

Mémoire de Fin d'ETUDE  
Pour l'obtention du diplôme de  
MASTER EN  
**ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE**

**Thème**

**Surveillance des vibrations des équipements  
industriels par voie d'induction électromagnétique**

**Présenté par :**

BIBI Zahra  
&  
BENMANSOUR Fatma

**Encadré par :**

Pr. Bachir MAUCHE & Badais BOUCHEBBAH  
Année Universitaire 2021-2022

# **Remerciement**

*Nous commençons d'abord à remercier Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage, la santé, la volonté et la patience pour accomplir ce modeste travail.*

*Nous nous pouvons, réellement, trouver les expressions élégantes que mérite notre encadrant **Mr MAUCHE BACHIR** et **Badais BOUCHEBBAH***

*Afin de les remercier pour leurs orientations, leurs patiences, leurs encouragements, leurs conseils et leurs aides, et pour la confiance qu'ils nous ont accordée.*

*Ainsi nous remercions tous les membres de jury d'avoir accepté d'examiner notre travail.*

*Nos sincères remerciements vont également aux enseignants du département de génie électrique, pour leurs conseils et leurs critiques constructives, qui nous ont permis d'évoluer tout au long de notre cursus.*

*Un grand merci à tous.*

# *Dédicace*

*Chaleureusement je dédie ce modeste travail :*

*A la lumière de ma vie, mes chers parents en témoignage pour leur amour et leur sacrifice sans limites qui je souhaite la bonne santé et que Dieu me les garde.*

*A ma chère sœur, mes frères et ma belle-sœur, qui n'ont pas cessée de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de les études.*

*A mes petits neveux **AMINE**, **ANIA**, **AYA** et **MAYLISSE***

*A mes oncles et mes tantes*

*A tous les cousins, les voisins et les amis que j'ai connu jusqu'à maintenant. Merci pour leurs aides, encouragements et support dans les moments difficiles.*

*Sans oublier mon binôme **ZAHRA** pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.*

*A tous ceux que j'aime*

**FATMA**

## *Dédicace*

*Chaleureusement je dédie ce modeste travail :*

*A la lumière de ma vie, mes chers parents en témoignage pour leur amour et leur sacrifice sans limites qui je souhaite la bonne santé et que Dieu me les garde.*

*A mes chères sœurs **CYLIA ET THAFATH** pour leurs encouragements permanents et leur soutien moral.*

*À mon frère unique **SALAH**.*

*A mon cher fiancé **AKLI** pour tout son aide et soutien ainsi sa famille.*

*A toute ma famille **BIBI**.*

*A tous mes amis et tous mes proches.*

*A mon encadreur **MAOUCHE BACHIR** pour m'avoir dirigé ce travail de recherche et m'avoir fait bénéficier de son expérience et de précieux conseils.*

*Sans oublier mon binôme **FATMA** pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.*

*Et à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.*

*A toute la promotion de 2022.*

**ZAHRA**

## Table des matières

<b>Introduction générale .....</b>	<b>13</b>
<b>I- Equipements industriels susceptibles de vibrer.....</b>	<b>15</b>
I.1 Introduction .....	15
I.2 Moteur électrique .....	15
I.3 Pompes .....	16
I.3.1 Fonctionnement d'une pompe.....	16
I.3.2 Problèmes courants .....	16
I.3.3 Sécurité de la pompe .....	16
I.4 Compresseurs .....	17
I.4.1 Définition .....	17
I.4.2 Principe de fonctionnement .....	18
I.4.3 Différentes classes de compresseur.....	18
I.5 Ventilateurs .....	18
I.5.1 Définition .....	18
I.5.2 Principe de fonctionnement des ventilateurs .....	19
I.6 Turbines.....	19
I.6.1 Définition .....	19
I.6.2 Types des turbines.....	20
I.6.3 Turbine à vapeur .....	20
I.7 Séparateurs .....	21
I.8 Conclusion.....	22
<b>II- Analyse vibratoire .....</b>	<b>23</b>
II.1 Introduction .....	23

---

II.2	Notions fondamentales .....	23
II.3	Définition d'une Vibration .....	23
II.4	Différentes formes des vibrations.....	23
II.4.1	Vibrations dus aux harmoniques.....	24
II.4.2	Vibrations périodiques .....	24
II.4.3	Vibrations aléatoires .....	25
II.5	Cinq grandeurs pour mesurée une vibration mécanique.....	26
II.5.1	Déplacement.....	26
II.5.2	Vitesse.....	26
II.5.3	Accélération .....	26
II.5.4	Amplitude .....	26
II.5.5	Fréquence .....	26
II.6	Vibrations des machines tournantes .....	27
II.7	Déférents défauts des machines tournantes .....	27
II.7.1	Défauts au stator.....	27
II.7.2	Défauts au rotor.....	27
II.7.3	Défaut d'excentricité.....	27
II.7.4	Défauts de roulement .....	28
II.7.5	Défauts d'engrenages.....	29
II.7.6	Défauts des courroies.....	29
II.7.7	Défauts de désalignement .....	30
II.7.8	Défaut de balourd.....	31
II.7.9	Défauts de fixation.....	32
II.8	L'analyse vibratoire .....	33
II.9	Objectifs d'analyse vibratoire.....	33

---

---

II.10	Méthodes de l'analyse vibratoire.....	34
II.10.1	Méthodes temporelles .....	34
II.10.2	Méthodes fréquentielles .....	34
II.11	Détermination des seuils.....	34
II.11.1	Méthode du relevé global.....	34
II.11.2	Méthode de l'analyse spectrale.....	35
II.11.3	Seuils de jugement .....	35
II.12	Domages causés par des vibrations excessives .....	37
II.13	Conclusion.....	38
III-	Capteurs des vibrations .....	39
III.1	Introduction .....	39
III.2	Détecteur de vibration .....	39
III.2.1	Définition.....	39
III.2.2	Détecteurs mécaniques.....	39
III.2.3	Détecteurs inductifs .....	40
III.2.4	Détecteurs capacitifs .....	41
III.2.5	Détecteur de proximité à ultrasons .....	42
III.2.6	Détecteurs photoélectriques .....	43
III.3	Capteurs des vibrations.....	43
III.3.1	Définition d'un capteur.....	43
III.3.2	Paramètre des capteurs.....	44
III.4	Caractéristiques d'une chaîne de mesure informatisée .....	44
III.5	Classification des capteurs.....	45
III.6	Types des capteurs.....	47
III.7	Choix de l'emplacement des capteurs .....	50

---

---

III.8	Capteur de déplacement.....	50
III.8.1	Fonctionnement d'un capteur de déplacement .....	51
III.8.2	Domaines d'applications.....	52
III.9	Vélocimètre .....	52
III.10	Accéléromètres.....	53
III.11	Chaine d'acquisition .....	54
III.12	Conclusion .....	55
IV-	Modélisation électromagnétique et simulation.....	56
IV.1	Introduction .....	56
IV.2	Equations de Maxwell .....	56
IV.3	Lois de comportement des milieux.....	57
IV.3.1	Loi d'Ohm .....	57
IV.3.2	Relation magnétique.....	57
IV.3.3	Relation diélectrique.....	57
IV.4	Hypothèses simplificatrices.....	58
IV.5	Formulation électromagnétique.....	58
IV.6	Formulation intégrale des équations.....	59
IV.7	Application dans le cas axisymétrique .....	60
IV.7.1	Expression du potentiel vecteur magnétique.....	60
IV.7.2	Expression du gradient du potentiel scalaire électrique .....	63
IV.8	Méthode des circuits électromagnétiques couplés (CEC) .....	64
IV.8.1	Equation intégrale.....	64
IV.8.2	Equation intégrale générale pour le calcul d'impédance.....	65
IV.9	Modèle géométrique .....	70
IV.10	Description du dispositif.....	71

---



---

IV.11	Evaluation de $\Delta R$ et $\Delta X$ .....	73
IV.12	Etude en fonction de l'épaisseur de la pièce vibrante.....	75
IV.12.1	Variation de la résistance.....	75
IV.12.2	Variation de la réactance.....	76
IV.13	Etude en fonction de lift-off.....	76
IV.13.1	Variation de la résistance.....	76
IV.13.2	Variation de la réactance.....	77
IV.14	Conclusion.....	77
	<b>Conclusion générale... ..</b>	<b>78</b>
	<b>Références bibliographique... ..</b>	<b>79</b>

## Liste des figures

Figure I.1-Moteur électrique.....	15
Figure I. 2-Pompe électrique.....	16
Figure I. 3-Compresseurs à vis .....	17
Figure I. 4-Ventilateur .....	18
Figure I. 5-Turbine à vapeur .....	20
Figure II. 1-Vibration harmonique.....	24
Figure II. 2-Représentation d'un signal périodique.....	25
Figure II. 3-Vibration aléatoire .....	25
Figure II. 4-Constitution de roulement .....	28
Figure II. 5-Défaut d'engrenage .....	29
Figure II. 6-Transmission par courroie .....	30
Figure II.7-Désalignement parallèle .....	31
Figure II. 8-Désalignement angulaire .....	31
Figure II. 9-Défaut de balourd dans un rotor [10].....	32
Figure II. 10-Défaut de fixation.....	32
Figure II. 11- Détermination des seuils par la méthode du relevé global[16] .....	35
Figure III. 1-Détecteur de position.....	40
Figure III. 2-Détecteur de proximité.....	40
Figure III. 3-Détecteur de proximité capacitif .....	42
Figure III. 4-Schéma d'acquérir l'information.....	44
Figure III. 5-Chaine de mesure .....	45
Figure III. 6-Classification des signaux .....	46

---

Figure III. 7-Photoélectricité et effet hall .....	49
Figure III. 8-Effet piézoélectrique .....	49
Figure III. 9-Capteur proximètre .....	51
Figure III. 10-Schéma de capteur proximètre .....	51
Figure III. 11-Schéma de principe d'un vélocimètre.....	53
Figure III. 12-Schéma de principe d'un accéléromètre[15].....	53
Figure IV.1-Schéma du système en 2D .....	60
Figure IV.2-Potentiel vecteur magnétique créé par une spire circulaire.....	61
Figure IV.3-Représentation d'une spire élémentaire .....	63
Figure IV.4-Schéma du capteur à vide .....	65
Figure IV.5-Système électromagnétique .....	67
Figure IV.6 -Géométrie du système.....	70
Figure IV.7- Géométrie axisymétrique 2D .....	71
Figure IV.8-Géométrie axisymétrique discrétisé .....	72
Figure IV.9- Forme sinusoïdale d'une vibration .....	73
Figure IV.10- Variation de l'impédance .....	74
Figure IV.11- Module de la variation de l'impédance .....	75
Figure IV.13- Variation de la résistance .....	75
Figure IV.12- Variation de la réactance.....	76
Figure IV.13- Variation de la résistance .....	76
Figure IV.14- Variation de la réactance.....	77

## Liste des tableaux

Tableau II. 1-Normes AFNOR E90-300 ou ISO 2372[15].....	36
Tableau II. 2- les principaux défauts et leurs fréquences correspondent [15]. .....	37
Tableau III. 1- Type de matériau utilisé et caractéristique électrique des capteurs passifs.....	47
Tableau III. 2-Grandeurs d'entrée et de sortie et effet utilisé pour les capteurs actifs.....	48

## **Introduction générale**

L'analyse vibratoire est utilisée pour contrôler les machines tournantes, notamment pour surveiller les parties fragiles ou critiques du système. Une défaillance soudaine de ces systèmes peut entraîner des réparations coûteuses en termes de production, causer des dommages collatéraux ou mettre en danger la vie humaine.

Afin de réduire les coûts de production, de raccourcir les délais de réparation et d'éviter des dommages importants, les industries modernes exigent de plus en plus une maintenance fiable et efficace des machines électriques tournantes

La surveillance des machines tournantes est basée sur l'analyse des vibrations depuis des décennies. À l'origine, elles ont été conçues pour protéger les installations contre les dommages et les catastrophes économiques ou même d'origine humaine causées par des pannes inattendues.

Les machines tournantes telles que les moteurs, les compresseurs, les turbines à vapeur et les ventilateurs industriels sont largement utilisées dans de nombreux domaines industriels.

Le fait que diverses anomalies et défauts qui surviennent sur les machines tournantes puissent se traduire par des vibrations et des bruits permet de transformer la relation de proportionnalité liant ces deux phénomènes. L'analyse de ces vibrations est donc l'un des moyens les plus utilisés dans l'industrie pour surveiller et détecter les défauts des machines tournantes.

L'analyse vibratoire est conçue pour détecter d'éventuelles pannes et suivre leur évolution afin de planifier des interventions mécaniques. Elle est utilisée pour surveiller les machines fonctionnant à basse vitesse et est une technologie en développement depuis de nombreuses années. À cette fin, nous notons que la méthode la plus courante pour surveiller les défaillances des équipements industriels est l'analyse vibratoire.

De plus, l'observation des phénomènes vibratoires peut permettre de détecter ces problèmes et d'éviter des pannes imprévues, parfois coûteuses d'établir un programme qui comprend la détection de l'apparition de défauts sans démonter la machine en utilisant des capteurs de vibrations pour acquérir le signal de vibrations.

Ce mémoire est divisé en quatre chapitres suivants :

Dans le premier chapitre, nous présenterons les équipements industriels qui peuvent vibrer, le chapitre deux sera consacré à l'analyse vibratoire. Ensuite les généralités sur les

capteurs des vibrations seront représentées dans le chapitre trois, et nous arriverons à notre dernier chapitre qui est dédié à la modélisation électromagnétique et simulation.

Enfin, nous terminons notre travail par une conclusion.

## I- Equipements industriels susceptibles de vibrer

### I.1 Introduction

La notion d'équipement représente l'ensemble des accessoires, équipements ou machines fonctionnels. En général, une machine représente un ensemble de pièces ou d'organes reliés entre eux, dont au moins un est mobile, associés à des actionneurs, des circuits de commande et de puissance selon les besoins, et combinés pour atteindre une application définie, le cas échéant pour la transformation, la manutention, mouvement et emballage des matériaux.

