l'équation (III.3), on obtient une équation différentielle du deuxième ordre dont la variable représente le mouvement relatif.

$$m \ddot{z}(t) + c \dot{z}(t) + k z(t) = -m \ddot{y}(t) \quad (III.6)$$

Si on suppose un mouvement harmonique de la structure dont on cherche l'amplitude  $Y$ , du type :

$$y(t) = Y e^{i\omega t} \quad (III.7)$$

$$z(t) = Z e^{i\omega t} \quad (III.8)$$

On obtient par l'utilisation des nombres complexes :

$$(-m\omega^2 + i\omega c + k) Z = m\omega^2 Y \quad (III.9)$$

On simplifie l'équation (III.9) et on aboutit à :

$$Z = m\omega^2 Y / (-m\omega^2 + i\omega c + k)$$

$$Z = \omega^2 Y / (-\omega^2 + i\omega c/m + k/m)$$

$$Z = \omega^2 Y / (-\omega^2 + i.\omega.2.\omega_n c / 2\omega_n m + \omega_n^2)$$

$$Z = \omega^2 Y / [(\omega_n^2 - \omega^2) + i (2\zeta\omega\omega_n)] \tag{III.10}$$

Où  $\omega_n = (k/m)^{1/2}$  représente la fréquence naturelle de l'accéléromètre et  $\xi = c/(2m\omega_n)$  représente son taux d'amortissement.

Après le développement du modèle mathématique du capteur de vibration (accéléromètre) nous passons à la simulation de ce modèle avec des données réelles pris au niveau d'ASMIDAL (FERTIAL) [46, 48].

### III.4.1. La modélisation et la simulation du module de mouvement relatif de l'accéléromètre

Le module de mouvement relatif de l'accéléromètre donné par l'équation (III.11) qui est illustré ci-dessous :

$$Z = Y \omega^2 / \omega_n^2 [(1 - (\omega/\omega_n)^2)^2 + (2\zeta\omega/\omega_n)^2]^{1/2} \tag{III.11}$$

Dans le tableau ci-dessous les données nécessaires pour la simulation du module de mouvement relatif sont présentées.

Tableau.III.1. Paramètres du module de mouvement relatif

Paramètres d'entrée	Les valeurs
L'amplitude de mouvement (m)	0.015
Le taux d'amortissement	Pour $\xi = 0.1, 0.3, 0.5, 0.65, 0.8$
La fréquence naturelle (Hz)	100
La fréquence relative (Hz)	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40
Le rapport de fréquence	0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4

Ces courbes suivantes sont obtenues en variant le taux d'amortissement de l'accéléromètre de 0.1 à 0.8 avec une fréquence naturelle de 100Hz et la fréquence relative varie de 0 à 40Hz pour déterminer le module du mouvement relatif.

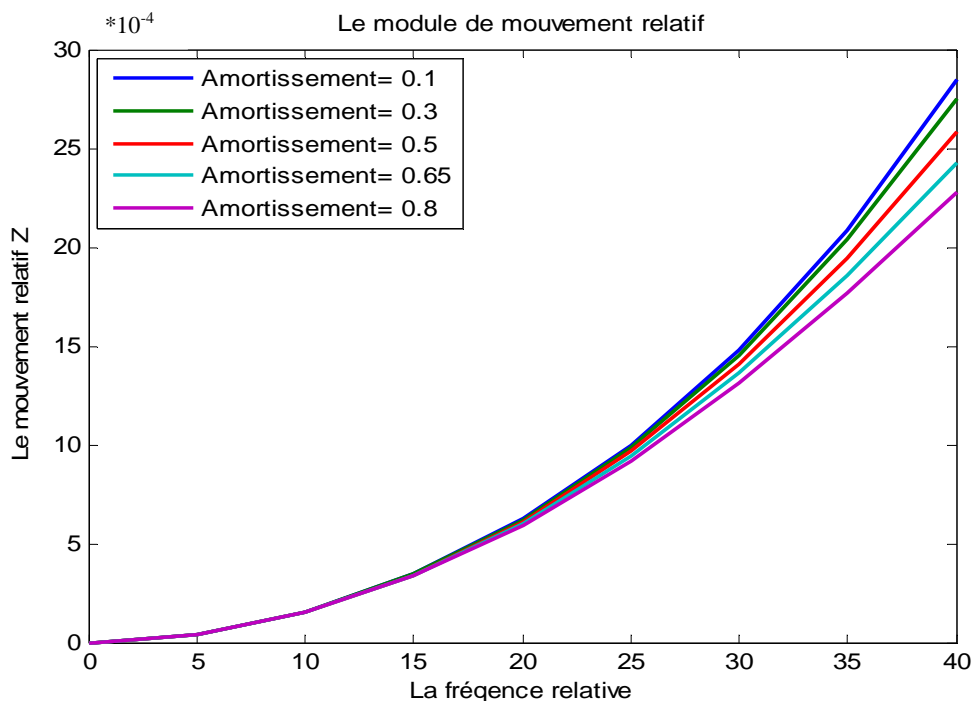


Fig. III.13. Module du mouvement relatif en fonction de  $\zeta$

Dans le cas de résonance, on varie la fréquence relative de 0 jusqu'à 400 Hz. On obtient les résultats montrés sur la figure suivante:

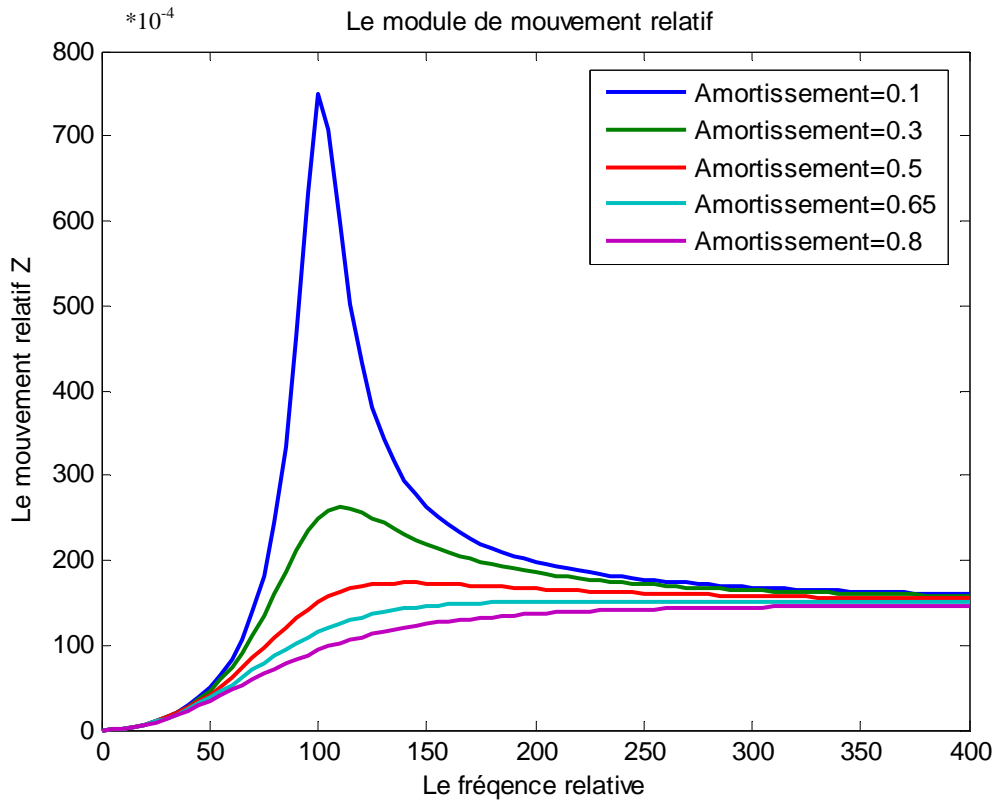
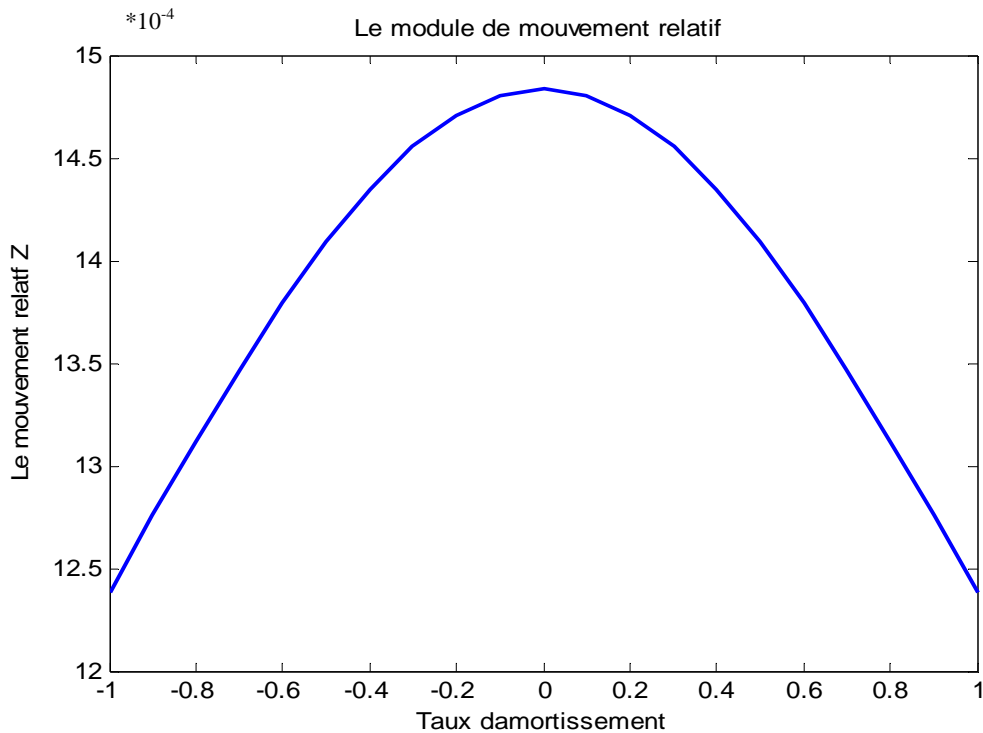
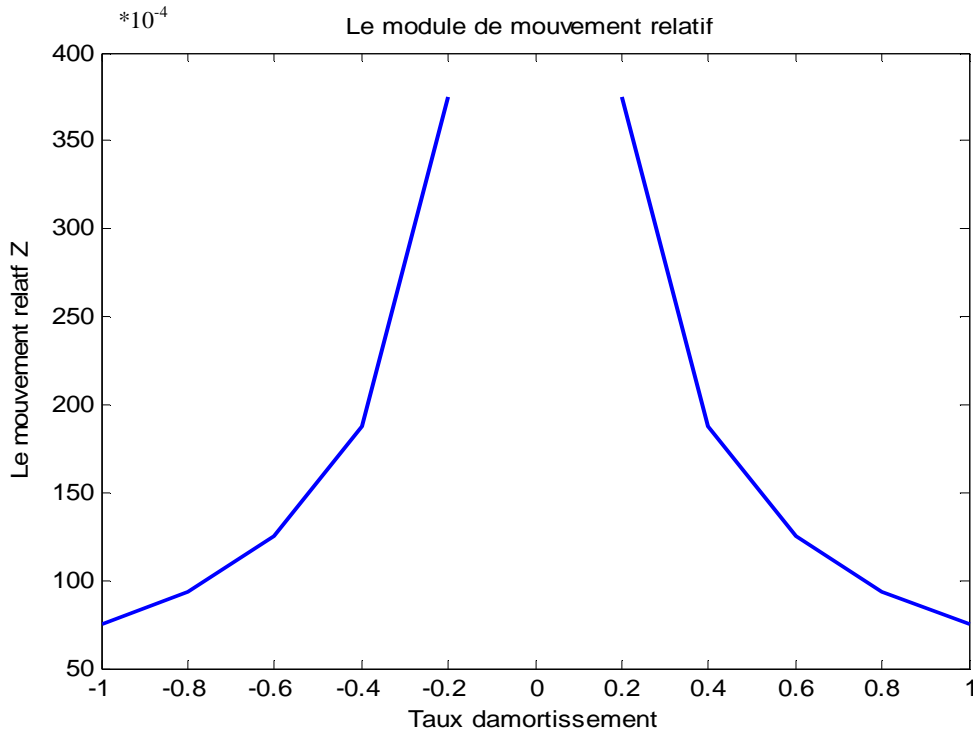