La sécurité des machines et des équipements est un point très important de la sécurité de l'entreprise ou de l'industrie, et le fait que des machines soient choisies qui puissent démontrer une sécurité maximale de l'équipement lui-même reflétera automatiquement la sécurité de l'installation, puis la sécurité des personnes et vice versa.

Il existe différents types de machines dans l'industrie, nous pouvons donner un exemple : pompes et compresseurs (à déplacement, axiaux, radiaux, radiaux), turbines à vapeur, turbines, ventilateurs, moteurs (électriques, à combustion interne, etc.) et séparateur.

### I.2 Moteur électrique

Il s'agit d'une machine tournante, capable de convertir de l'énergie électrique en énergie mécanique et inversement.



Figure I. 1-Moteur électrique

Un moteur électrique est une machine électromécanique très simple. En pratique, un moteur électrique contient des enroulements de fils, un stator (la partie fixe du moteur) et un rotor (la partie mobile). L'alimentation en courant de l'enroulement induit un champ magnétique. Les pôles du rotor tournent alors librement et continûment : le pôle nord attire le pôle sud et inversement.

Les moteurs électriques sont indispensables dans diverses applications industrielles et tertiaires. Sa simplicité de fonctionnement en fait un appareil très fiable qui nécessite peu d'entretien.

### **I.3 Pompes**

#### **I.3.1 Fonctionnement d'une pompe**

Le fonctionnement d'une pompe consiste à produire une différence de pression entre la région d'aspiration et la région de refoulement au moyen de l'organe actif (piston, roue,...etc.) de la pompe.

Du point de vue physique, la pompe transforme l'énergie mécanique de son moteur d'entraînement en énergie hydraulique.



Figure I. 2-Pompe électrique

#### **I.3.2 Problèmes courants**

- Alignement
- Frottement
- Cavitation
- Roulement
- Balourd
- Desserrage

#### **I.3.3 Sécurité de la pompe**

Le rôle de la sécurité s'accomplit d'une manière très intéressante en évitant la présence des accidents et l'endommagement du matériel et des équipements. La sécurité de la pompe doit être établie suivant deux périodes :



- Avant de mettre la pompe en marche.
- Pendant la période de fonctionnement de la pompe.

**a. Avant de mettre la pompe en marche, il faut**

- Vérifier les dispositifs, leur fixation et système de lubrification.
- Fermer la vanne de refoulement et ouvrir celle d'aspiration.
- Vérifier l'état des conduites d'aspiration et de refoulement pendant et avant le démarrage de la pompe.

**b. Pendant la mise en marche de la pompe, il faut**

- Consulter les appareils de contrôle (capteur).
- Surveiller les dispositifs de lubrification de la partie d'entraînement.
- Eviter les fuites de brute du côté des couvertures tubulure garniture.
- Contrôler les vibrations de l'ensemble pompe moteur à l'aide d'indicateur.
- Pour la sécurité et la condition de production il faut instituer une pompe en réserve en cas d'une panne de la pompe en service.

## **I.4 Compresseurs**

### **I.4.1 Définition**

Un compresseur est un dispositif mécanique conçu pour augmenter la pression d'un gaz, augmentant ainsi son énergie. Il existe aussi des compresseurs sans pièces mécaniques, ce sont des compresseurs thermiques, communément appelés éjecteurs.



Figure I. 3-Compresseurs à vis

Les compresseurs sont utilisés dans différents domaines tels que les climatiseurs (unités de conditionnement d'air), les réfrigérateurs, les turboréacteurs et certains systèmes de production d'énergie.

#### **I.4.2 Principe de fonctionnement**

Un compresseur simple corps est constitué d'un ensemble rotor/stator (redresseur) avec autant d'étages que nécessaire pour obtenir le rapport de pression souhaité.

Le compresseur est constitué d'un moteur et d'un cylindre. Thermique ou électrique, le moteur fait tourner le cylindre qui comprime l'air dans une étanche. Ces deux éléments essentiels forment ce qu'on appelle le groupe de compresseur.

#### **I.4.3 Différentes classes de compresseur**

On distingue deux grandes familles de compresseurs :

- Les compresseurs à déplacement ou volumétriques.
- Les compresseurs dynamiques.

### **I.5 Ventilateurs**

#### **I.5.1 Définition**

Les ventilateurs sont des turbomachines transférant à l'air qui les traverse l'énergie nécessaire afin de véhiculer l'air au travers d'une paroi (ventilateur de paroi), dans une ou plusieurs conduites ou bien ils fournissent la force motrice nécessaire au déplacement de l'air contre la résistance d'un réseau transporteur d'air. Ils peuvent alimenter une pièce en air ou en extraire de l'air pollué.



Figure I. 4- Ventilateur

## I.5.2 Principe de fonctionnement des ventilateurs

Les composants de base du ventilateur consistent en une roue et un carter pour diriger le débit d'air. Les principes de base du fonctionnement des ventilateurs sont traités sous les deux rubriques suivantes :

### a. Ventilateurs centrifuges

Les ventilateurs centrifuges déplacent l'air grâce à la force centrifuge produite par le déplacement de l'air entre les pales de la roue et l'inertie générée par la vitesse de l'air quittant les pales de celle-ci [1].

Les principales applications des ventilateurs centrifuges sont :

- La ventilation industrielle.
- Centrales de traitement d'air.
- Dépoussiérage.
- Procédé industrielle.

### b. Ventilateurs axiaux

Dans les ventilateurs axiaux, l'air est propulsé par la variation de la vitesse de l'air se déplaçant sur les pales de la roue. Aucune énergie ajoutée à l'air par les forces centrifuges.

Les principales applications des ventilateurs axiaux

- Ventilation (tunnel, parking, souterrain, locaux industriels).
- Désenfumage.
- Refroidissement.
- Climatisation.

## I.6 Turbines

### I.6.1 Définition

Une turbine est un dispositif rotatif destiné à utiliser l'énergie cinétique d'un fluide liquide comme l'eau ou gazeux (vapeur, air, gaz de combustion), pour faire tourner un arbre supportant les aubes de la turbine. L'énergie du fluide, caractérisée par sa vitesse et son enthalpie, est partiellement convertie en énergie mécanique pour entraîner un alternateur, un compresseur, une pompe ou tout autre récepteur mécanique rotatif. L'ensemble est alors respectivement appelé turbo-alternateur, turbocompresseur, turbopompe, etc.

## I.6.2 Types des turbines

Les turbines sont classées selon leur mode de fonctionnement ainsi qu'à leurs modes de constructions. On distingue quatre grandes catégories de turbines :

- Turbine à gaz.
- Turbine à vapeur.
- Turbine éolienne.
- Turbine hydraulique.

## I.6.3 Turbine à vapeur

### I.6.3.1 Définition

La turbine à vapeur est un des matériels stratégiques des installations de production d'énergie électrique, elles sont notamment utilisées dans la production d'électricité à partir d'énergie thermique [2].



Figure I. 5-Turbine à vapeur

### I.6.3.2 Domaine d'utilisation

Elles peuvent être utilisées en cycles combinés avec un générateur de vapeur qui récupère la chaleur. Les unités industrielles sont utilisées pour entraîner des machines, des pompes, des compresseurs et des générateurs.

### I.6.3.3 Principe de fonctionnement

La turbine à vapeur est un moteur thermique à combustion externe, fonctionnant selon le cycle thermodynamique dit de Rankine. Ce cycle se distingue par le changement d'état affectant

le fluide moteur qui est en général de la vapeur d'eau. Ce cycle comprend au moins les étapes suivantes :

- L'eau liquide est mise sous pression par une pompe et envoyée vers la chaudière.
- L'eau est chauffée, vaporisée et surchauffée.
- La vapeur se détend et refroidit dans la turbine en fournissant de l'énergie mécanique.
- La vapeur détendue est condensée au contact de la source froide sous vide partiel.

#### **I.6.3.4 Avantages et inconvénients des turbines à vapeurs**

##### **a. Avantages**

- Convient à tous types de combustibles.
- Très bon rendement global.
- Coûts d'entretien modiques.
- Durée de vie élevée.

##### **b. Inconvénients**

- Peu intéressant pour les faibles besoins de chaleur.
- Investissement élevé.
- Fonctionnement quasi-continu.

#### **I.7 Séparateurs**

Ce sont des équipements qui permettent la séparation des phases (d'extraire les particules solides d'un liquide).

## **I.8 Conclusion**

Les machines tournantes sont une source majeure de vibrations résultant de la défaillance de composants. La plupart des pannes rencontrées dans les machines tournantes produisent des modèles de vibration importants. La maîtrise de ces vibrations est un facteur clé pour assurer la fiabilité des équipements.

La santé d'une machine peut être évaluée par son comportement vibratoire. La vibration est une quantité dynamique qui change rapidement dans le temps. Connaître l'état d'une machine permet d'évaluer son fonctionnement silencieux et l'état des différents composants qui la constituent.

Malgré l'accélération de la technologie, notamment dans le secteur industriel, les machines tournantes conservent toujours leur place et leur poids dans les installations. Pour cela, nous devons développer et améliorer la capacité à prévoir les pannes afin d'éviter les arrêts non planifiés de nos machines, synonymes de perte de productivité.

## **II- Analyse vibratoire**

### **II.1 Introduction**

Toutes les machines en marche génèrent des vibrations, images des forces dynamiques créées par les pièces en mouvement. Par conséquent, une machine neuve en bon état de fonctionnement produit très peu de vibrations. La détérioration de la fonction entraîne généralement une augmentation des niveaux de vibration. En observant l'évolution de ce niveau, on peut ainsi obtenir des informations très utiles sur l'état de la machine. Ces propriétés font de la surveillance par l'analyse des vibrations un outil essentiel pour la maintenance moderne, car elle évite les dommages et n'intervient qu'au bon moment et lors des arrêts de production planifiés par le biais d'un dépistage ou d'un diagnostic de panne approprié.

L'analyse des vibrations est la méthode de surveillance des machines la plus populaire, car elle offre plusieurs avantages par rapport aux autres méthodes.

Elle est utilisée pour détecter les défauts naissants et sévères dans les composants de machines, comme les roulements, les engrenages, les arbres, etc.

### **II.2 Notions fondamentales**

L'une des questions les plus importantes est de déterminer où et pourquoi les défaillances se produisent au niveau des machines tournantes, et la meilleure façon de répondre à cette question est la méthode d'analyse vibratoire.

### **II.3 Définition d'une Vibration**

La vibration est le changement dans le temps d'une caractéristique quantitative du mouvement ou de la position d'un système mécanique, lorsque la quantité est alternativement supérieure et inférieure à une valeur moyenne ou de référence.

### **II.4 Différentes formes des vibrations**

On classe généralement les vibrations d'après l'évolution de la variable considérée dans le temps (périodicité).

### II.4.1 Vibrations dus aux harmoniques

Une vibration harmonique est une vibration dont le diagramme amplitude-temps est représenté par une sinusoïde (**Figure II.1**).

Le meilleur exemple d'une vibration harmonique est celle qui est générée par le balourd d'un rotor en mouvement.

Si l'on décrit mathématiquement un signal sinusoïdal, nous obtenons :

$$X(t) = X \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi) \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$X$  : amplitude .

$\omega$  : vitesse angulaire ou pulsation du mouvement ( $2\pi f$ ).

$f$  : fréquence du mouvement.

$\phi$  : phase du mouvement par rapport à une référence dans le temps.

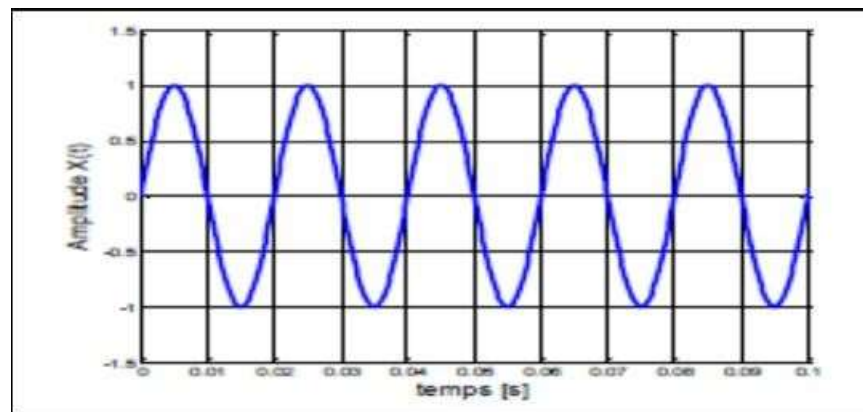


Figure II. 1-Vibration harmonique

### II.4.2 Vibrations périodiques

Une vibration périodique est telle qu'elle se reproduit exactement après un certain temps appelé période.

Une telle vibration est créée par une excitation elle-même périodique. C'est le cas le plus fréquent rencontré dans les machines. La forme de cette vibration est composée de plusieurs vibrations harmoniques.



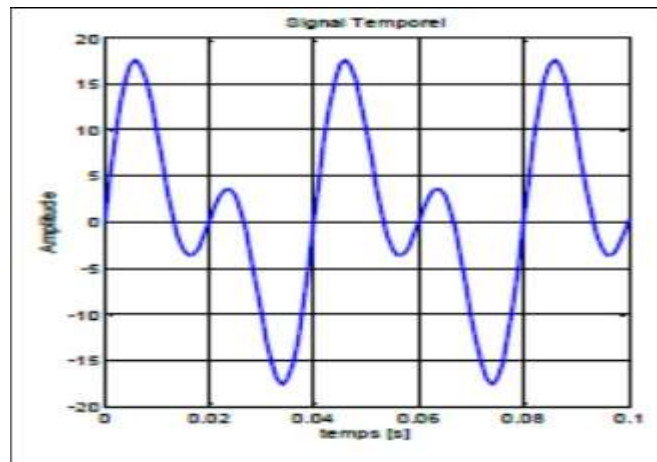


Figure II. 2- Représentation d'un signal périodique

Elle est décrite par l'équation suivante:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n [X_i \cdot \sin(\omega_i t + \varphi_i)] \quad (\text{II.2})$$

### II.4.3 Vibrations aléatoires

C'est une vibration continue et sa période de répétition ne peut pas être déterminée. Par conséquent, il ne peut pas être représenté par une fonction mathématique exacte et doit être caractérisé à l'aide de statistiques. C'est le cas des chocs enregistrés sur le broyeur.

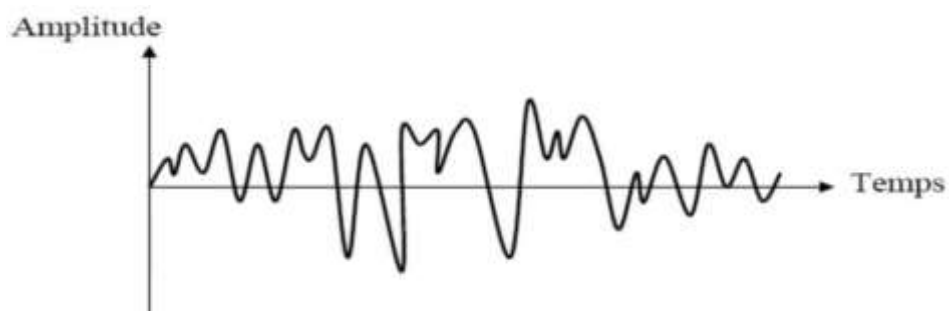


Figure II. 3-Vibration aléatoire

## II.5 Les Cinq grandeurs pour mesurer une vibration mécanique

### II.5.1 Déplacement

Grandeur vectorielle qui définit le changement de position d'un corps ou point matériel par rapport à un système de référence.

On peut écrire l'équation de la variation du déplacement en fonction du temps, de la manière suivante :

$$X(t) = A.\sin(\omega t) \quad (\text{II.3})$$

$X$  : déplacement ;

$T$  : temps;

$A$  : amplitude;

$\omega$  : pulsation ou vitesse angulaire (rad/s);

### II.5.2 Vitesse

Vecteur qui représente la dérivée de déplacement par rapport au temps. Elle s'écrit:

$$V = \frac{dx}{dt} = d \frac{A.\sin(\omega t)}{dt} = A\omega.\cos(\omega t) \quad (\text{II.4})$$

### II.5.3 Accélération

Dérivée de la vitesse par rapport au temps.

$$\gamma = \frac{dv}{dt} = d \frac{(A\omega.\cos(\omega t))}{dt} \quad (\text{II.5})$$

### II.5.4 Amplitude

L'amplitude ( $A$ ) est le déplacement maximal par rapport à la position d'équilibre, ou encore la vitesse ou l'accélération maximale, selon le capteur de vibrations utilisé.

Pour simplifier, nous ne tiendrons compte que du déplacement. Dans ce cas, l'unité utilisée habituellement pour mesurer l'amplitude des vibrations est le micromètre ( $1\mu\text{m}$ ).

### II.5.5 Fréquence

La fréquence ( $f$ ) est le nombre de cycles de vibration par unité de temps. L'unité de fréquence est l'Hertz (Hz), soit un cycle par seconde. Comme la vitesse de rotation des machines tournantes est exprimée en tours par minute (T/M), la fréquence des vibrations aux quelles

celles-ci soumises est communément exprimée en cycles par minute (C/M). Comme une minute compte 60 secondes donc  $1\text{Hz} = 60\text{C/M}$ .

## **II.6 Vibrations des machines tournantes**

Les vibrations produites par les machines tournantes sont de nature cyclique et les fréquences des phénomènes sont définies par les principes de la cinématique.

Les vibrations les plus susceptibles de causer des problèmes sont les vibrations mécaniques et peuvent être associées à une variété de phénomènes [3].

## **II.7 Déférents défauts des machines tournantes**

### **II.7.1 Défauts au stator**

Les défauts les plus répétables, localisés au niveau du stator, peuvent être identifiés comme suit : défaut d'isolement, court-circuit entre spires, court-circuit entre phases, court-circuit entre phase et masse, déséquilibre de puissance, défaut de circuit sont issus. Ces défauts sont généralement liés à la dégradation de l'isolation.

### **II.7.2 Défauts au rotor**

Ils sont généralement causés par des conditions de fonctionnement difficiles, principalement des températures élevées ou des charges lourdes, en particulier au démarrage.

Par conséquent, le développement des défauts réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique, entraînant des oscillations de vitesse de rotation et des vibrations mécaniques.

### **II.7.3 Défaut d'excentricité**

L'excentricité d'un moteur est un phénomène évolutif dans le temps qui existe depuis sa fabrication.

Cette défaillance entraîne des modifications des propriétés magnétiques et mécaniques de la machine. En effet, la force électromagnétique augmente progressivement avec le développement de l'excentricité, ce qui conduit à la dégradation de l'isolant dans le bobinage.

## II.7.4 Défauts de roulement

Le roulement est un organe de base qui assure une liaison mobile entre deux éléments d'un mécanisme en rotation l'un par rapport à l'autre. Sa fonction est de permettre la rotation relative, de ces éléments, sous charge, avec précision et avec un frottement minimal. La majorité des machines électriques utilisent les roulements à billes ou à rouleaux.

Environ 40% à 70% des défauts rencontrés sont les suivants : écaillage, grippage, corrosion.

Le roulement est composé des éléments suivants :

- Deux bagues concentriques en acier, appelées bague intérieure et bague extérieure, comportant des chemins de roulement (surfaces sur lesquelles « roulent » les corps roulants).
- Des corps roulants, billes ou rouleaux généralement en acier, permettant le mouvement des deux bagues avec un frottement minimal.
- Une cage séparant et guidant les corps roulants (en polyamide, tôle acier, laiton ou résine).

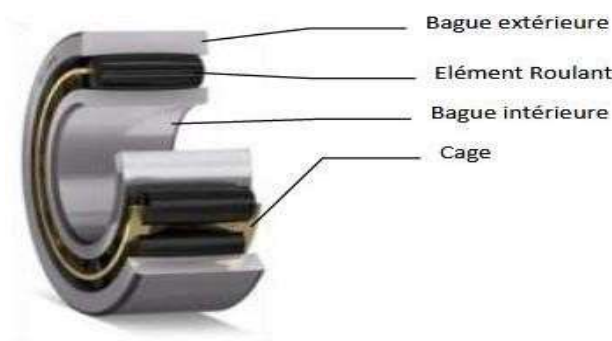


Figure II. 4-Constitution de roulement [4].

### II.7.4.1 Causes des défauts

Les roulements peuvent être endommagés par des causes externes comme :

- Contamination du roulement par des particules extérieures : poussière, grains de sables.
- Lubrification inadéquate qui peut causer un échauffement et l'usure du roulement.

- Mauvais alignement du rotor.
- Courant qui traverse le roulement et qui cause des arcs électriques.

#### II.7.4.2 Techniques de détection des défauts des roulements

L'étude théorique du roulement montre les différentes conditions anormales et la détermination de la durée de vie du roulement. Diagnostic vibratoire des machines, basé sur la connaissance d'images vibratoires où surviennent des défauts, afin de regrouper et de déterminer des seuils de jugement.

L'identification de la nature de ces vibrations est un facteur important pour déterminer l'origine de l'anomalie. En mettant en évidence la répétition de cette impulsion, on définit la fréquence de mouvement caractéristique de chaque défaut élémentaire du roulement.

#### II.7.5 Défauts d'engrenages

Un engrenage est composé de l'ensemble de deux roues dentée engrenant l'une avec l'autre, permettant de transmettre de la puissance entre deux arbres rapprochés avec un rapport de vitesse constant. Selon la position relative des deux arbres.



Figure II. 5-Défaut d'engrenage

#### II.7.6 Défauts des courroies

Les courroies sont utilisées pour transférer la puissance entre deux arbres qui ne sont pas trop éloignés. Une courroie constituée d'une bande sans fin qui chevauche deux poulies transfère l'énergie en adhérant aux poulies [4].



Figure II.6-Transmission par courroie

### ➤ Origines du défaut

La défaillance de la courroie est causée par un montage incorrect, l'usure ou le désalignement des deux poulies. Les statistiques sur les causes et la localisation des défauts dans les machines tournantes montrent que les engrenages et les roulements sont les composants les plus sensibles.

### II.7.7 Défauts de désalignement

Le désalignement est la principale cause de raccourcissement de la durée de vie d'un appareil. Il produit une force supplémentaire qui entraîne une détérioration rapide du système d'embrayage, mais il se produit également au niveau des roulements, mais aussi au niveau des paliers.

Le réglage des deux machines a pour but de s'assurer que les axes des deux lignes d'arbre sont parallèles et confondus.

- **Désalignement parallèle**

Les axes des arbres des deux rotors ne sont pas confondus.

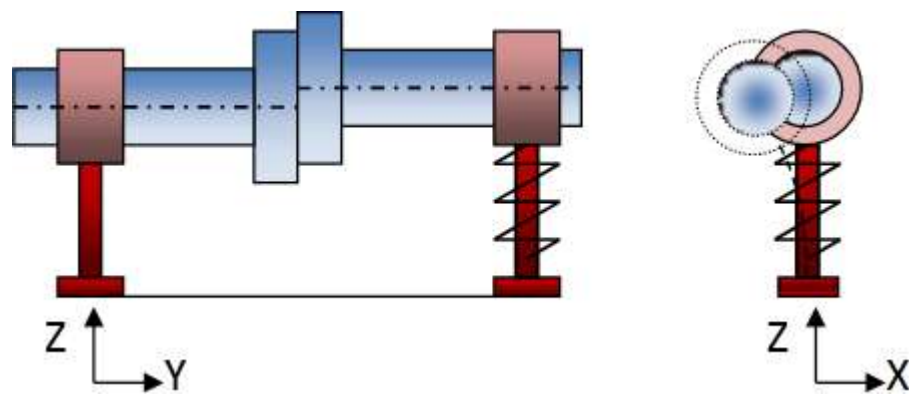


Figure II. 7-Désalignement parallèle

- **Désalignement angulaire**

Les axes des arbres des deux rotors auront un angle différent de  $180^\circ$ .

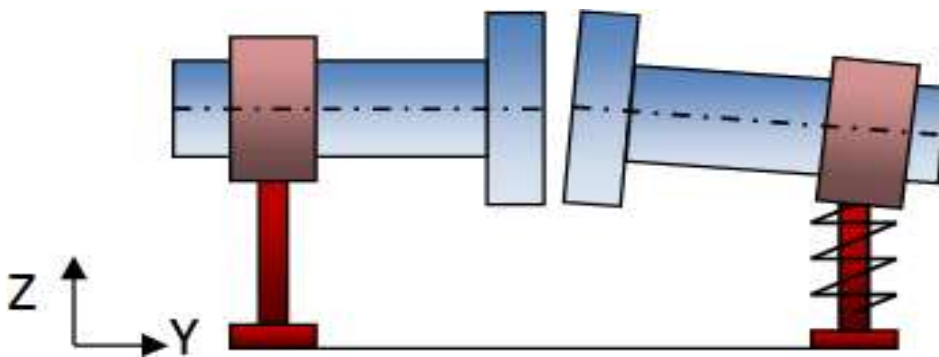


Figure II. 8-Désalignement angulaire

### II.7.8 Défaut de balourd

C'est la cause la plus courante de vibration. Ce phénomène se produit à des vitesses de rotation et peut être causé par une mauvaise répartition spatiale des masses dans la structure, entraînant une déviation du centre de gravité par rapport à l'axe géométrique du rotor de la machine électrique tournante [5].

La force produite par le balourd est fonction de la masse, et du rayon du cercle sur lequel tourne le rotor. Elle est proportionnelle au carré de la vitesse de rotation.

Le phénomène de balourd est caractérisé par des vibrations radiales prononcées aux fréquences de rotation [6].

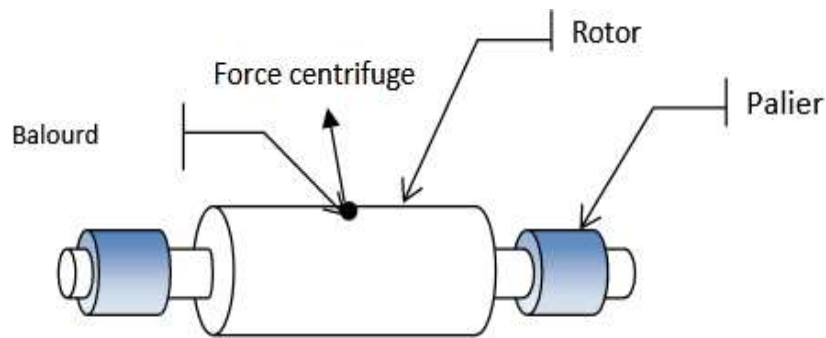


Figure II. 9-Défaut de balourd dans un rotor [4].

### II.7.9 Défauts de fixation

Si le roulement est desserré ou si la surface radiale peut se déplacer partiellement, la vibration radiale se produira à une fréquence radiale égale à deux fois la vitesse. Cette vibration agit comme un balourd initial et peut avoir des amplitudes importantes en fonction du jeu du roulement.

En analysant les déphasages entre deux mesures effectuées orthogonalement sur un même roulement, il est possible de distinguer des déséquilibres (efforts de rotation), des erreurs de montage, ou des anomalies dues à la déformation du roulement (efforts directionnels dus à la contrainte) [6].

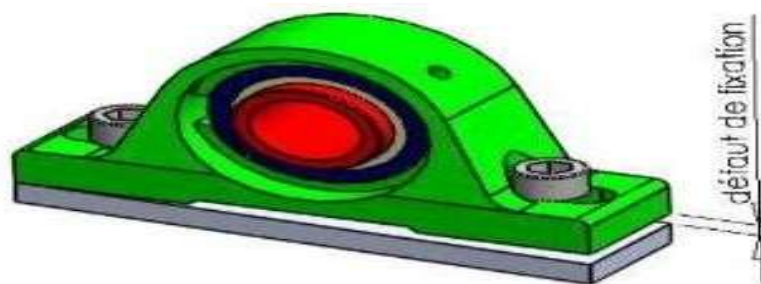


Figure II. 10-Défaut de fixation [4].