Fig. III.14. Module du mouvement relatif en fonction de  $\zeta$  dans la résonance  
 Le mouvement relatif varie avec la variation du taux d'amortissement, pour voir cette variation schématiquement, il faut prendre la fréquence relative comme constante et égale à 30Hz dans le cas normal de marche de l'accéléromètre et de 100Hz dans le cas de résonance et faire varier le taux d'amortissement de -1 à 1.



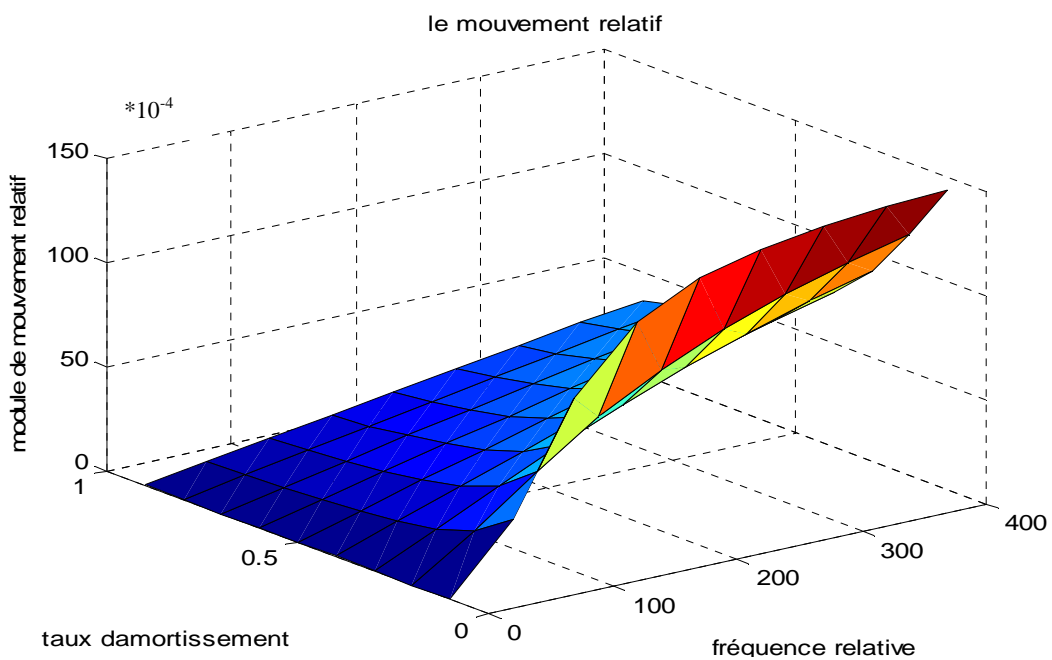
a) Cas de fonctionnement normal de l'accéléromètre



b) Cas de la résonance de l'accéléromètre

Fig. III.15. Le module de mouvement relatif en fonction du taux d'amortissement

La variation du taux d'amortissement et de la fréquence relative de l'accéléromètre, nous permettent à partir des essais expérimentaux de faire le bon choix de l'accéléromètre. Pour représenter schématiquement le mouvement relatif en fonction de la variation du taux d'amortissement et la fréquence relative, il faut varier le taux d'amortissement de 0.1 jusqu'à 0.9 et la fréquence relative de 0 jusqu'à 40 Hz. Dans le cas de résonance; en prend la fréquence relative de 0 jusqu'à 400Hz et le taux d'amortissement reste le même.



a) Cas de fonctionnement normal de l'accéléromètre

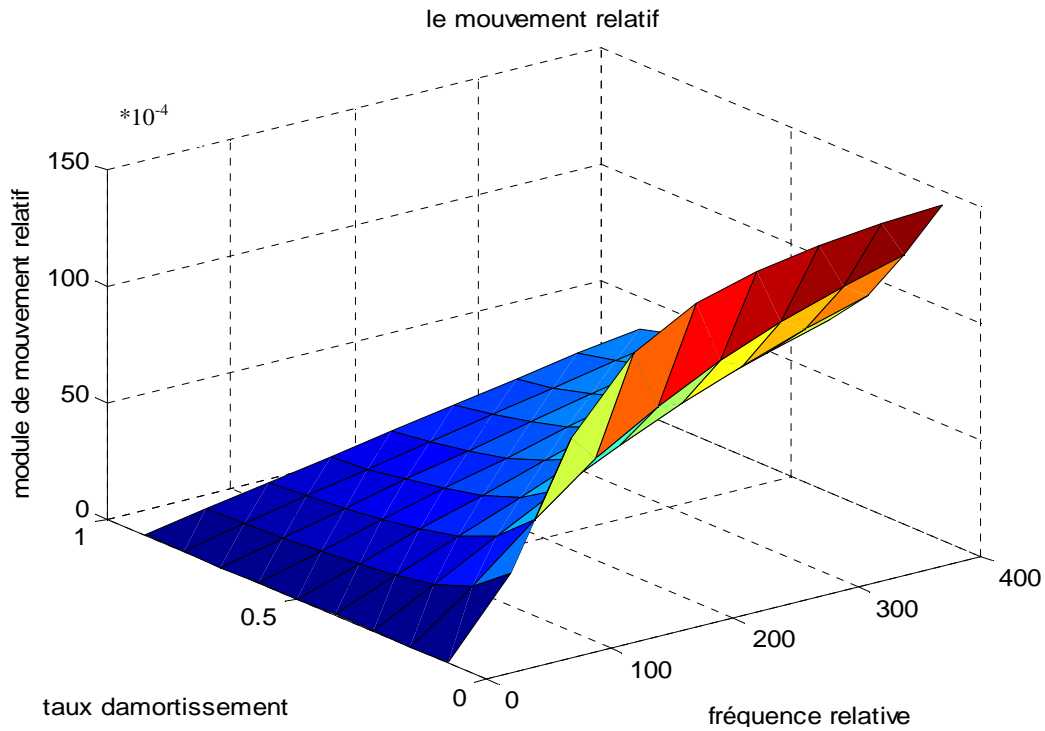


Fig. III.16. Module du mouvement relatif en fonction du taux d'amortissement et la fréquence relative

Il est nécessaire de trouver l'erreur de mesure du mouvement relatif pour faire le choix du taux d'amortissement de l'accéléromètre. L'erreur de mesure est déterminée comme suit:

En multipliant l'expression (10) par  $\omega^2$  et extraire le module, on trouve:

$$\omega_n^2 Z = \omega^2 Y / [(1 - (\omega/\omega_n)^2)^2 + (2\zeta\omega/\omega_n)^2]^{1/2} \tag{III.12}$$

On peut remarquer que, d'après l'équation (12), l'amplitude de l'accélération de la structure est exprimée par  $\ddot{Y} = \omega^2 Y$  (accélération absolue), qui est l'expression recherchée.