## II.8 L'analyse vibratoire

L'analyse vibratoire est l'un des moyens utilisés pour surveiller l'état des machines tournantes en fonctionnement.

Son principe repose sur l'idée que les structures des machines, sous action dynamique, émettent des signaux vibratoires à la même fréquence que les forces qui les ont provoquées, et que la mesure globale prise en un certain point est la somme des réponses vibratoires. Ainsi, grâce à des capteurs placés en des points précis, il est possible d'enregistrer les vibrations transmises par la structure de la machine et en l'analysant, d'enregistrer la source des efforts auxquels elle est soumise.

## II.9 Objectifs d'analyse vibratoire

L'analyse vibratoire poursuit deux objectifs :

- La détection des défauts.
- L'analyse détaillée des défauts.

On utilise à cet effet des paramètres calculés :

- Soit dans le domaine temporel.
- Soit dans le domaine fréquentiel.
- Soit dans les deux à la fois.

### a. Avantages

- Détection des défauts à un stade précoce.
- Possibilités de réaliser un diagnostic approfondi.
- Autorise une surveillance continue.
- Permet de surveiller l'équipement à distance.

### b. Inconvénients

- Spectres parfois difficile interpréter.
- Dans le cas de la surveillance continue, installations relativement coûteuses.

## **II.10 Méthodes de l'analyse vibratoire**

Il existe des nombreux instruments différents et des méthodes d'analyse vibrationnelle qui détectent et diagnostiquent divers défauts et leurs causes. En général, elles peuvent être divisées en deux parties [7].

### **II.10.1 Méthodes temporelles**

Les méthodes temporelles sont basées sur l'analyse statistique des signaux collectés, elles conviennent aux machines simples, y compris les mesures de vitesse dans la gamme des basses fréquences et les mesures d'accélération dans la gamme des hautes fréquences. L'objectif est de minimiser les effets des vibrations causées par la rotation de l'arbre.

Dans cette méthode, nous nous intéressons à l'étude de l'évolution des indicateurs RMS et facteur de Crête dans les deux directions (axiale et radiale) en fonction de la vitesse de rotation.

### **II.10.2 Méthodes fréquentielles**

Les méthodes fréquentielles sont basées sur la transformée de Fourier. La connaissance des fréquences caractéristiques permet d'identifier et de localiser les défauts issus des composants mécaniques en analysant leur spectre. Elles sont souvent utilisées pour les machines complexes comportant beaucoup de composants mécaniques [7].

## **II.11 Détermination des seuils**

Les mesures vibratoires sont relatives. En fait, cela n'a pas de sens si c'est isolé. Celle-ci n'est que le résultat des efforts fournis par les différents éléments de la machine, pondérés par la fonction de transfert de la liaison (roulements, nappes d'huile, nappes d'air, boulons, supports élastiques, ressorts, etc.). Par conséquent, nous devons définir comment nous pouvons déterminer les seuils "d'avertissement" et "d'arrêt" susceptibles de réussir. Le seuil d'avertissement est également appelé niveau d'alarme.

### **II.11.1 Méthode du relevé global**

Cette méthode consiste à obtenir des mesures globales de machine lorsqu'elle est pleinement fonctionnelle (rendement, consommations, disponibilité, ...). Cet état est appelé «de référence». Dans la pratique, le seuil d'alarme est généralement fixé à 8 dB (rapport 2,5) au-dessus du niveau de référence.

De même, le seuil d'arrêt est généralement réglé à 8 dB (rapport 2,5) au-dessus du niveau d'alarme.

Cette méthode peut être utilisée lorsque le défaut surveillé produit de très fortes vibrations.

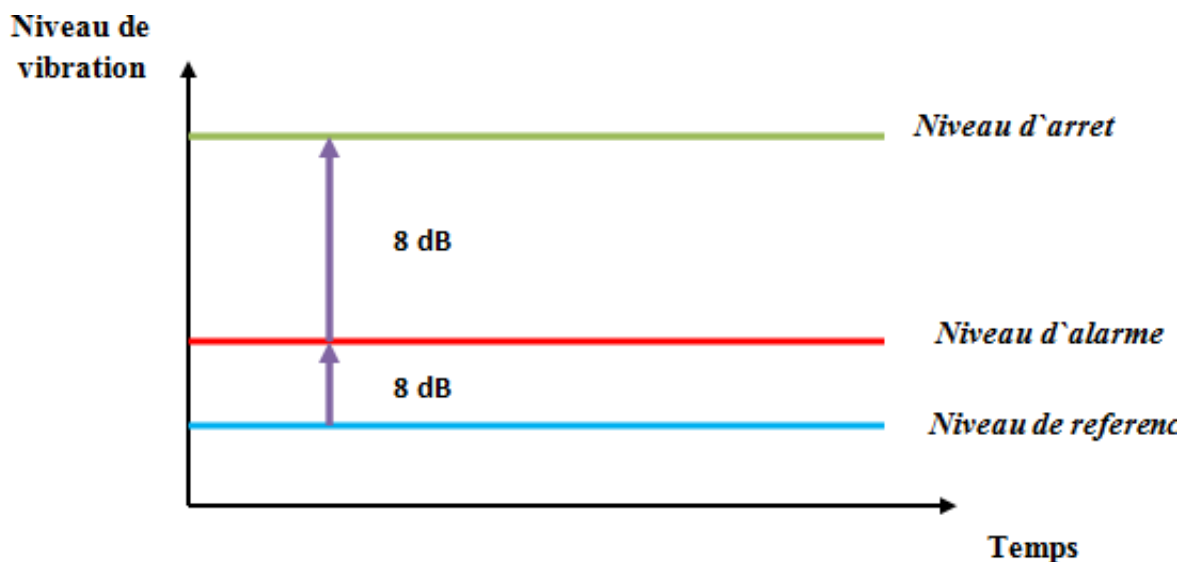


Figure II. 11 -Détermination des seuils par la méthode du relevé global [8]

### II.11.2 Méthode de l'analyse spectrale

Cette méthode met en œuvre un analyseur en lieu et place d'un vibromètre. Les seuils d'alarme et d'arrêt sont déterminés selon la même méthode que précédemment, sur le spectre au lieu de la mesure globale.

Cette méthode est recommandée lorsque le défaut surveillé produit de très faibles niveaux de vibration, comme les défauts d'engrènement ou de roulement.

### II.11.3 Seuils de jugement

La norme propose pour chacun des quatre premiers groupes des seuils de jugement qui déterminent les domaines suivants:

- Bon.
- Admissible.
- Encore admissible.
- Inadmissible.

Ces seuils ne sont que des suggestions basées sur des statistiques regroupant un grand nombre des machines des types très différents. Il est de la responsabilité de l'utilisateur d'ajuster ces seuils machine par machine en fonction de l'historique.

Ces seuils peuvent donc être modifiés à la baisse ou à la hausse (Tableau II.2).

Tableau II. 1- Normes AFNOR E90-300 ou ISO 2372 [8]

28.0 18.0 11.2 7.10 4.50 2.80 1.12 0.71 0.45 0.28	Inadmissible	Inadmissible	Inadmissible	Inadmissible			
			Encore admissible	Encore admissible			
		Encore admissible	Encore admissible	Admissible			
	Encore admissible	Admissible	Admissible	Admissible	Admissible		
						Admissible	Admissible
	Admissible	Bon	Bon	Bon	Bon		
						Bon	Bon
						Bon	Bon
	Intensité Vibratoire $V_{eff} [mm/s]$	Groupe K Petites Machines	Groupe M Machine Moyenne	Groupe G Grosses Machine	Groupe T Turbo- Générateurs		

La norme ne propose aucun seuil de jugement pour les machines des groupes V et VI, car ils comprennent les machines alternatives, présentant des comportements très variables en fonction du nombre de cylindres, de l'angle entre ces cylindres et du calage des manetons.

Ces groupes comprennent également des machines à balourd variable ou des machines construites spécialement pour vibrer.

Les seuils de jugement pour les machines des groupes V et VI ne pourront donc être déterminés que par le constructeur ou l'utilisateur [8].

## II.12 Dommages causés par des vibrations excessives

Des vibrations excessives accélèrent l'usure de l'équipement, provoquent des dommages et peuvent provoquer des pannes, elles doivent être évitées et supprimées dès qu'elles sont détectées.

On peut citer les principaux défauts et leurs fréquences correspondent dans le tableau suivant:

Tableau II. 2- Principes défauts et leurs fréquences correspondent [8]

Anomalies	Vibration		Remarque
	Fréquence	Direction	
Tourbillon d'huile	De 0.42 à 0.48 FR	Radiale	Uniquement sur palier lisse hydrodynamique à grande vitesse.
Balourd	1 * FR	Radiale	Intensité proportionnelle à la vitesse de rotation. Déphasage de 90° sur deux Mesures orthogonales.
Défaut de fixation	1, 2, 3, 4 * FR	Radiale	Aucun déphasage sur deux Mesures orthogonales.
Défaut D'alignement	2 * FR	Axiale et Radiale	Vibration axiale plus Importante le défaut d'alignement comporte un écart angulaire.
Vitesse critique de Rotation	Fréquence critique du rotor	Radiale	Apparaît en régime Transitoire s'atténue ensuite.
Excitation Hydrodynamique	Fréquence de Passage des Aubes	Axiale et Radiale	
Détérioration de Roulement	Haute fréquence	Axiale et Radiale	Ondes de chocs dues aux écaillages.

### **II.13 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons introduit une méthode d'analyse vibratoire qui permet d'éclairer les nombreuses pannes qui provoquent la défaillance des machines tournantes.

Le but de cette méthode est d'éviter les arrêts non planifiés et de prolonger la durée de vie des équipements, d'assurer un contrôle de qualité. Cela nous permet d'établir des procédures de maintenance efficaces.

## **III-Capteurs des vibrations**

### **III.1 Introduction**

Les nouvelles exigences imposées aux systèmes industriels dans leur fonctionnement et dans la qualité de leur production, nécessitent une stratégie très élaborée dans la maîtrise de ces installations.

Toute la difficulté est de posséder des informations pertinentes et fiables qui permettent de générer une action correctrice efficace. Les capteurs sont ces pourvoyeurs d'information. Le développement des capacités de traitement de l'information permet le contrôle et l'automatisation de systèmes de plus en plus complexes. La surveillance des machines doit en premier lieu assurer leur protection. C'est la raison pour laquelle, un grand nombre des machines sont équipées des capteurs.

### **III.2 Détecteur de vibration**

#### **III.2.1 Définition**

Le détecteur permet de commander un appareil sur présence d'une détection d'un choc mécanique.

On peut classer les détecteurs en quatre grandes familles :

- Interrupteurs de position. (Détection par contact physique avec l'objet).
- Détecteurs de proximité inductifs. (Détection à faible distance d'objets ou de pièces métalliques).
- Détecteurs de proximité capacitifs. (Détection à faible distance d'objets, des pièces isolantes ou métalliques).
- Détecteur photoélectriques.

#### **III.2.2 Détecteurs mécaniques**

Les détecteurs mécaniques de position, appelés aussi interrupteurs de position, sont surtout employés dans les systèmes automatisés pour assurer la fonction détecter les positions. On parle aussi de détecteurs de présence.

Ils sont réalisés à base de microcontacts placés dans un corps de protection et muni d'un système de commande ou tête de commande.

C'est un commutateur, commandé par le déplacement d'un organe de commande (corps d'épreuve).

Lorsque le corps d'épreuve est actionné, il ouvre ou ferme un contact électrique.

De nombreux modèles peuvent être associés au corps : tête à mouvement rectiligne, angulaire ou multi direction associée à différents dispositifs d'attaque (à poussoir, à levier, à tige).



Figure III. 1-Détecteur de position

### III.2.3 Détecteurs inductifs

Les détecteurs de proximité inductifs permettent de détecter sans contact des objets métalliques à une distance de 0 à 60 mm.

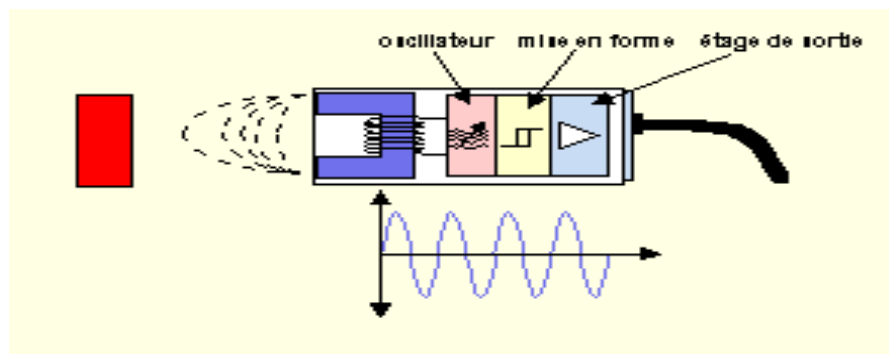


Figure III. 2-Détecteur de proximité

Ils se retrouvent dans des applications très variées telles que la détection de position des pièces de machines (comes, butées, ...), le comptage de présence d'objets métalliques.



Un détecteur inductif détecte exclusivement les objets métalliques.

Il est essentiellement composé d'un oscillateur dont les bobinages constituent la face sensible.

Les capteurs inductifs produisent à l'extrémité de leur tête de détection un champ magnétique oscillant. Ce champ est généré par une inductance et un condensateur montés en parallèle.

Lorsqu'un corps conducteur métallique est placé dans ce champ, des courants de Foucault prennent naissance dans la masse du métal ; il y a perturbation de ce champ qui entraîne une réduction de l'amplitude des oscillations au fur et à mesure de l'approche de l'objet métallique, jusqu'à blocage complet.

Cette variation est exploitée par un amplificateur qui délivre un signal de sortie, le capteur commute.

➤ **Avantages**

- Pas de contact physique avec l'objet détecté : possibilité de détecter des objets fragiles, fraîchement peints.
- Pas d'usure, durée de vie indépendante du nombre de manœuvres.
- Détecteur statique, pas de pièces en mouvement.
- Produit entièrement encapsulé dans la résine (étanche).
- Très bonne tenue à l'environnement industriel (atmosphère polluante).

### **III.2.4 Détecteurs capacitifs**

Cette technologie permet la détection de tous les types de matériaux conducteurs et isolants tels que verre, huile, bois, plastique, etc.

➤ **Principe de fonctionnement**

Les détecteurs de proximité capacitifs sont conçus pour fonctionner par création d'un champ électrostatique et par détection des modifications de ce champ créées par une cible approchant de la face de détection.

Ce type de détecteur est recommandé quand :

- Les distances de détection sont relativement faibles.
- Les conditions de montage nécessitent la noyabilité du détecteur.

On doit effectuer la détection d'un matériau non conducteur à travers une paroi elle-même non conductrice (exemple : détection de verre à travers un emballage en carton).

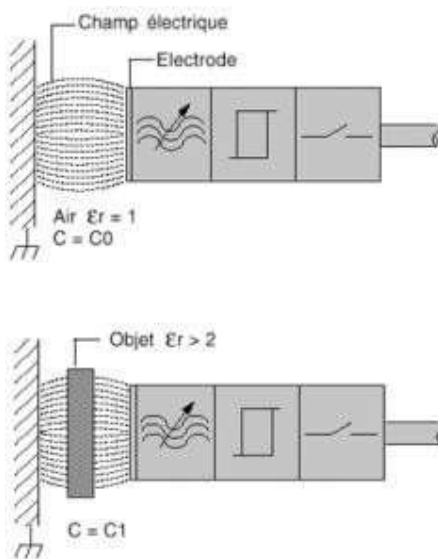


Figure III. 3-Détecteur de proximité capacitive

#### ➤ Avantages

- Pas de contact physique avec l'objet détecté : possibilité de détecter des objets fragiles, fraîchement peints.
- Pas d'usure, durée de vie indépendante du nombre de manœuvres.
- Détecteur statique, pas de pièces en mouvement.
- Produit entièrement encapsulé dans la résine (étanche).
- Très bonne tenue à l'environnement industriel (atmosphère polluante).

### III.2.5 Détecteur de proximité à ultrasons

Son principe de fonctionnement repose comme son nom l'indique sur l'utilisation des ultrasons.

L'ultrason est une onde acoustique dont la fréquence est trop élevée pour être audible par l'être humain. Il peut dans certaines applications remplacer avantageusement le capteur inductif ou capacitif et il peut détecter des objets jusqu'à plusieurs mètres.

#### a. Types du capteur ultrasonique

- Détection de présence ou de non présence d'objets (tout-ou-rien).

- Evaluation de la distance séparant l'objet du détecteur (système analogique souvent sortie 4 - 20 mA).
- Evaluation de la distance séparant l'objet du détecteur (système analogique - numérique sortie sur 8 bits). Permet le traitement par automates programmables et P.C.

### III.2.6 Détecteurs photoélectriques

Ces détecteurs utilisent un faisceau de lumière pour détecter les objets. Ils sont constitués d'un émetteur (E) de lumière infrarouge (IR) et d'un récepteur (R) sensible à la lumière IR.

#### a. Avantages

- Pas de contact physique avec l'objet détecté.
- Détection d'objets de toutes formes et de matériaux de toutes natures.
- Détection à très grande distance.
- Sortie statique pour la rapidité de réponse ou sortie à relais pour la commutation de charges jusqu'à 2 A.
- Généralement en lumière infrarouge invisible, indépendante des conditions d'environnement.

#### b. Détections

- Tout objet.
- Dépend de l'opacité et de la réflexion de l'objet.

#### c. Portée de détection

- Jusqu'à plusieurs mètres.
- Dépend du système employé.

## III.3 Capteurs des vibrations

### III.3.1 Définition d'un capteur

Un capteur est un organe de prélèvement d'information qui élabore à partir d'une grandeur physique, une autre grandeur physique de nature différente (très souvent électrique). Cette grandeur représentative de la grandeur prélevée est utilisable à des fins de mesure ou de commande.

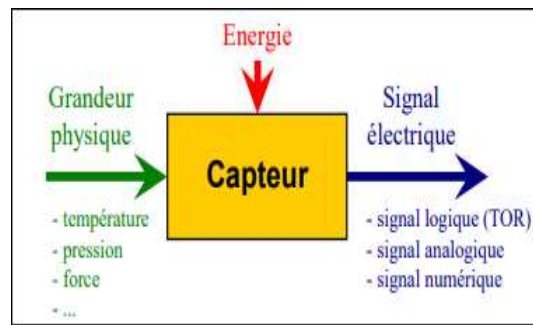


Figure III. 4-Schéma d'acquérir l'information

### III.3.2 Paramètre des capteurs

Il existe un certain nombre de paramètres électriques communs à tous les capteurs tels que :

- **Précision** : qui est caractérisée par l'incertitude absolue obtenue sur la grandeur électrique en sortie du capteur.
- **L'étendue de mesure** : qui définit la plage de fonctionnement du capteur pour la grandeur à mesurer.
- **Linéarité** : qui permet de savoir si le capteur présente la même sensibilité sur toute l'étendue de sa plage d'emploi.
- **Fidélité** : Un capteur est dit fidèle si le signal qu'il délivre ne varie pas pour une série de mesures concernant la même valeur de la grandeur d'entrée.

### III.4 Caractéristiques d'une chaîne de mesure informatisée

La structure de base d'une chaîne de mesure comprend au minimum quatre étages :

- Un capteur sensible aux variations d'une grandeur physique et qui, à partir de ces variations, délivre un signal électrique.
- Un conditionneur de signal dont le rôle principal est l'amplification du signal délivré par le capteur pour lui donner un niveau compatible avec l'unité de numérisation; cet étage peut parfois intégrer un filtre qui réduit les perturbations présentes sur le signal.
- Une unité de numérisation qui va échantillonner le signal à intervalles réguliers et affecter un nombre (image de la tension) à chaque point d'échantillonnage.

- L'unité de traitement informatique peut exploiter les mesures qui sont maintenant une suite de nombres (enregistrement, affichage de courbes, traitements Mathématiques, transmissions des données ...).

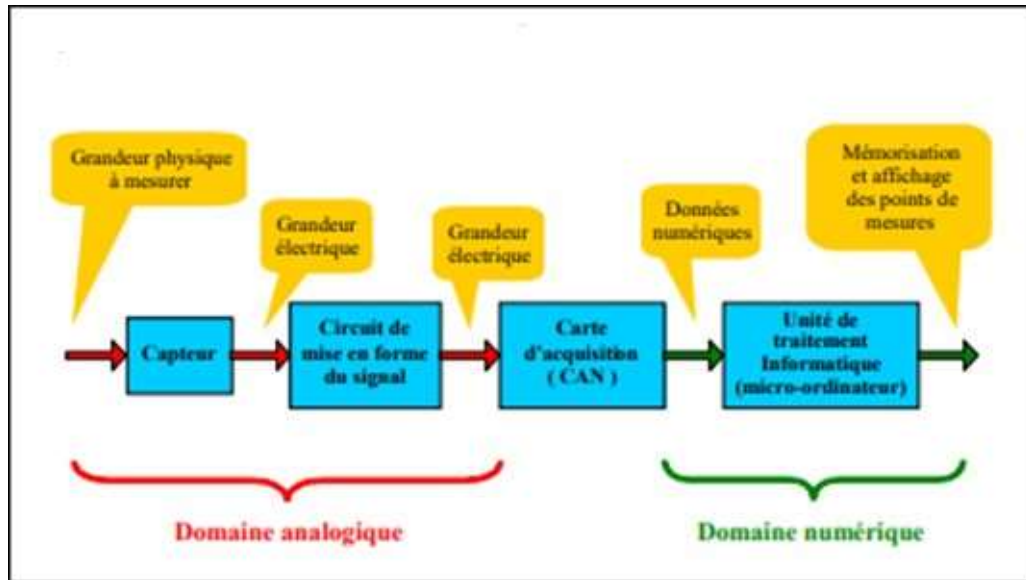


Figure III. 5-Chaine de mesure

De nos jours, compte tenu des possibilités offertes par l'électronique et l'informatique, les capteurs délivrent un signal électrique et la quasi-totalité des chaînes de mesure sont des chaînes électroniques et informatiques.

### III.5 Classification des capteurs

Suivant la nature du signal exploitable les capteurs se classent en trois catégories :

#### a. Capteurs analogiques

Le signal délivré est la traduction exacte de la loi de variation de la grandeur physique mesurée.

#### b. Capteurs logiques

Le signal ne présente que deux niveaux, ou deux états, qui s'affichent par rapport au franchissement de deux valeurs; ces capteurs du type tout ou rien sont également désignés par détecteurs.

#### c. Capteurs numérique

Le signal est codé au sein même du capteur par une électronique associée; ces capteurs sont

également désignés par codeurs et compteurs.

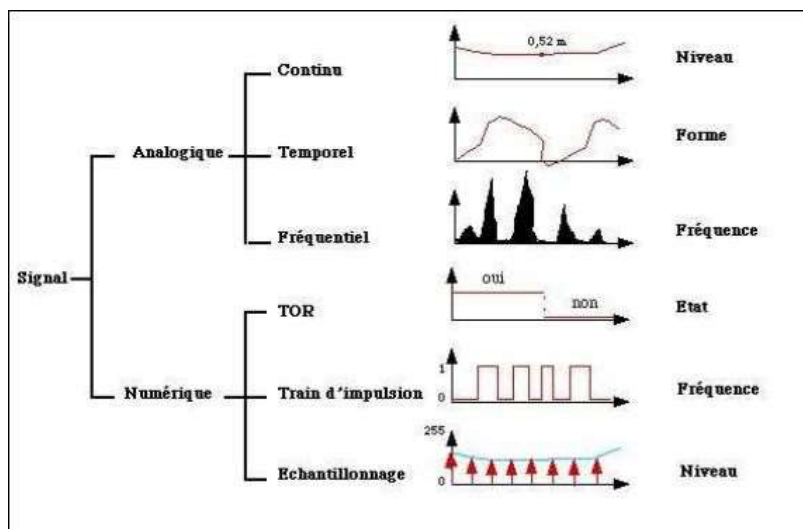


Figure III. 6-Classification des signaux

Un signal est dit analogique si l'amplitude de la grandeur physique le représentant peut prendre une infinité de valeurs dans un intervalle donné.

- **Signal continu** : C'est un signal qui varie 'lentement' dans le temps : température, débit, niveau.
- **Forme** : C'est la forme de ce signal qui est importante : pression cardiaque, chromatographie, impact.
- **Fréquentiel** : C'est le spectre fréquentiel qui transporte l'information désirée : analyse vocale, sonar, spectrographie. Un signal est dit numérique si l'amplitude de la grandeur physique le représentant ne peut prendre qu'un nombre fini de valeurs. En général ce nombre fini de valeurs est une puissance de 2.
- **Tout ou rien (TOR)** : Il informe sur l'état bivalent d'un système. Exemple : une vanne ouverte ou fermée.
- **Train d'impulsion** : Chaque impulsion est l'image d'un changement d'état. Exemple : un codeur incrémental donne un nombre fini et connu d'impulsion par tour.
- **Echantillonnage** : C'est l'image numérique d'un signal analogique. Exemple : température, débit, niveau, son (pression)...

### III.6 Types des capteurs

On classe les capteurs en deux grandes familles en fonction de la caractéristique électrique de la grandeur de sortie. Cette classification influe sur le conditionneur qui lui est associé [2].

#### a. Capteurs passifs

Il s'agit généralement d'impédances (résistance, inductance, capacité) dont l'un des paramètres déterminant est sensible à la grandeur mesurée.

- D'une variation de dimension du capteur (capteur de position, potentiomètre, inductance à noyaux mobile, condensateur à armature mobile)
- D'une déformation résultante d'une force ou d'une grandeur s'y ramenant (pression, accélération).

**Exemples** : armature de condensateur soumise à une différence de pression, jauge d'extensomètre liée à une structure déformable.

Le tableau ci-dessous résume, les effets utilisés pour réaliser la mesure en fonction de la grandeur de mesure

**Tableau III. 1-** Type de matériau utilisé et caractéristique électrique des capteurs passifs

Grandeur mesurée	Caractéristique électrique sensible	Type des matériaux utilisés
Température	Résistivité électrique	Platine, nickel, cuivre...
Rayonnement optique	Résistivité électrique	Semi-conducteur
Déformation	Perméabilité électrique	Alliage de Ni, Si dopé
	Résistivité électrique	Alliage ferromagnétique
Position	Résistivité électrique	Matériaux magnéto résistants
humidité	Résistivité électrique	Chlorure de lithium

#### ➤ Exemples de capteurs

- Capteurs à élément mobile (potentiomètre).
- Capteurs à élément déformable (corps d'épreuve).

- Résistivité électrique  $\rho$ .
- Perméabilité magnétique  $\mu$ .
- Constante diélectrique  $\epsilon$ .

### b. Capteurs actifs

Fonctionnant en générateur, un capteur actif est généralement fondé dans son principe sur un effet physique qui assure la conversion en énergie électrique de la forme d'énergie propre à la grandeur physique à mesurer (énergie thermique, mécanique ou de rayonnement). Les principes physiques mis en jeu sont présentés ci-dessous :

**Tableau III. 2:** Grandeurs d'entrée et de sortie et effet utilisé pour les capteurs actifs

Grandeur de mesure	Effet utilisé	Grandeur de sortie
Température	Thermoélectricité (thermocouple)	Tension
Flux optique	Photoémission Pyroélectricité	Courant Charge
Force, pression, accélération	Piézoélectrique	Charge
Position	Effet hall	Tension
Vitesse	Induction	Tension

On présente ci-dessous une explication succincte de la plupart des effets utilisés par les capteurs actifs :

- **Effet Hall** : un semi-conducteur de type parallélépipède rectangle, placé dans une induction  $B$  et parcouru par un courant  $I$ , voit l'apparition, dans la direction perpendiculaire au courant et à l'induction, d'une différence de potentiel qui a pour expression :

$$V = K_h \cdot I \cdot B \cdot \sin \theta$$

$K_h$ : dépend du matériau et des dimensions du semi – conducteur

$\theta$ : angle entre  $I$  et  $B$

$B$  : intensité de champ magnétique (T)

$I$  : intensité de la source de courant



- **Effet photo-électrique**

La libération de charges électriques dans la matière sous l'influence d'un rayonnement lumineux ou plus généralement d'une onde électromagnétique.