Si on choisit un accéléromètre tel que  $\omega/\omega_n \ll 1$  pour diminuer l'erreur de mesure au minimum possible, alors l'équation (11) se réduit à :

$$\ddot{Z} = \omega_n^2 Z \approx \ddot{Y} \tag{III.13}$$

La mesure du mouvement relatif, défini par  $\omega_n^2 Z$ , donne donc, une valeur représentative de l'amplitude de l'accélération de la structure à la fréquence  $\omega$ .

L'erreur de mesure effectuée se définit comme [47, 48]:

$$E = (\ddot{Z}/\ddot{Y}) - 1 = [1 / (1 - (\omega/\omega_n)^2)^2 + (2\zeta\omega/\omega_n)^2] - 1 \tag{III.14}$$

### III.4.2. La modélisation et simulation de l'erreur de mesure de l'accéléromètre

#### III.4.2.1. La modélisation de l'erreur de mesure

Pour la représentation graphique de l'erreur de mesure de l'accéléromètre en fonction du rapport de fréquence pour différentes valeurs de  $\zeta$ , on utilise un programme écrit sous Matlab [46,47].

**III.4.2.2. La simulation de l’erreur de mesure**

Les valeurs des paramètres utilisés pour la détermination de l’erreur de mesure de l’accéléromètre sont présentées dans le tableau.III.2 et les résultats de simulation illustrés dans la Fig.III.17.

Tableau.III.2. Les données utilisées pour la détermination de l’erreur de mesure de l’accéléromètre

Les paramètres d’entrée	Les valeurs
Le taux d’amortissement	$\xi = 0.4, 0.6, 0.65, 0.7, 0.8$
La fréquence naturelle (Hz)	100
La fréquence relative (Hz)	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30

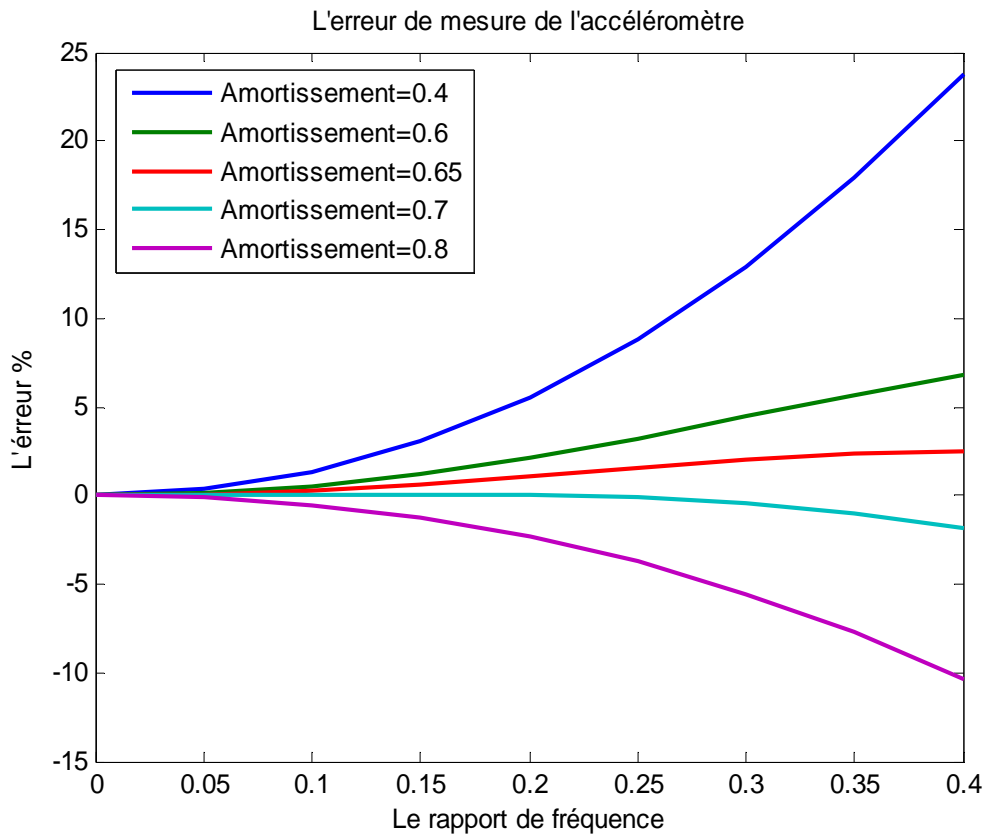


Fig. III.17. L’erreur de mesure de l’accéléromètre

Dans le cas de résonance, on varie la fréquence relative de 0 jusqu'à 400 Hz. On obtient les résultats montrés sur la figure suivante:

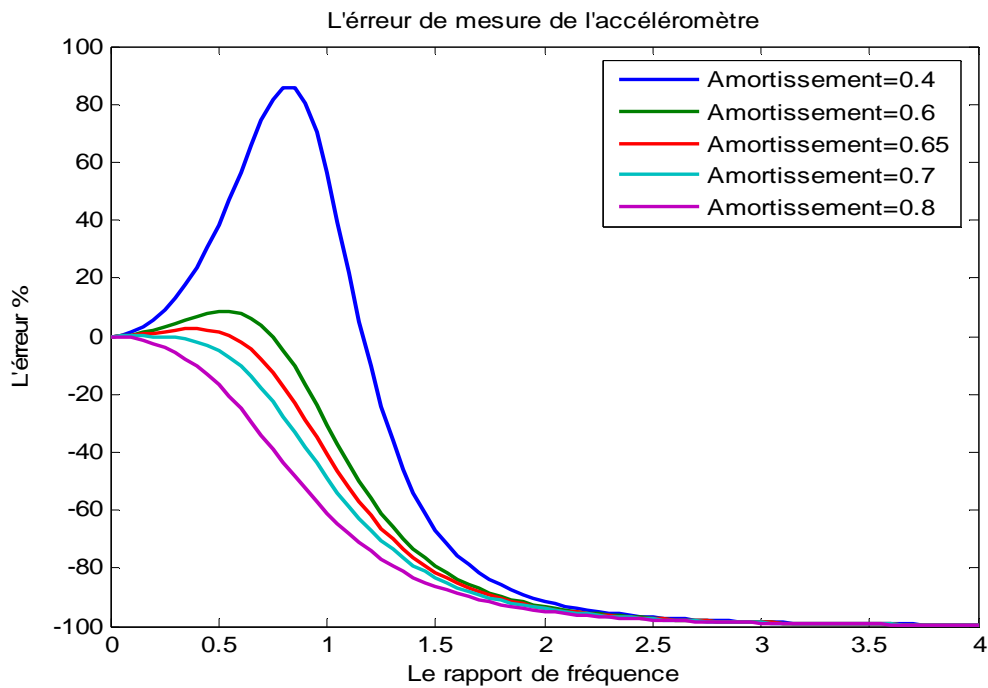
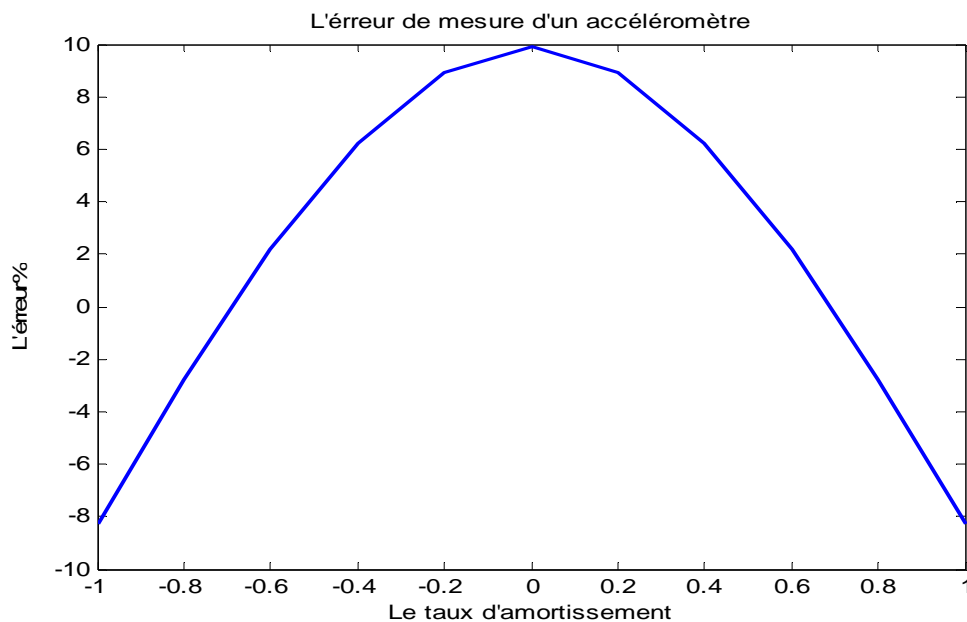


Fig.III.18. L'erreur de mesure de l'accéléromètre dans le cas de résonance

La Fig.III.18, montre le phénomène de résonance ; pour éviter ce dernier, il faut choisir la gamme de fréquence de l'accéléromètre correspondante aux vibrations et faire aussi le bon choix du taux d'amortissement. Ces deux paramètres nous permettent aussi d'obtenir une bonne estimation de la valeur de la vibration.