**Exemple** : Mesure de lumière (capteur CCD, photodiode)

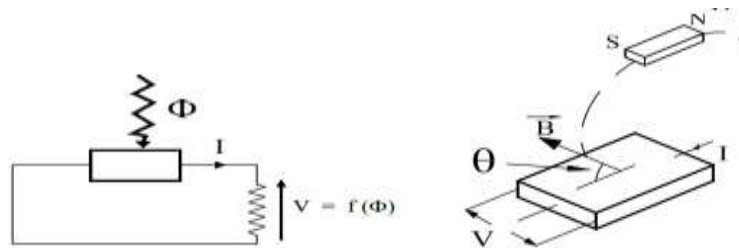


Figure III. 7-Photoélectricité et effet hall

- **Effet d'induction électromagnétique**

La variation du flux d'induction magnétique dans un circuit électrique induit une tension électrique (détection de passage d'un objet métallique).

- **Effet thermoélectrique**

Un circuit formé de deux conducteurs de nature chimique différente, dont les jonctions sont à des températures  $T_1$  et  $T_2$ , est le siège d'une force électromotrice d'origine thermique ( $T_1$ ,  $T_2$ ).

- **Effet piézo-électrique**

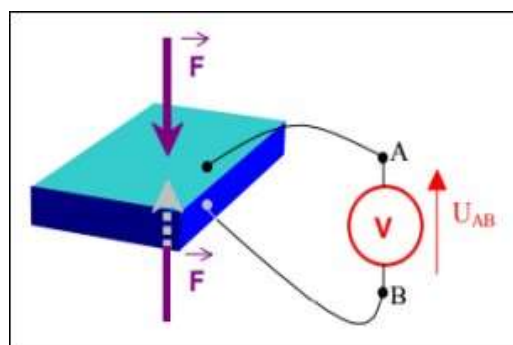


Figure III. 8- Effet piézoélectrique

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

- **Effet photovoltaïque**

Des électrons et des trous sont libérés au voisinage d'une jonction PN illuminée, leur déplacement modifie la tension à ses bornes.

### III.7 Choix de l'emplacement des capteurs

- Le placement des capteurs doit 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.
- 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 à 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.

### III.8 Capteur de déplacement

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



Figure III. 9-Capteur proximètre

Le capteur de déplacement est utilisé pour toutes les applications ou la surveillance des jeux entre les arbres et les paliers installés sur la plupart des turbines hydroélectrique et des turbomachines.

A partir des connaissances des jeux radiaux réels d'un palier ou des jeux axiaux rotor-stator, il est beaucoup plus facile de déterminer des seuils d'alertes et de danger en termes de déplacement qu'en termes de vitesse ou accélération.

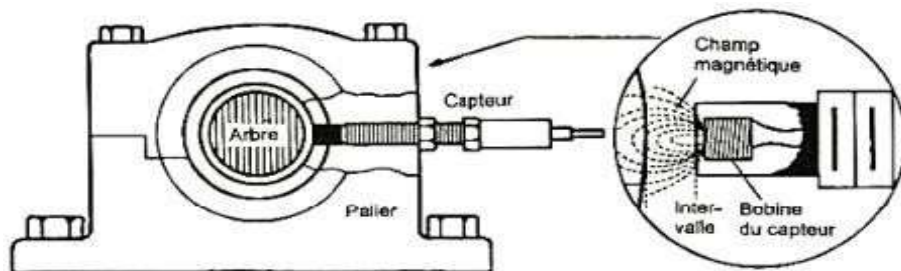


Figure III.10-Schéma de capteur proximètre [9]

### III.8.1 Fonctionnement d'un capteur de déplacement

Les capteurs de déplacement permettent d'obtenir des informations fiables sur la position et le mouvement d'éléments dans un espace de référence, il permet de contrôler le déplacement

et la position d'éléments dans un espace donné et aussi d'automatiser de nombreuses machines et des lignes de production.

### III.8.2 Domaines d'applications

Un capteur de déplacement est employé dans des nombreux domaines de l'industrie

- L'industrie automobile,
- L'industrie du sport automobile,
- Les machines-outils numériques,
- La robotique, l'aérospatiale et la défense,
- Automatisation industrielle,
- L'industrie médicale et pharmaceutique,

#### a. Avantages

- Mesure directement les mouvements d'arbres.
- Même capteur pour les butées axiales, les vibrations radiales et la vitesse.
- Mesure directement le déplacement.
- Pas de pièce mobile.

#### b. Inconvénient

- Sensible au matériau de l'arbre.
- Installation.
- Gamme de fréquence limitée.
- Pas de détection des défauts de roulements.
- Restriction de températures [10].

### III.9 Vélocimètre

Les capteurs des vitesses, ou vélocimètre, sont constitués d'une sonde à contact dites sonde sismique qui mesure le mouvement absolu de l'organe sur lequel elle est fixé.

Le vélocimètre est un transducteur très courant pour la surveillance de la vibration d'une machine tournante. Il est très utilisé à cause de sa simplicité d'installation et son coût faible.

D'après la référence [11], les avantages du vélocimètre sont :

- Il est facile à installer.
- Il délivre un signal important.
- Il ne demande pas de l'alimentation extérieure.

Les inconvénients sont [11]:

- Son dimensionnement est relativement large et son poids lourd.
- Il est très sensible aux fréquences d'entrée.
- La fréquence de réponse est très étroite.
- Il est très sensible aux champs magnétiques.

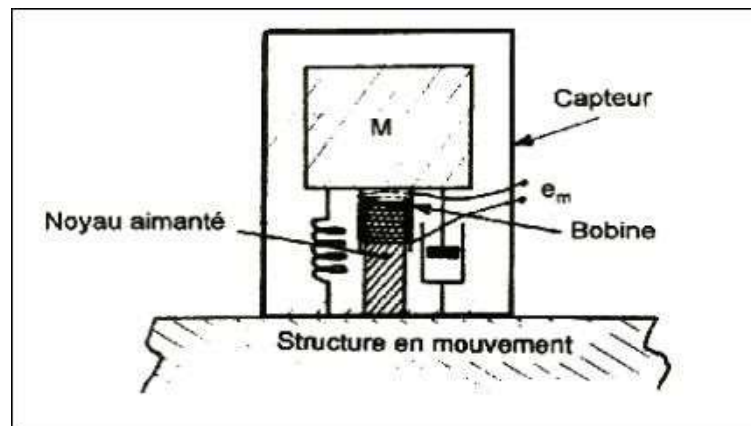


Figure III. 11-Schéma de principe d'un vélocimètre

### III.10 Accéléromètres

Un accéléromètre piézoélectrique est composé d'un disque en matériau piézoélectrique (quartz), qui joue le rôle d'un ressort sur lequel repose une masse sismique précontrainte.

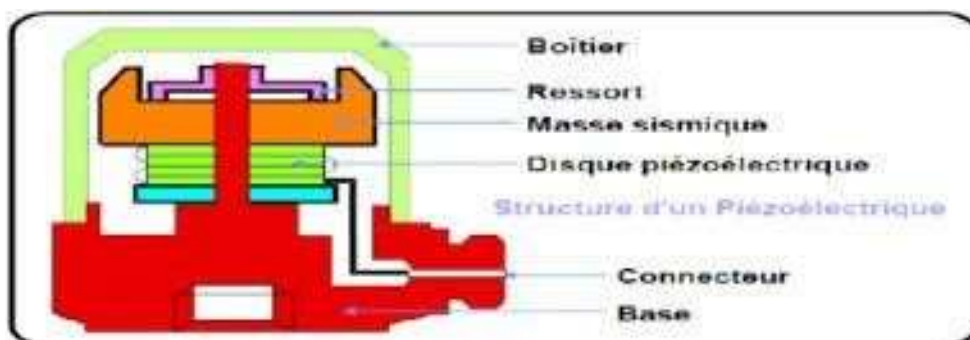


Figure III. 12-Schéma de principe d'un accéléromètre [9]

Les accéléromètres piézoélectriques tendent à devenir les capteurs de vibration absolue les plus utilisés pour la surveillance. Ils possèdent les propriétés suivantes :

- Utilisables sur de très grandes gammes fréquentielles.
- Excellente linéarité sur une très grande gamme dynamique (typiquement 140 dB).
- Le signal d'accélération peut être intégré électroniquement pour donner le déplacement et la vitesse.
- Aucun élément mobile, donc extrêmement durable. [9]

#### a. Avantages

- Facile à installer.
- Petit, léger.
- Supporte les hautes températures.
- Pas de pièce mobile.

#### b. Inconvénients

- Nécessite une double intégration pour le déplacement.
- Nécessite une source extérieure.
- Fournit des informations limitées sur la dynamique d'arbre.
- Médiocre pour les faibles vitesses.

### III.11 Chaîne d'acquisition

Une chaîne d'acquisition des vibrations comprend les étages suivants :

#### ➤ Capteur :

Transforme la vibration mécanique en un signal électrique. La grandeur électrique délivrée peut être :

- Une tension comme dans le cas d'un accéléromètre à électronique ou d'un vélocimètre. La sensibilité du capteur s'exprime alors en millivolts par unité physique.
- Une charge électrique comme dans le cas d'un accéléromètre piézoélectrique dont la sensibilité s'exprime en pico-coulomb par g ou  $m/s^2$  (mètres par seconde carré).

#### ➤ Préamplificateur :

Son rôle est de conditionner le signal de sortie du capteur pour le rendre exploitable et transportable. Indispensable pour les accéléromètres piézoélectrique, le préamplificateur peut être ou non incorporé au capteur et il permet soit une simple amplification de la tension de sortie du capteur (amplificateur de tension), soit une transformation de la charge électrique en tension avant son amplification (convertisseur charge-tension improprement appelé préamplificateur de charge).

Limiter la plage de fréquences du signal : c'est le rôle des filtres passe-haut, passe-bas, ou passe-bande, à fréquences de coupure fixes ou réglables par l'utilisateur. Cette opération permet de réduire l'influence des composantes hautes ou basses fréquences du signal jugées indésirables, de concentrer l'analyse du signal dans une plage de fréquences définies ou d'effectuer des mesures selon les spécifications d'une norme.

Amplifier de nouveau le signal obtenu : cette amplification permet d'adapter la gamme dynamique d'entrée du convertisseur pour avoir la meilleure qualité de signal.

➤ **Convertisseur analogique/numérique (CAN) :**

C'est le rôle du qui transforme le signal analogique en données numériques avant de les transmettre :

- A une unité de mesure de grandeurs scalaires (amplitudes crête).
- A un collecteur de données informatisées ou à analyseur.
- A une éventuelle unité de conservation du signal temporel ou pour traitement Différé des signaux.

### III.12 Conclusion

Il n'est pas rare, dans l'industrie, de rencontrer des procédés ayant des dizaines de points de mesure. L'exploitant s'en remet aux informations données par les capteurs pour suivre l'évolution de son procédé. A mesure que les capteurs se multiplient, ils doivent être plus fiables, la confiance dans l'information émise doit être de plus en plus grande.

La technicité des capteurs fait appel à de multiples domaines de la connaissance scientifique et technique : mécanique, électronique, informatique, métrologie... . Le constructeur doit en permanence suivre l'évolution des techniques et améliorer les performances de ses capteurs, mettre au point de nouveaux appareils.

Dans le prochain chapitre, nous nous intéressons au capteur inductif.

## IV-Modélisation électromagnétique et simulation

### IV.1 Introduction

La première partie de ce chapitre est consacré à l'élaboration du modèle électromagnétique, la seconde partie est réservée à l'implantation du modèle mathématique sur MATLAB.

### IV.2 Equations de Maxwell [13]

Les équations qui permettent l'étude des phénomènes électromagnétiques sont les équations de Maxwell. Elles s'expriment sous la forme suivante :

$$\begin{cases}
 \text{rot } \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} & \text{(a)} & \text{Equation de Maxwell Ampère} \\
 \text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} & \text{(b)} & \text{Equation de Maxwell Faraday} \\
 \text{div } \vec{E} = \rho & \text{(c)} & \text{Equation de Maxwell Gauss} \\
 \text{div } \vec{B} = 0 & \text{(d)} & \text{Equation du flux magnétique}
 \end{cases} \quad \text{(IV.1)}$$

$\vec{E}$  [V/m] et  $\vec{H}$  [A/m] : Champs électrique et magnétique.

$\vec{B}$  [T] et  $\vec{D}$  [A·s/m<sup>2</sup>] : Inductions magnétique et électrique.

$\vec{J}$  [A/m<sup>2</sup>] : Densité volumique de charge.

$\rho$  [C/m<sup>2</sup>] : Densité de courant de conduction.

L'équation (IV.1.a) permet d'établir la relation entre le champ électrique, le champ magnétique et les courants électriques.

L'équation (IV.1.b) correspond à la loi d'induction de Faraday qui établit le lien entre un champ électrique et une induction magnétique. Cette loi traduit le phénomène inductif qui se produit dans un conducteur soumis à un champ magnétique variable ou dans un conducteur en mouvement soumis à un champ constant.

L'équation (IV.1.c) et (IV.1.d) traduisent respectivement la conservation du champ électrique et celle du champ magnétique.



### IV.3 Lois de comportement des milieux

Les champs vectoriels précédents dépendent des caractéristiques électromagnétiques du milieu où ils règnent. De ce fait, pour définir globalement le phénomène, on rajoute aux équations précédentes les lois de comportement du milieu.

#### IV.3.1 Loi d'Ohm

- ◆ Milieu conducteur

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{IV.2})$$

$\sigma$  : La conductivité électrique  $[\Omega \text{ m}]^{-1}$ .