L'erreur de mesure de l'accéléromètre varie avec la variation du taux d'amortissement, la Fig.III.17 montre que pour limiter à 1 % l'erreur de mesure, il faut un amortissement de 0.65. Pour bien voir la relation entre l'erreur de mesure et le taux d'amortissement, on varie le taux d'amortissement de -1 jusqu'à 1 et on prend la fréquence relative comme une constante et égale à 30Hz dans le cas de bon fonctionnement de l'accéléromètre et de 100Hz dans le cas de résonance, les résultats obtenues par simulation sont présentés dans les deux figures suivantes:



a) cas de bon fonctionnement



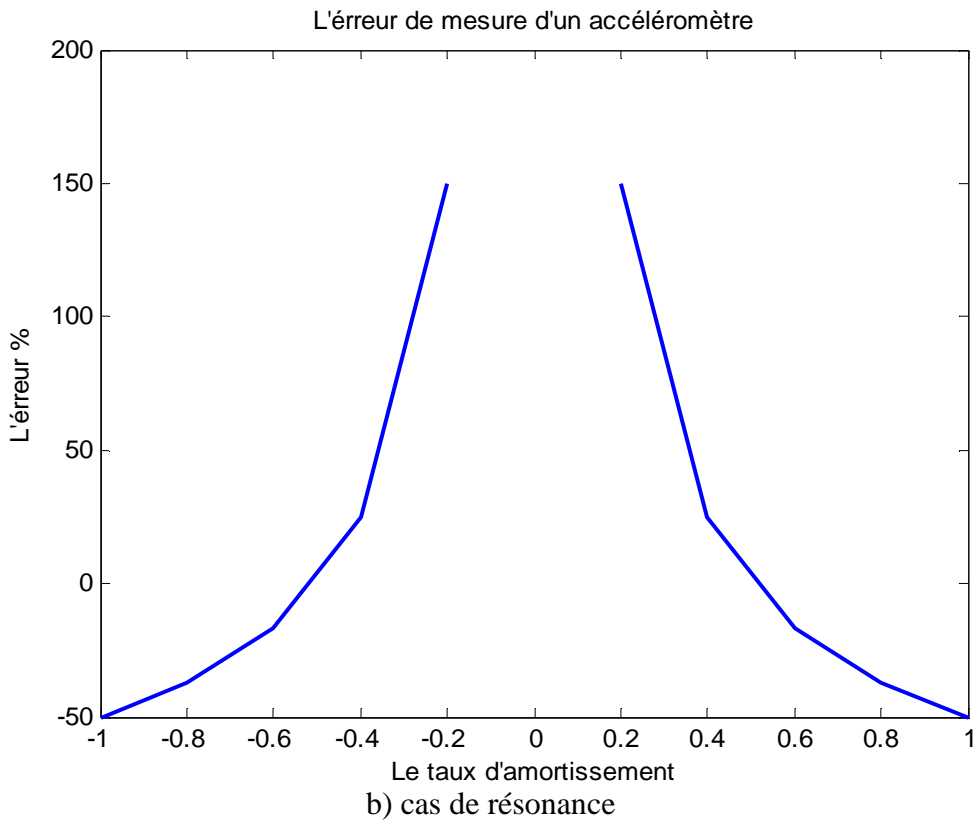
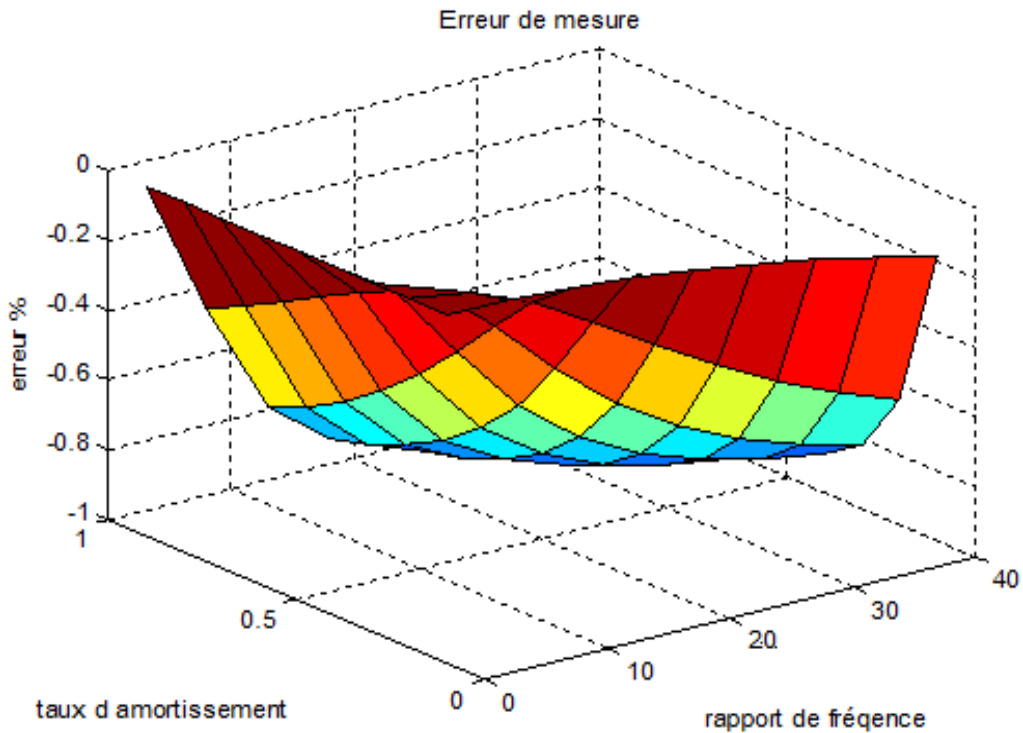
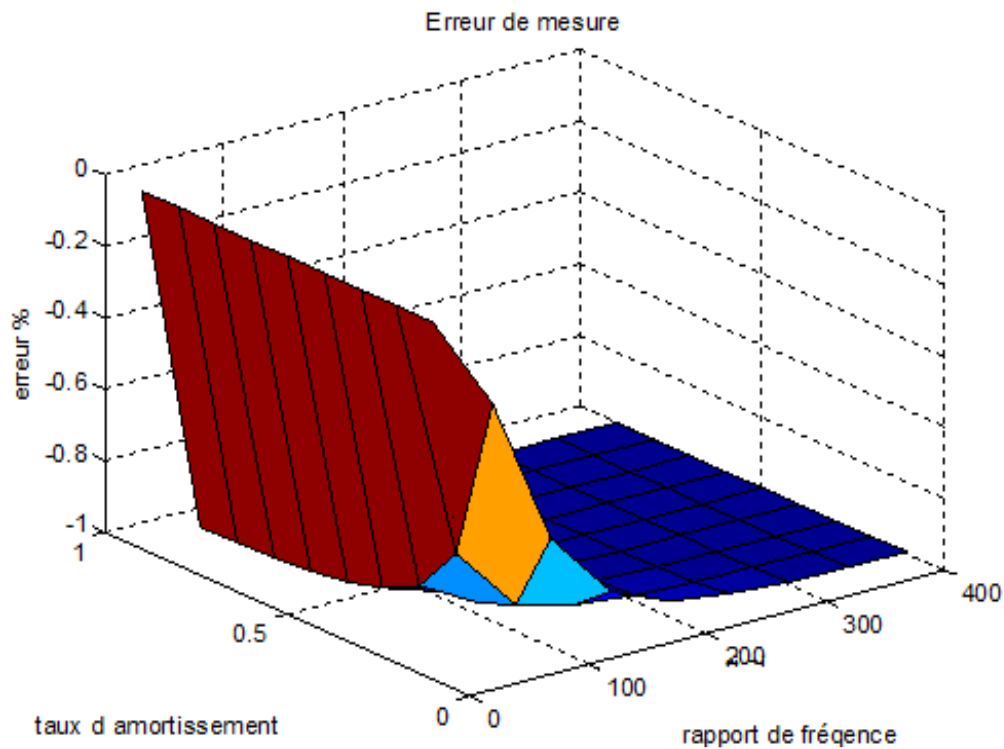


Fig.III.19. L'erreur de mesure en fonction du taux d'amortissement.

La représentation graphique de l'erreur de mesure en fonction de la fréquence relative et le taux d'amortissement dans les deux cas (cas de bon fonctionnement de l'accéléromètre et cas de résonance) est montrée sur les deux figures suivantes:





b) cas de résonance

Fig.III.20. L'erreur de mesure en fonction du rapport fréquentiel et le taux d'amortissement.

La Fig.III.20, montre l'erreur de mesure en fonction du rapport fréquentiel et le taux d'amortissement ainsi que la relation entre ces trois paramètres.

### III.4.3. Les essais pour améliorer le choix du taux d'amortissement de l'accéléromètre

Pour faire un choix plus précis et obtenir un résultat proche de la valeur réelle du taux d'amortissement, des essais supplémentaires sur l'erreur de mesure sont nécessaires.

#### III.4.3.1. Le premier essai

Les paramètres du premier essai sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau.III.3. Les données de première essai [46, 49].

Paramètres d'entrée	Les valeurs
le taux d'amortissement	0.645 ,0.65 ,0.655, 0.66 ,0.665
la fréquence naturelle(Hz)	100
la fréquence relative (Hz)	0 ,5 ,10 ,15 ,20 ,25 ,30, 35, 40

A partir de ces valeurs, on réalise la simulation par Matlab et les résultats obtenus sont montrés sur la figure suivante:

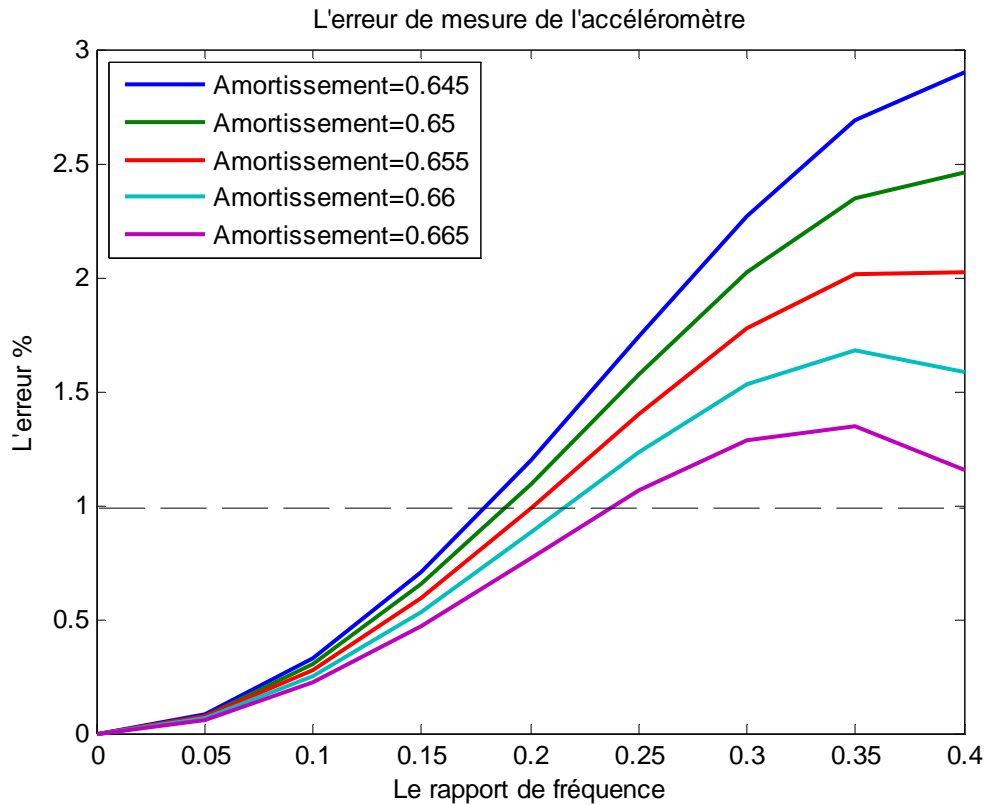


Fig.III.21. Résultats du premier essai

Selon la Fig.III.21, on remarque que le bon choix du taux d'amortissement pour limiter l'erreur de mesure à 1% est à peu près égal à 0.665. Pour obtenir la valeur la plus précise et la plus proche du taux d'amortissement pour limiter l'erreur de mesure à 1%, il faut réaliser un deuxième essai.

### III.4.3.2. Le deuxième essai

Les paramètres de cet essai sont basés sur la variation du taux d'amortissement et sont présentés dans le tableau suivant:

Tableau.III.4. Les données du deuxième essai [46, 49].

Paramètres d'entrée	Les valeurs
le taux d'amortissement	0.665, 0.668, 0.67, 0.672, 0.675
la fréquence naturelle (Hz)	100
la fréquence relative (Hz)	0,5 ,10 ,15 ,20 ,25 ,30

Les résultats de cet essai sont montrés sur la Fig.III.22.

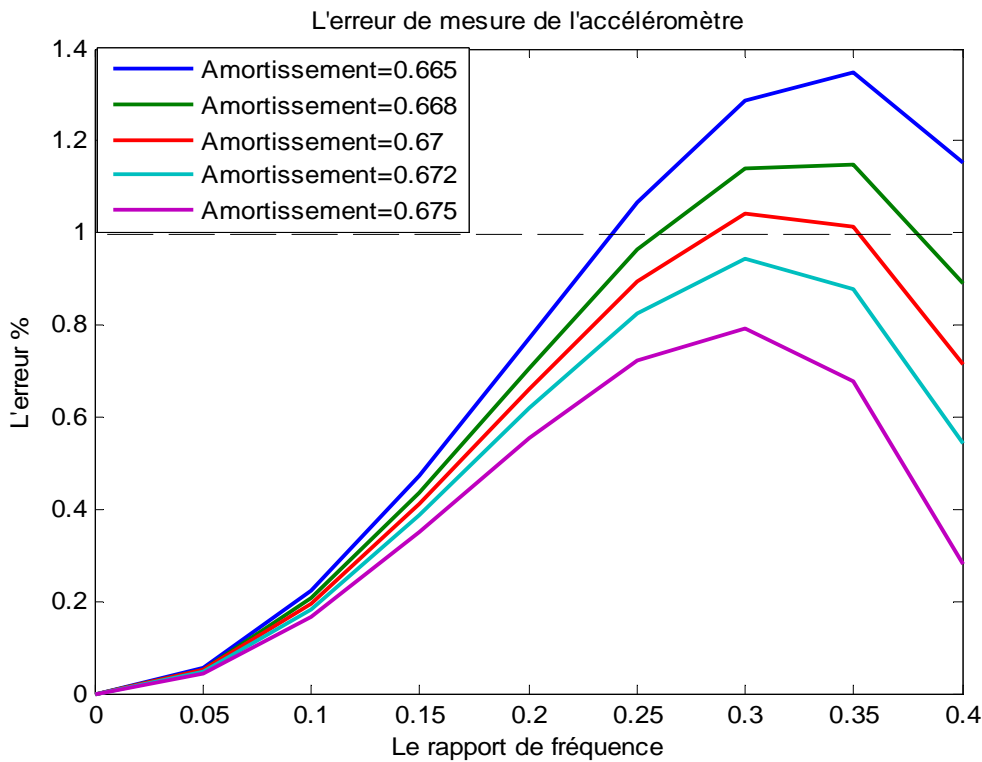


Fig.III.22. Résultats du deuxième essai

La Fig.III.22 montre l'erreur de mesure en fonction du rapport de fréquence avec différentes valeurs du taux d'amortissement, on voit que les valeurs 0.67; 0.672; 0.675 du taux d'amortissement sont limitées et l'erreur de mesure à peu près égale à 1%.

Si on fait la comparaison entre les résultats présentés sur la Fig.III.21 et ceux présentés sur la Fig.III.22, on peut conclure que la meilleure valeur du taux d'amortissement pour limiter l'erreur de mesure à 1% est de 0.67.

Les essais réalisés, nous permettent de faire un choix plus précis de l'accéléromètre et obtenir un taux d'amortissement proche de la valeur réelle. Dans notre cas, pour limiter l'erreur de mesure à 1%, il nous faut un taux d'amortissement de 0.67 (obtenu à partir du deuxième essai) [47].

### III.4.4. La modélisation et la simulation du module du mouvement relatif et l'erreur de mesure de l'accéléromètre

#### III.4.4.1. La modélisation du module du mouvement relatif et l'erreur de mesure

Le modèle mathématique obtenu par la méthode des éléments finis équation (III.11) et équation (III.14)) permet de réaliser une simulation par un sous programme écrit sous Matlab, Ce dernier permet de calculer le rapport de fréquence  $\omega/\omega_n$ , le module de mouvement relatif et l'erreur de mesure de l'accéléromètre avec des valeurs différentes de fréquence relative de mouvement [46].

#### III.4.4.2. La simulation du module de mouvement relatif et l'erreur de mesure de l'accéléromètre

Les valeurs des paramètres de simulation du module de mouvement relatif et de l'erreur de mesure de l'accéléromètre sont présentées dans le tableau.III.5.

Tableau.III.5. Les paramètres d’entrés du programme de simulation du module de mouvement relatif et l’erreur de mesure d’un accéléromètre

Paramètres d’entrée	Les valeurs
l’amplitude de mouvement (m)	0.015
le taux d’amortissement	0.1, 0.3, 0.5, 0.65, 0.8
la fréquence naturelle (Hz)	100
la fréquence relative (Hz)	0, 5, 10, 15, 20

Les résultats obtenus par simulation du module de mouvement relatif, rapport de fréquence et l’erreur de mesure de l’accéléromètre sont résumés dans le tableau présenté ci-dessous :

Tableau.III.6. Les résultats de simulation

Y	$\omega_n$	$\omega$	$\omega/\omega_n$	$Z_1 * 10^{-4}$	$E_1$	$Z_2 * 10^{-4}$	$E_2$
0.015	100	0	0	0	0	0	0
		5	0.05	0.3759	0.0049	0.3758	0.0041
		10	0.1	1.5148	0.0199	1.5124	0.0166
		15	0.15	3.4511	0.0456	3.4381	0.0378
		20	0.2	6.2446	0.0832	6.2017	0.0684
$Z_3 * 10^{-4}$	$E_3$	$Z_4 * 10^{-4}$	$E_4$	$Z_5 * 10^{-4}$	$E_5$		
0	0	0	0	0	0		
0.3755	0.0025	0.3751	0.0008	0.3747	0.001		
1.5075	0.0100	1.5023	0.003	1.4957	0.005		
3.4127	0.0225	3.3860	0.0065	3.3531	0.012		
6.1186	0.0399	6.0326	0.0109	5.9293	0.023		

Les représentations graphiques des résultats obtenus sont montrées sur la figure suivante :  
La relation entre Z, E