- ◆ Milieu non conducteur

$$\vec{J} = 0 \quad (\text{IV.3})$$

#### IV.3.2 Relation magnétique

- ◆ Milieu magnétique

$$\begin{cases} \vec{B} = \mu \vec{H} \\ \mu = \mu_0 \mu_r \end{cases} \quad (\text{IV.4})$$

Avec :

$$\mu_0 = 4 \pi 10^{-7}$$

$\mu_0$  : Perméabilité magnétique du vide.

- ◆ Milieu amagnétique  $\mu_r = 1$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (\text{IV.5})$$

#### IV.3.3 Relation diélectrique

$$\begin{cases} \vec{D} = \varepsilon \vec{E} \\ \varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \end{cases} \quad (\text{IV.6})$$

$\varepsilon_0 = 1/36 \pi 10^9$  Permittivité électrique du vide.

$\varepsilon_r$  : Permittivité électrique relative du milieu.

#### IV.4 Hypothèses simplificatrices

En raison de la complexité des équations de Maxwell, des hypothèses simplificatrices sont nécessaires pour faciliter leur résolution. Dans notre cas, des simplifications sont établies pour les matériaux conducteurs, homogènes et isotropes.

Dans le cas d'une excitation sinusoïdale l'équation (IV.1.a) s'écrit comme suit :

$$\vec{\text{rot}} \vec{H} = \vec{J} + j\omega\varepsilon\vec{E} \Rightarrow \vec{\text{rot}} \vec{H} = \vec{J} \left( 1 + j \frac{\varepsilon\omega}{\sigma} \right) \quad (\text{IV.7})$$

Pour les matériaux conducteurs le rapport  $\varepsilon/\sigma$  est très faible. En Electrotechnique la fréquence maximale utilisée est de 1MHz. Dans ces conditions, le courant de déplacement est négligeable devant le courant de conduction. D'autre part, pour un matériau conducteur, la densité de charges statiques  $\rho$  est nulle.

Sous ces hypothèses, les équations de Maxwell (IV.1.a) et (IV.1.c) peuvent se reformuler comme suit :

$$\begin{cases} \vec{\text{rot}} \vec{H} = \vec{J} & (a) \\ \text{div} \vec{E} = 0 & (b) \end{cases} \quad (\text{IV.8})$$

#### IV.5 Formulation électromagnétique

Les approximations précédentes ont pour rôle de réduire les phénomènes électromagnétiques à un phénomène d'induction. Mais ces équations restent toujours inabordables puisqu'elles comportent six inconnues (trois composantes pour chacun des champs). Pour pallier à un tel problème, on effectue un choix judicieux de la variable d'état selon la géométrie du phénomène étudié.

A partir de l'équation (IV.1.d), on définit le potentiel vecteur magnétique  $\vec{A}$  par l'équation suivante :

$$\vec{B} = \vec{\text{rot}} \vec{A} \quad (\text{IV.9})$$

En combinant l'équation (IV.9) avec les relations (IV.5) et (IV.1.b) nous obtenons :

$$\vec{\text{rot}}(\vec{\text{rot}} \vec{A}) = \mu \vec{J} \quad (\text{IV.10})$$

De l'équation (IV.1.b), on a :

$$\text{rot } \vec{E} = - \frac{\partial(\text{rot } \vec{A})}{\partial t} \Rightarrow \text{rot } \vec{E} = -\text{rot } \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \Rightarrow \text{rot} \left( \vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0$$

Ce résultat nous amène à dire que le vecteur  $\vec{E} + \partial \vec{A} / \partial t$  dérive d'un potentiel scalaire V, et donc on peut écrire :

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\text{grad}V \tag{IV.11}$$

Le rotationnel du gradient de toute fonction est nul et pour assurer l'unicité de la solution, on a recours à la jauge de Coulomb :

$$\text{div}(\vec{A}) = 0 \tag{IV.12}$$

Le système ainsi étudié se ramène à :

$$\begin{cases} \text{rot}(\text{rot } \vec{A}) = \mu \vec{J} & (a) \\ -\sigma \left( \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \text{grad}V \right) = \vec{J} & (b) \end{cases} \tag{IV.13}$$

Où

$\vec{A} [m]$  : Est le potentiel vecteur magnétique

$V [V]$  : Est le potentiel scalaire électrique

**IV.6 Formulation intégrale des équations**

$$\begin{cases} \text{rot}(\text{rot } \vec{A}) = \mu \vec{J} \\ \text{div } \text{grad}A_\theta \end{cases} \tag{IV.14}$$

où  $A = A_\theta e_\theta$

L'équation de diffusion électromagnétique (IV.15), exprimant le potentiel vecteur et la densité de courant d'une manière couplée, est décrite comment suit :

$$\begin{cases} \text{div } \text{grad}A(p, q) = -\mu \vec{J}(q) & (a) \\ \vec{J}(p) = -\sigma(p) \left( \frac{\partial A(p, q)}{\partial t} + \text{grad}V(p) \right) & (b) \end{cases} \tag{IV.15}$$

L'équation de poisson (IV.15.a) traduit que la densité de courant  $\vec{J}(q)$  au point q, est la source du potentiel vecteur  $A(p, q)$  au point p.

L'équation (IV.15.b) définit le phénomène d'induction tel que la densité de courant  $\vec{J}(p)$  est induite sous la variation temporelle du potentiel magnétique  $\vec{A}(p, q)$  et spatial du potentiel électrique  $V(p)$ .

### IV.7 Application dans le cas axisymétrique

#### IV.7.1 Expression du potentiel vecteur magnétique

L'équation (IV.15.a) de Poisson peut être résolue par transformation de Fourier. On aboutit à l'expression de Biot et Savart du potentiel vecteur magnétique.[12]

$$A(p, q) = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint_v \frac{J(q)}{|\vec{op} - \vec{oq}|} dv \tag{IV.16}$$

Ce potentiel est fonction des coordonnées des points « p » où on calcule le potentiel  $A(p)$  et « q » où est située la densité de courant  $J(q)$  source de ce potentiel. Ces deux points peuvent appartenir ou non au même domaine. Le potentiel est calculé au point récepteur  $p(r, z)$ . Celui-ci est créé par une spire de section  $s(q)$ , de contour (c), située au point « q » de coordonnées  $(r(q), z(q))$  et parcourue par une intensité de courant  $J(q) dv$ .

On admet par approximation que le courant est constant dans la section de la spire donc :

$$\begin{cases} J(q) dv = J(q) dl & (a) \\ J(q) = I(q)/S(q) & (b) \end{cases} \tag{IV.17}$$

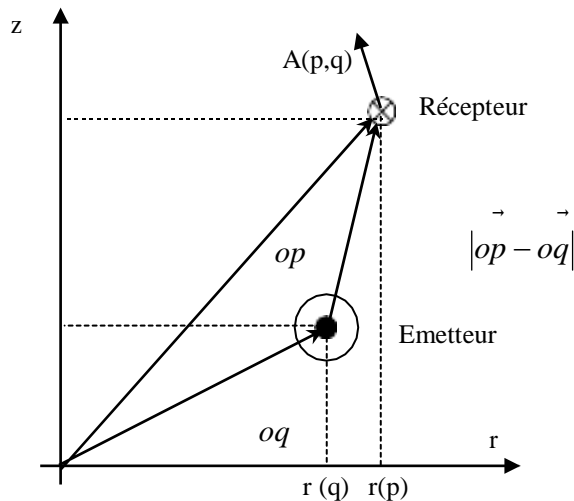


Figure IV.1-Schéma du système en 2D

Le système est à symétrie de révolution. Le potentiel magnétique vecteur  $A(p)$  n'a qu'une composante dirigée suivant  $\theta$ . Le courant circule donc sur un contour (C) de rayon  $r(q)$  et de longueur  $l(q)$  comme le montre la figure (IV.1).[12]

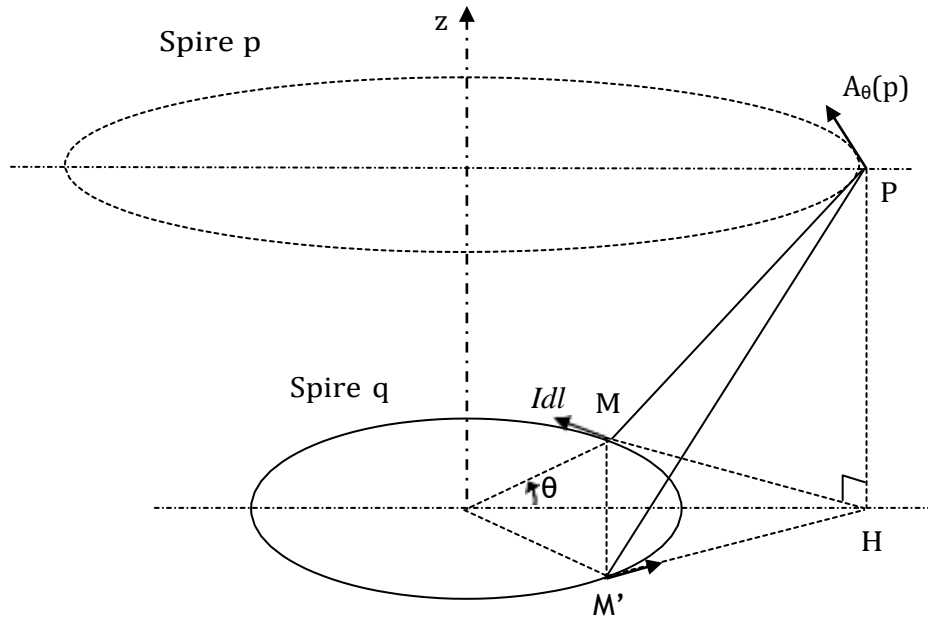


Figure IV.2- Potentiel vecteur magnétique créé par une spire circulaire

$$A(p, q) = \left( \begin{matrix} A_{\theta} \\ p, q \\ e_{\theta} \end{matrix} \right)^{\rightarrow} = \frac{\mu_0}{4\pi} I(q) \int \frac{dl}{|\vec{op} - \vec{oq}|} \quad (IV.18)$$

On exprimant  $dl$  et  $|\vec{op} - \vec{oq}|$  en coordonnées polaires, et on intègre sur un intervalle de  $[0, \pi/2]$ , vu que le système est à symétrie de révolution on aboutit à :

$$A(p, q) = \frac{\mu_0}{4\pi} I(q) \int_0^{\pi/2} \frac{r(p) \cos \theta d\theta}{\sqrt{(\vec{r}(p) - \vec{r}(q))^2 + (\vec{z}(p) - \vec{z}(q))^2}} \quad (IV.19)$$

Sachant que :

$$(\vec{r}(p) - \vec{r}(q))^2 = r(p)^2 + r(q)^2 - 2 r(p) r(q) \cos \theta \quad (IV.20)$$

On pose :

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta = \pi - 2\varphi \Rightarrow d\theta = -2 d\varphi \\ \cos \theta = 2 \sin^2 \varphi - 1 \end{array} \right. \quad (IV.21)$$

Après introduction des expressions (IV.20) et (IV.21) dans l'expression du potentiel (IV.19), on aboutit à :

$$A(p, q) = \frac{\mu_0}{4\pi} I(q) \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{2r(p)(2\sin^2 \varphi - 1) d\varphi}{\sqrt{(r(p)+r(q))^2 + (Z(p)-z(q))^2 - 4r(p)r(q)\sin^2 \varphi}} \quad (\text{IV.22})$$

On pose :

$$K(p, q) = \sqrt{\frac{4r(p)r(q)}{(r(p)+r(q))^2 + (z(p)-z(q))^2}} \quad (\text{IV.23})$$

On aboutit à :

$$A(p, q) = \frac{\mu_0}{2\pi} I(q) K(p, q) \sqrt{\frac{r(q)}{r(p)}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{(2\sin^2 \varphi - 1)}{\sqrt{1 - K^2 \sin^2 \varphi}} d\varphi \quad (\text{IV.24})$$

On note :

$$\frac{K^2 \sin^2 \varphi}{\sqrt{1 - K^2 \sin^2 \varphi}} = \frac{1}{\sqrt{1 - K^2 \sin^2 \varphi}} - \sqrt{1 - K^2 \sin^2 \varphi} \quad (\text{IV.25})$$

L'expression du potentiel (IV.22) devient :

$$A(p, q) = \frac{\mu_0}{2\pi} I(q) \sqrt{\frac{r(q)}{r(p)}} \left( \frac{(2 - K^2)E(K) - 2E_2(K)}{K} \right) \quad (\text{IV.26})$$

Tel que :

$$\begin{cases} E_1(K) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - K^2 \sin^2 \varphi}} \\ E_2(K) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - K^2 \sin^2 \varphi} d\varphi \end{cases} \quad (\text{IV.27})$$

$E_1(K)$  et  $E_2(K)$  sont fonctions des coordonnées des spires émettrices et réceptrices, elles sont appelées respectivement les intégrales elliptiques de Legendre de première et seconde espèce.