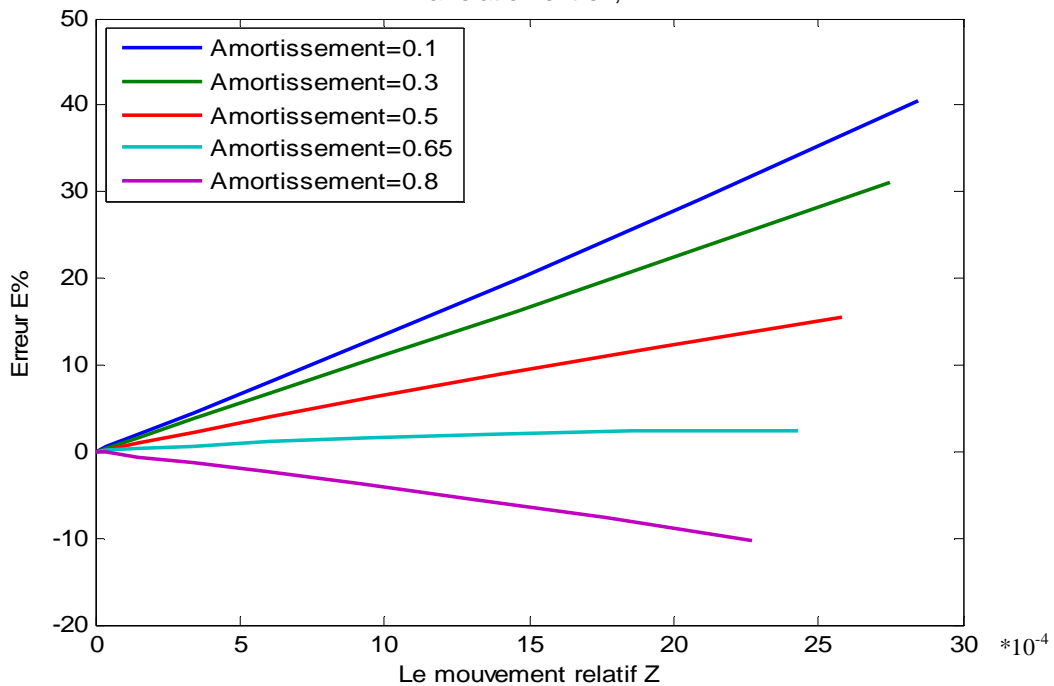


Fig.III.23. l’erreur de mesure en fonction du module du mouvement relatif

Dans le cas de résonance, on varie la fréquence relative de 0 jusqu'à 400Hz toute en gardant les mêmes valeurs pour les autres paramètres.

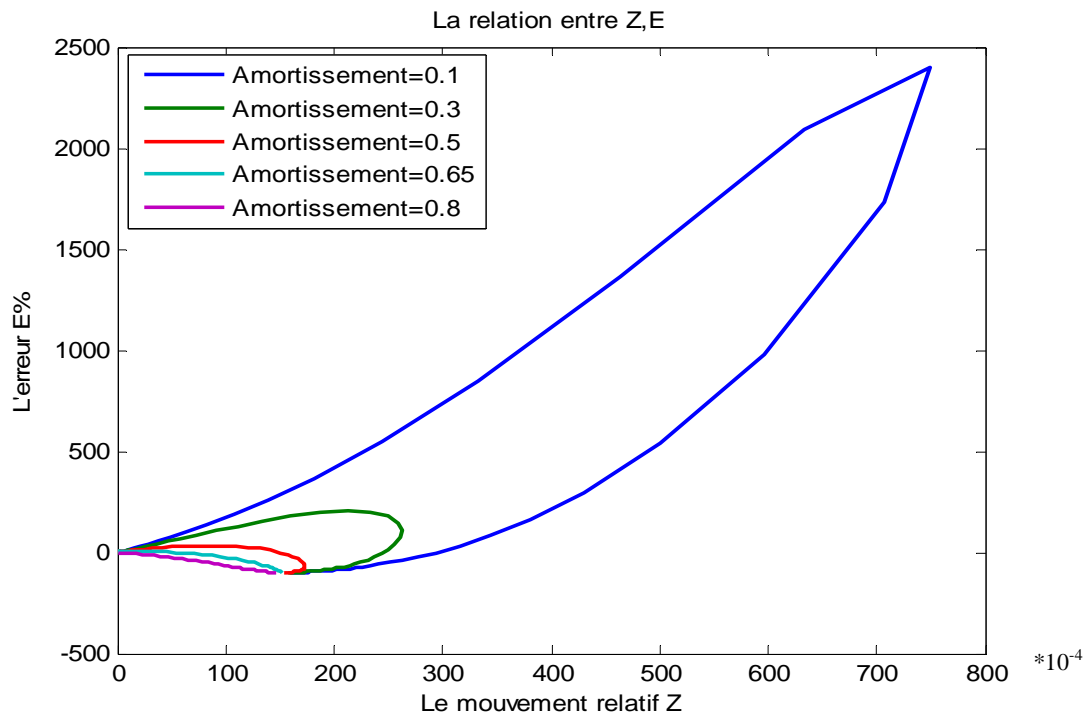


Fig.III.24. l'erreur de mesure en fonction du module du mouvement relatif (cas de résonance)

La Fig.III.24 présente l'erreur de mesure en fonction du module du mouvement relative dans le cas de résonance.

### III.4.5. Expérimentations

Des tests expérimentaux ont été effectués sur les différentes valeurs de la fréquence du mouvement vibratoires générées par l'excitateur électrodynamique et ensuite les niveaux de vibrations seront captés par l'accéléromètre.

Le stand expérimental est composé de quatre éléments comme illustré dans la figure ci-dessous:

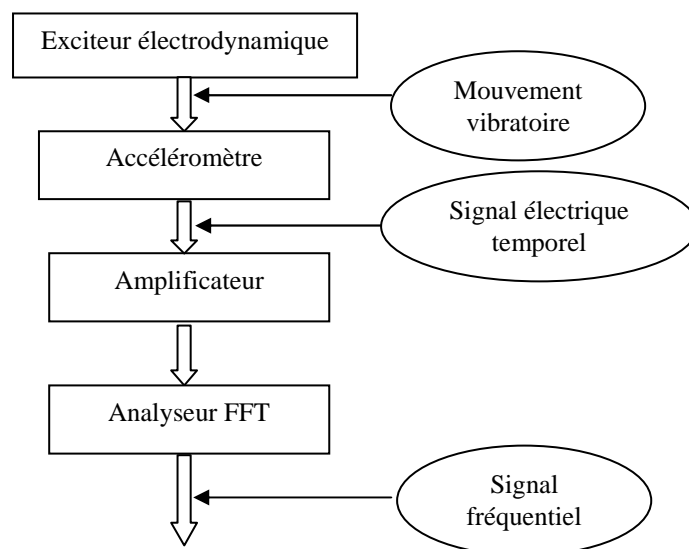


Fig.III.25. La chaîne de mesure de l'essai expérimentale

L'appareillage utilisé dans les tests expérimentaux est:

- Une source d'excitation (excitateur électrodynamique) qui fournit une force mesurée est contrôlée à l'aide d'un capteur de vibration.
- Un capteur de vibration qui convertit un mouvement mécanique en signal électrique,
- Des conditionneurs de signal (amplificateur de charge) et un analyseur FFT à 2 canaux minimum qui fournit l'information fréquentielle du signal

**1-** L'excitation est produite par les générateurs de vibrations. Un vibreur présente l'avantage de pouvoir entretenir l'énergie de perturbation, mais nécessite la conception d'une structure d'attache qui peut fausser les résultats si elle vibre. Le vibreur utilisé dans cette expérience est l'excitateur électrodynamique.

**2-** Le capteur de vibration est un capteur qui mesure les mouvements vibratoires générés par la structure vibrante.

Dans notre travail, nous avons choisi un capteur de vibration (accéléromètre) dont les paramètres sont la fréquence naturelle (100Hz) et le taux d'amortissement (0.60).

**3-** Conditionneur de signal qui comporte un amplificateur de charge pour amplifier le signal électrique temporel et un analyseur FFT pour donner l'information de signal fréquentiel (amplitude de mouvement relatif)

Dans ce travail, nous avons réglé l'excitateur électrodynamique pour différentes fréquences relatives (0 ; 5 ; 10; 15; 20; 25; 30; 35; 40Hz) et nous avons estimé pour chaque fréquence la valeur de l'amplitude de mouvement relatif (le niveau de vibration). Pour comparer les résultats pratiques (obtenus par tests expérimentaux) avec les résultats de simulation, nous avons simulé le modèle développé (l'équation (III.11)) et les résultats obtenus sont résumés dans le tableau ci-dessous :

**Tableau.III.7. Résultats de l'essai expérimentale et de simulation**

La fréquence relative (Hz)	Module de mouvement relatif ( $Z * 10^{-4}$ )	
	Expérience	Simulation
0	0	0
5	0.38	0.3753
10	1.44	1.5041
15	3.45	3.3956
20	6.15	6.0634
25	9.5	9.5242
30	13.5	13.7949
35	18.65	18.8881
40	24.8	24.8069

D'après ces résultats nous avons constaté que les deux résultats sont presque similaires cela nous permet de dire que le modèle développé est acceptable.

La figure suivante présente deux courbes, la première courbe illustre l'erreur de mesure en fonction de la fréquence relative de l'accéléromètre choisi dans l'expérience et la deuxième courbe montre l'erreur de mesure en fonction de la fréquence relative de l'accéléromètre qui a minimisé l'erreur de mesure à un 1% avec un taux d'amortissement 0.67.

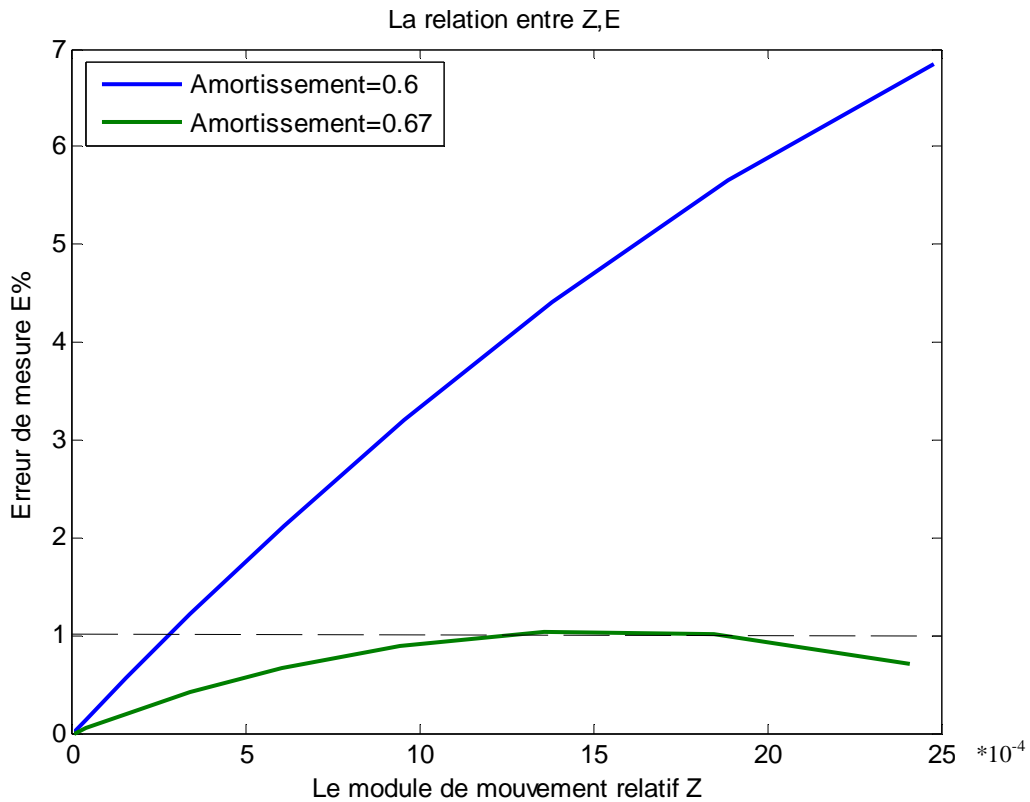


Fig.III.26. Comparaison entre deux courbes présentes l'erreur de mesure en fonction de la fréquence relative

### III.4.6. Les résultats et les discussions

A partir des courbes obtenues et présentées dans la Fig.III.13, on remarque que le module de mouvement relatif  $Z$  est de relation croissante avec le rapport de fréquence  $\omega/\omega_n$ , c'est-à-dire le module du mouvement relatif augmente avec l'augmentation du rapport de fréquence et diminue avec la diminution de ce dernier.

D'après la Fig.III.14, on constate que si la fréquence relative s'approche de la fréquence naturelle le mouvement relatif augmente rapidement jusqu'à la fréquence de résonance ( $\omega = \omega_n$ ). Dans ce cas l'accéléromètre ne donne pas de valeurs exactes du mouvement relatif. Mais si on prend la gamme de fréquence relative entre 0 et  $(\omega_n / 3)$  l'accéléromètre est dans un état de bonne fonctionnement (plus fiable et précis).

D'autre part, le module du mouvement relatif est de relation décroissante avec le taux d'amortissement. La Fig.III.15-a, montre la relation entre le module du mouvement relatif avec le taux d'amortissement. Si on augmente le taux d'amortissement de 0 à 1, le module du mouvement relatif diminue, mais si on diminue le taux d'amortissement de 0 à -1, le module du mouvement relatif augmente.



La Fig.III.15-b, montre le cas de résonance, on remarque que dans l'intervalle [0- 0.4] du taux d'amortissement une chute rapide du module de mouvement relatif. Dans l'intervalle [0.4- 1] du taux d'amortissement, on remarque une chute plus lente du module du mouvement relatif mais dans l'intervalle [-0.4 - 0], on observe une augmentation plus rapide du module de mouvement relatif. Tandis que dans l'intervalle [-1, -0.4] du taux d'amortissement, on constate une augmentation plus lente du module du mouvement relatif.

Les courbes obtenues par simulation montrent que l'erreur de mesure dépend de l'amortissement interne de l'accéléromètre. Comme le montre la Fig.III.17, il faut un amortissement de 65% pour limiter l'erreur à 1%.

La Fig.III.19, représente l'erreur de mesure en fonction du taux d'amortissement. D'après cette courbe, en remarque que l'erreur de mesure est de relation décroissante avec le taux d'amortissement, c'est-à-dire pour diminuer l'erreur de mesure, il faut augmenter le taux d'amortissement. Le meilleur choix du taux d'amortissement pour limiter l'erreur de mesure à 1% est de 65%.

Pour faire un choix plus précis et obtenir un résultat proche de la valeur réelle du taux d'amortissement, des essais supplémentaires sur l'erreur de mesure ont été effectués.

En comparant les résultats présentés sur les Fig.III.21 et Fig.III.22, on peut conclure que la meilleure valeur du taux d'amortissement pour limiter l'erreur de mesure à 1% est de 0.67

Les essais effectués, nous permettent de faire un choix plus précis et plus proche du taux d'amortissement pour limiter l'erreur de mesure à une valeur constante. Dans notre cas, pour limiter l'erreur de mesure à 1%, il faut un taux d'amortissement de 0.67 (résultat obtenu à partir du deuxième essai).

D'après le tableau des résultats obtenus, nous constatons que pour un taux d'amortissement constant l'erreur de mesure est proportionnelle au module de mouvement relatif avec une variation de la fréquence relative de (0 – 20 Hz).

La Fig.III.24, présente l'erreur de mesure en fonction du module de mouvement relatif avec des valeurs différentes du taux d'amortissement. En remarque que l'erreur de mesure est de relation croissante avec le module de mouvement relatif. Les courbes de la Fig.III.23, sont des droites qui passent par le point (0.0) du plan, ils sont donnés par l'équation suivante:

$$E = A Z + B \quad \text{(III.15)}$$

A et B sont des constantes qui varient avec la variation du taux d'amortissement.

D'après le tableau (III.6), on prend le taux d'amortissement (0.65) et les constantes A et B égales à 0.002 et 0.0073 respectivement.

On remplace A et B dans la relation (III.15), on obtient :

$$E = 0.002 Z + 0.0073 \quad \text{(III.16)}$$

La relation (III.15) est l'équation pratique de l'erreur de mesure en fonction du module de mouvement relatif. Les constantes varient avec la variation de taux d'amortissement, la fréquence naturelle de l'accéléromètre et l'amplitude du mouvement.

Les Fig.III.14, III.18, III.24 représentent le phénomène de résonance et leurs effets sur le fonctionnement de l'accéléromètre. La Fig.III.26 montre que l'erreur de mesure de l'accéléromètre utilisé dans l'essai expérimentale est plus de 5% mais l'erreur de mesure de l'accéléromètre développé dans notre travail est de 1%.

### **III.5. La conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons développé le modèle mathématique adéquat à l'accéléromètre, pour déterminer l'équation du module de mouvement relatif et l'erreur de mesure de l'accéléromètre en fonction du taux d'amortissement et le rapport de fréquence. Ce modèle a été validé par simulation et par des tests expérimentaux. A partir des équations obtenues on peut améliorer le taux d'amortissement pour minimiser l'erreur de mesure du mouvement relatif et la limiter à 1%. Cela permet d'améliorer les performances de l'accéléromètre ainsi que sa précision.

Le modèle développé permet aussi de déterminer la gamme de fréquence approprié à l'accéléromètre pour éviter le cas de résonance. Le choix judicieux du taux d'amortissement et de la gamme de fréquence réduit l'erreur de mesure et on obtient des valeurs plus précises du module de mouvement relatif. Cela nous permet de s'approcher de la valeur réelle de vibration de la structure et d'augmenter ainsi la précision de la mesure et la fiabilité de l'accéléromètre.

# 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 produite un degré de vibration généré par ses mouvements rotatifs ou linéaires.

Pour évaluer le niveau de vibration, il faut utiliser une chaîne de mesure contenant plusieurs éléments dont le premier est le capteur de vibration (l'accéléromètre). Un accéléromètre reçoit des vibrations dans son plan de sensibilité et génère une sortie électrique proportionnelle à l'intensité de la vibration. La sortie de l'accéléromètre est un signal électrique temporel, ce dernier est transformé en signal fréquentiel en utilisant l'analyseur FFT. Le but de la conversion du signal du domaine temporel au domaine fréquentiel est d'identifier les paramètres du signal.

Les analyseurs de vibration ont pour but de donner l'information fréquentielle contenue dans un signal, Il est donc essentiel de comprendre les opérations de traitement de signal afin de sélectionner les paramètres adéquats.

L'objectif de la modélisation du capteur est de calculer le module de mouvement relatif et son erreur de mesure. Cela nous permettra de faire un bon choix de : a) la gamme de fréquence proportionnelle à l'accéléromètre b) le taux d'amortissement pour améliorer les performances du capteur.

Le modèle mathématique de l'accéléromètre est développé pour déterminer les équations du module de mouvement relatif et l'erreur de mesure en fonction du taux d'amortissement et du rapport de fréquence. Ces équations sont utilisées pour calculer le module de mouvement relatif et l'erreur de mesure, puis les essais sont effectués pour choisir le taux d'amortissement pour minimiser l'erreur de mesure à 1%. Le principal avantage du modèle développé est l'amélioration du taux d'amortissement et l'erreur de mesure de l'accéléromètre.

A partir du modèle développé, la fréquence de mouvement relatif qui convient à l'accéléromètre doit être égale ou inférieure à 1/3 de la fréquence naturelle de l'accéléromètre pour éviter le cas de résonance. Par conséquent, pour améliorer le taux d'amortissement et la fréquence de mouvement relatif, l'erreur de mesure doit être réduite afin d'obtenir une valeur précise du module de mouvement relatif. Les testes réalisés par simulation et par expérimentation pour valider et confirmer le modèle développé ont prouvés que la précision de mesure et la fiabilité de l'accéléromètre ont été améliorés.

Dans les travaux future, il est aussi important d'étudier la fiabilité et la sensibilité de l'accéléromètre qui peuvent aider à déterminer le niveaux de vibration avec une grande précision.

# Les références

## Les références

- [1] Peiner, E. ; Scholz, D. ; Fricke, K. ; Schlachetzki, A. ; Hauptmann, P. “Microelectromechanical vibration sensor with optical interconnects” *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 7, No. 1, 1998, Page(s) 56 – 61.
- [2] Morgan, C. Bordovsky, M. ; White, I. ; Griffiths, R. “Noncontact vibration sensors based on current modulated external cavity semiconductor lasers” *Optoelectronics, IEE Proceedings*, Vol. 147, No. 6, 2002, Page(s) 413 – 416.
- [3] Ollier, E; Philippe, P ; Chabrol, C. et Mottier, P. “Micro-opto-mechanical vibration sensor integrated on silicon” *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 17, No. 1, 2002 Page(s) 26 – 29.
- [4] I. Ohsawa; K. Kageyama; H. Murayama; M. Kanai; Y. Machijima; F. Matsumura et K. Nagata “Development of a Novel Vibration Sensor Using Optical Fiber and its Application to Composite Materials” *AIP Conference Proceedings*, Vol. 700, 27 July-1 August 2003, Green Bay, Wisconsin (USA).
- [5] Motoo, K. ; Arai, F. et Fukuda, T. “Piezoelectric Vibration-Type Tactile Sensor Using Elasticity and Viscosity Change of Structure” *Sensors Journal, IEEE*, Vol. 7, No. 7, 2007, Page(s) 1044 – 1051.
- [6] Sebastia, J.P. Alberola Lluch, J. and Lajara Vizcaino, J.R. “Vibration Detector Based on GMR Sensors” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 58, No. 3, 2009, Page(s) 707 – 712.
- [7] Li, Rui; Xiao, Wen ; Yi, Xiaosu ; Xu, Bingshi and Chang, Junlei “Research on the influence of membrane on the performance of vibration sensor” *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, Vol. 27, No. 3, 2009, Page(s) 1428 – 1430.
- [8] Li Xuejun Bin Guangfu ; Dhillon, B.S. “A New Method of Multi-sensor Vibration Signals Data Fusion Based on Correlation Function” *Computer Science and Information Engineering*, 2009 WRI World Congress on, March 31 2009-April 2 2009, Los Angeles, CA, Page(s): 170 – 174.
- [9] Yuelan Lu; Tao Zhu ; Liang Chen and Xiaoyi Bao “Distributed Vibration Sensor Based on Coherent Detection of Phase-OTDR” *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol. 28 , No. 22, 2010, Page(s): 3243 – 3249.
- [10] Liang Gao ; Shengchun Liu ; Zuowei Yin ; Liang Zhang ; Lin Chen and Xiangfei Chen “Fiber-Optic Vibration Sensor Based on Beat Frequency and Frequency-Modulation Demodulation Techniques” *Photonics Technology Letters, IEEE*, Vol. 23 , No. 1, 2011, Page(s) 18 – 20.

- [11] Sukwon Choi; Byunghun Song ; Rhan Ha ; Hojung Cha “Energy-Aware Pipeline Monitoring System Using Piezoelectric Sensors” Journal, IEEE Sensor, Vol. 12 , No. 6, 2012, Page(s) 1695 – 1702.
- [12] Lyonnet, P. « Optimisation d’une politique de maintenance » Edition Tech. & Doc /Lavoisier, 1999, France.
- [13] Mathieu GLADE « Modélisation des coûts de cycle de vie : prévision des coûts de maintenance et de la fiabilité Application à l’aéronautique » Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, 2005.
- [14] Gilles DUCHEMIN « Maintenance des machines et des moteurs » Technique de l’ingénieur BM 4 188, 10 janvier 2006.
- [15] Bernard MECHIN « Introduction aux méthodes de maintenance » Technique de l’ingénieur MT 9 280, 10 oct. 2005.
- [16] Yves LAVINA « Amélioration continue en maintenance » Edition Dunod, Paris, 2005.
- [17] François Monchy « Maintenance méthodes et organisations » Edition Dunod, Paris 2000.
- [18] Document « maintenance et vibration » Stell diagnostic 2002.
- [19] D. Khaled Belmadh, « Technic of maintenance » 2<sup>ème</sup> édition, Université Pierre and Marie Curie- Paris VI, 2006.
- [20] Marie-Line Zani « la surveillance des machines tournantes, mesure 757 » Septembre 2003
- [21] Jean-Marie Auberville « Maintenance industrielle » édition ELLIPSES, collection Technosup, 2004.
- [22] Jean Héng, «Pratique de la maintenance préventive » Edition Dunod, Paris, 2002.
- [23] Claire BRENEUR « Éléments de maintenance préventive de machines tournantes dans le cas de défauts combinés d’engrenages et de roulements » thèse de doctorat, école doctorale des sciences pour l’ingénieur de Lyon, 2002.
- [24] D. Augeix « Analyse vibratoire des machines tournantes » Techniques de l’ingénieur, Vol. BM5145, 2001.
- [25] C. Zhang, S. Liang, and J. Qiu. “Bearing failure prognostic model based on damage mechanics and vibration monitoring” Tribology Transactions, Vol. 44, No. 4, pp. 603 608, 2001.
- [26] R.Bigret et J-L.Féron « Diagnostic- maintenance disponibilité de machines tournantes » Edition Masson, 1995.
- [27] P. GRANJON «Contribution à la compensation active des vibrations des machines électriques » Thèse de doctorat, institut national polytechnique de Grenoble, 19 décembre 2000, France.

- [28] Philippe. E « Une approche méthodologique numérique et expérimentale d'aide à la détection et au suivi vibratoire de défauts d'écaillage de roulements à billes » Thèse de doctorat, Université de Reims, 2004, France.
- [29] brevets de technicien supérieur «Maintenance industrielle chapitre 24 analyse vibratoire » session 2010, source : ministère de l'Éducation nationale.
- [30] Jacques Baudy, Alain Boidin et Gilles Brenier « Vibrations Equilibrage sur site, Applications à la maintenance conditionnelle » Février 1994.
- [31] Alain Boulenger et Christian pachaud « Surveillance des machines par analyse des vibrations » Edition Dunod, Paris, 1998.
- [32] « La Maintenance Prédictive des Machines Tournantes par Surveillance Vibratoire » Séminaire organisé à l'hôtel AURASSI à ALGER par Le Centre de Perfectionnement de l'Entreprise SONATRACH en collaboration avec le groupe dBVip. Du 25 Au 27 juin 2001.
- [33] Jacky DUMAS et Bruno BENNEVAULT « Débuter la mesure vibratoire » Document 01db Stell, Février 2001.
- [34] A. Orantes Molina « Méthodologie pour le placement des capteurs à base de méthodes de classification en vue du diagnostic » Thèse de doctorat de l'institut national des sciences appliquées de Toulouse, 2005.
- [35] F. Bogard, K. Debray, Y. Q.Guo and A. Pavan, "Numerical methodology to easily detect defects in revolving machines by vibration analysis" ELSEVIER, Mécanique & industries 3(2002) 79-87.
- [36] G.Asch et al « les capteurs en instrumentation industrielle» 5<sup>ème</sup> édition, Dunod, 1998.
- [37] Ghemari Zine « modélisation et simulation d'un capteur de vibration » mémoire de Magister, université de Badji Mokhtar Annaba, 2006.
- [38] R. SIMONIN " Les capteurs industriels » Lycée Jules Haag - 25000 Besançon.
- [39] Documentation « Les capteurs» CPGE Brizeux/ PSI, 18/03/2008.
- [40] CHIEMENTIN Xavier « Localisation et quantification des sources vibratoires dans le cadre d'une maintenance préventive conditionnelle en vue de fiabiliser le diagnostic et le suivi de l'endommagement des composants mécaniques tournants : application aux roulements à billes » Thèse de doctorat de université de Reims champagne Ardenne, le 25 octobre 2007.
- [41] A. CHAEHOI « Conception et modélisation de MEMS monolithiques CMOS en technologie FSBM : application aux accéléromètres » Thèse se doctorat, Université Montpellier II, 12 Octobre 2005, France.
- [42] Landolsi Foued « partie I, surveillance des machines par analyse vibratoire » cours de techniques de surveillance.



- [43] Peng LI. « Formalisme pour la Supervision des Systèmes Hybrides Multi-Sources de Générateurs d'Énergie Répartie : Application à la Gestion d'un Micro Réseau » Thèse de doctorat, Soutenue le 19 juin 2009, Ecole Centrale de Lille, France.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] Ghemari. Z and Saad. S “Development of measurement precision of sensor vibration,” J. Vibration Control, Vol.19, No.10, pp. 1480- 1486, 2013.
- [47] 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.
- [48] Ghemari. Z and Saad. S “Modeling and enhancement of mechanical sensitivity of vibration sensor,” J. Vibration Control, June 2013, to be published.
- [49] Ghemari. Z and Saad. S “Improvement of piezoresistive accelerometer performance” International Conference on Systems and Control, October 29 to 31, 2013, Algiers, Algeria