En posant :

$$E(K) = \frac{(2 - K^2)E_1(K) - 2E_2(K)}{K} \quad (\text{IV.28})$$

En introduisant :

$$G(K(p,q)) = \sqrt{\frac{r(q)}{r(p)}} E[K(p,q)] \quad (\text{IV.29})$$

Donc l'expression du potentiel magnétique vecteur peut s'écrire :

$$A(p,q) = \frac{\mu_0 I(q) G(K(p,q))}{2\pi} \quad (\text{IV.30})$$

#### IV.7.2 Expression du gradient du potentiel scalaire électrique

Le gradient du potentiel en coordonnées cylindrique s'écrit :

$$\vec{\text{grad}}_p V = \frac{\partial V}{\partial r} \vec{e}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} \vec{e}_\theta \quad (\text{IV.31})$$

Puisque la circulation du courant est angulaire et qu'elle se fait le long du périmètre moyen de la spire alors le gradient du potentiel suivant l'axe radial est nul ( $\partial V / \partial r = 0$ ), ce qui réduit le gradient du potentiel électrique à :

$$\vec{\text{grad}}_p V = \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} \vec{e}_\theta \quad (\text{IV.32})$$

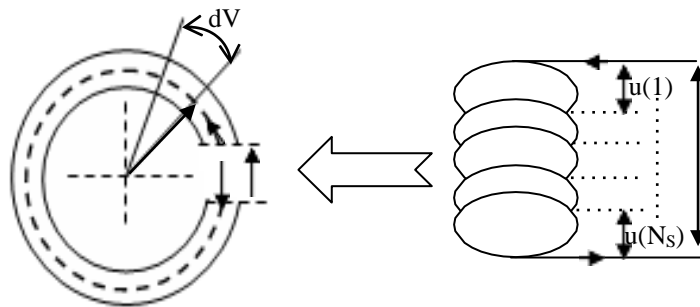


Figure IV.3- Représentation d'une spire élémentaire

Or tout le long du périmètre moyen le courant est le même ce qui nous amène à déduire que le gradient de potentiel est constant. En notant  $u(p)$  la tension appliquée aux bornes du contour, on peut alors écrire :

$$\int_{u(p)}^0 dV(p) = \left( \text{grad}V_p \cdot e_\theta \right) r(p) \int_0^{2\pi} d\theta \Rightarrow u(p) = -2 \int_0^{2\pi} r(p) \text{grad}V_p \cdot e_\theta d\theta \quad (\text{IV.33})$$

$$\text{grad}V(p) = \frac{-u(p)}{2\pi r(p)} \quad (\text{IV.34})$$

Cette dernière, exprime la variation spatiale du potentiel électrique scalaire en fonction de la géométrie et de la tension induite aux bornes de la spire.

#### IV.8 Méthode des circuits électromagnétiques couplés (CEC) [11]

En remplaçant l'expression (IV.30) du potentiel vecteur magnétique ainsi que celle du potentiel scalaire électrique (IV.34) dans l'équation (IV.15.b) nous arrivons à exprimer l'équation électromagnétique élémentaire dans une spire en fonction de la densité de courant et de la tension du point source «  $q$  » et charge «  $p$  ».

$$\frac{2\pi r(p)}{\sigma} J(p) + \mu_0 r(p) G(p, q) \frac{dI(q)}{dt} = u(p) \quad (\text{IV.35})$$

Cette équation exprime la création de la densité de courant  $J(p)$  en un point «  $p$  » sous l'effet de la tension appliquée en ce point  $u(p)$  et d'un potentiel magnétique vecteur créé par l'intensité de courant  $I(q)$  situé au point «  $q$  »

##### IV.8.1 Equation intégrale

Le potentiel  $A(p)$  en un point «  $p$  » est généré par la somme de toutes les densités de courants  $J(q)$ , soit :

$$A(p, q) = \frac{\mu_0}{2\pi} \iint_{\Omega} G(K(p, q)) J(q) d\Omega \quad (\text{IV.36})$$

L'équation (IV.36) décrit l'effet d'un point sur un autre. Pour réaliser la contribution du domaine  $\Omega$  sur le point «  $p$  » nous intégrons toutes les densités de courant  $J(q)$  appartenant à ce domaine. En remplaçant cette dernière équation et celle du potentiel scalaire (IV.34) dans (IV.15.b) on aboutit à :

$$\frac{2\pi r(p)}{\sigma} J(p) + \mu_0 r(p) \iint_{\Omega} G(p, q) \frac{dJ(q)}{dt} d\Omega = u(p) \quad (\text{IV.37})$$



Dans notre cas l'excitation est sinusoïdale donc  $\frac{d}{dt} = j\omega$ , alors l'équation (IV.37) devient :

$$\frac{2\pi r(p)}{\sigma} J(p) + j\mu_0 \omega r(p) \iint_{\Omega} G(p,q) J(q) d\Omega = u(p) \tag{IV.38}$$

Cette équation décrit la réponse d'un conducteur quelconque soumis à une tension électrique extérieure.

Dans le cas des conducteurs massifs où le domaine n'est pas soumis à un potentiel électrique scalaire, l'équation (IV.38) s'écrit :

$$\frac{2\pi J(p)}{\sigma} + j\mu_0 \omega \iint_{\Omega} G(p,q) J(q) d\Omega = 0 \tag{IV.39}$$

### IV.8.2 Equation intégrale générale pour le calcul d'impédance

#### IV.8.2.1 Impédance du capteur à vide

Le capteur est constitué de  $N_s$  spires élémentaires de sections  $S_s$  et de conductivité  $\sigma_s$  comme le montre la figure (IV.4).

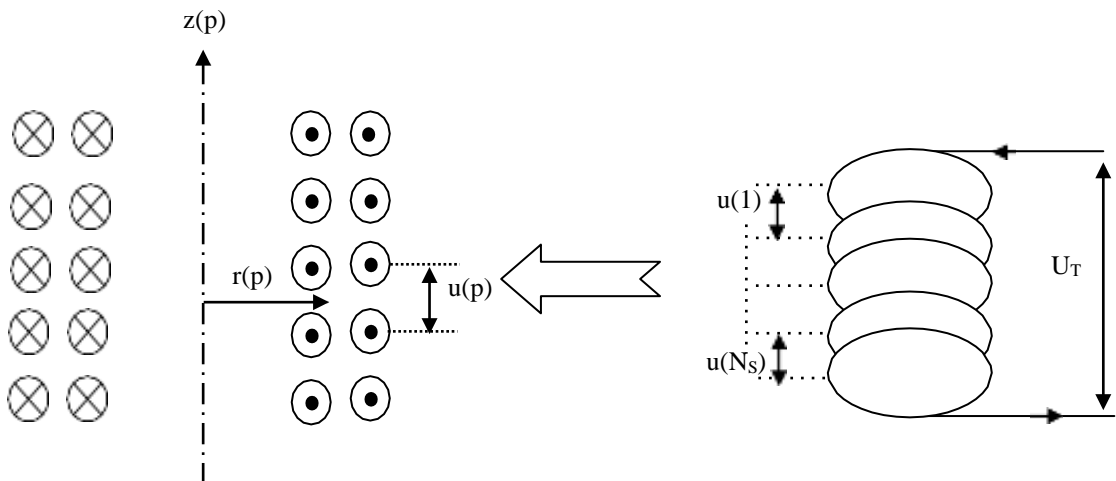


Figure IV.4- Schéma du capteur à vide

L'équation (IV.38) peut se réécrire comme suite :

$$\frac{2\pi r_s(p)}{\sigma_s} J_s(p) + j\mu_0 \omega r_s(p) \iint_{\Omega_s} G_s(p,q) J_s(q) d\Omega_s = u(p) \tag{IV.40}$$

En utilisant l'équation (IV.17.b), on aura

$$\frac{2\pi r_s(p)}{\sigma_s S_s} I_s(p) + j\mu_0 \omega r_s(p) \iint_{\Omega_s} G_{ss}(p,q) J_s(q) d\Omega = u(p) \quad (IV.41)$$

Tel que :

$$G_{ss}(K(p,q)) = \sqrt{\frac{r_s(q)}{r_s(p)}} E(K(p,q)) \quad (IV.42)$$

La discrétisation de l'équation (IV.41), nous permet d'obtenir :

$$\frac{2\pi r_s(p) N_s}{\sigma_s S_s} I_s(p) + j\mu_0 \omega r_s(p) \sum_{q=1}^{N_s} G_{ss}(p,q) I_s(q) = u(p) \quad (IV.43)$$

Cette équation peut se réécrire de la façon suivante :

$$\left( \frac{2\pi r_s(p) N_s}{\sigma_s S_s} + j\mu_0 \omega r_s(p) G_{ss}(p,p) \right) I_s(p) + j\mu_0 \omega r_s(p) \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^{N_s} G_{ss}(p,q) I_s(q) = u(p) \quad (IV.44)$$

Comme les spires du capteur sont en série alors :

$$\begin{cases} U_T = \sum_{p=1}^{N_s} u(p) & (a) \\ I(1) = \dots = I(p) = I(q) = \dots = I(N_s) = I_s & (b) \end{cases} \quad (IV.45)$$

Donc l'équation (IV.44) et (IV.45) nous permettent de trouver :

$$\sum_{p=1}^{N_s} \left( \frac{2\pi r_s(p)}{\sigma_s S_s} + j\mu_0 \omega r_s(p) \sum_{q=1}^{N_s} G_{ss}(p,q) \right) I_s = U_T \quad (IV.46)$$

De l'équation (IV.46) on peut formuler l'expression de l'impédance du capteur à vide:

$$Z_0 = \frac{U_T}{I_s} = \sum_{p=1}^{N_s} \left( \frac{2\pi r_s(p)}{\sigma_s S_s} + j\mu_0 \omega r_s(p) \sum_{q=1}^{N_s} G_{ss}(p,q) \right) \quad (IV.47)$$

En séparant le terme réel et imaginaire de l'équation précédente et en utilisant la définition  $Z_0 = R_0 + j\omega L_0$ , on extrait la résistance  $R_0$  et la réactance  $X_0$

$$\left\{ \begin{array}{l} R_0 = \sum_{p=1}^{N_s} \frac{2\pi r_s(p)}{\sigma_s S_s} \quad (a) \\ X_0 = j\omega\mu_0 \sum_{p=1}^{N_s} r_s(p) \sum_{q=1}^{N_s} G_{ss}(p,q) \quad (b) \end{array} \right. \quad (IV.48)$$

**IV.8.2.2 Modélisation d'un système en charge (capteur-pièce)**

La pièce conductrice est décomposée en « Nc » spires élémentaires, chacun de ces éléments est décrite géométriquement en son centre par un point de coordonnée (rc, zc) et de section « Sc ».

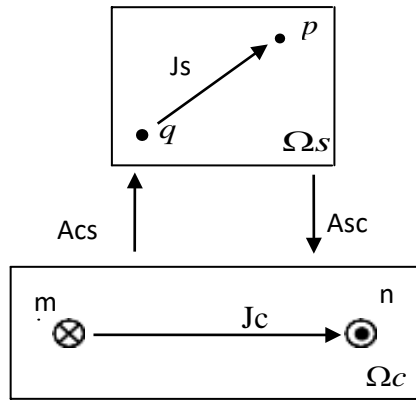


Figure IV.5- Système électromagnétique

Cette configuration géométrique représente un système électromagnétique axisymétrique comportant une source de domaine( $\Omega_s$ ) et une pièce à contrôler de domaine ( $\Omega_c$ ). (p, q) sont deux points qui appartiennent au domaine ( $\Omega_s$ ) et (m, n) décrivent le domaine ( $\Omega_c$ ) (Figure .IV.5).

**IV.8.2.3 Equation intégrale du capteur en présence de la pièce**

La présence des courants de Foucault dans la pièce influent sur les courants d'excitation de la source, pour cela en rajouter l'effet de ces courant dans l'équation (IV.39) on aura :

$$\frac{2\pi r_s(p)}{\sigma_s} J_s(p) + j\mu_0 \omega r_s(p) \iint_{\Omega_s} G_{ss}(p,q) J_s(q) d\Omega_s + j\mu_0 \omega r_s(p) \iint_{\Omega_c} G_{sc}(p,m) J_c(m) d\Omega_c = u(p) \quad (IV.49)$$

Tel que :

$$G_{SC}(K(p, m)) = \frac{r_s(p)}{\sqrt{r_c(m)}} E(K(p, m)) \quad (IV.50)$$

$G_{SC}(K(p, m))$ : est une fonction des coordonnées « p » et « m » appartenant respectivement à la source (capteur) et à la pièce.

La discrétisation de l'équation (IV.49) en circuits couplés est de la forme suivant :

$$\left( \frac{2\pi}{\sigma_s S_s} r_s(p) + j\omega \mu_0 \sum_{q=1}^{N_s} G_{SS}(p, q) r_s(q) \right) I_s + j\omega \mu_0 \sum_{m=1}^{N_c} G_{SC}(p, m) r_s(p) I_c(m) = u(p) \quad (IV.51)$$

L'équation (IV.45.a) reste toujours dans ce cas valable. Alors pour trouver la tension totale appliquée au capteur il suffit de somme sur le domaine de ce dernier l'ensemble des tensions élémentaires c'est-à-dire qu'on aboutit à l'équation :

$$\sum_{p=1}^{N_s} \left( \frac{2\pi}{\sigma_s S_s} r_s(p) + j\omega \mu_0 \sum_{q=1}^{N_s} G_{SS}(p, q) r_s(q) \right) I_s + j\omega \mu_0 \sum_{p=1}^{N_s} r_s(p) \sum_{m=1}^{N_c} G_{SC}(p, m) I_c(m) = U_T \quad (IV.52)$$

#### IV.8.2.4 Equation intégrale dans la pièce à contrôler en présence du capteur

En rajoutant l'effet du capteur sur la pièce, l'équation (IV.39) devient :

$$\frac{2\pi J_c(n)}{\sigma_c} + j\mu_0 \omega \iint_{\Omega_c} G_{CC}(n, m) J_c(m) d\Omega_c + j\mu_0 \omega \iint_{\Omega_c} G_{CS}(n, p) J_s(p) d\Omega_s = 0 \quad (IV.53)$$

Tel que :

$$G_{CS}(K(n, p)) = \frac{r_c(n)}{\sqrt{r_s(p)}} E(K(n, p)) \quad (IV.54)$$

$G_{CS}(n, p)$  : Est une fonction des cordonnées relative entre la pièce et la source.

La subdivision de la pièce en  $N_C$  spires élémentaires, nous amène à établir l'équation suivante :

$$\sum_{n=1}^{N_C} \frac{2\pi}{\sigma_C S_C} I_C(n) + j\omega \mu_0 \sum_{n=1}^{N_C} \sum_{m=1}^{N_C} G_{CC}(n,m) I_C(m) + j\omega \mu_0 I_S \sum_{n=1}^{N_C} \sum_{q=1}^{N_S} G_{CS}(n,q) = 0 \quad (IV.55)$$

#### IV.8.2.5 Variation d'impédance en présence de la pièce

L'impédance du système électromagnétique est :

$$Z_s = \frac{U_T}{I_s} = Z_0 + j \frac{\omega \mu_0}{I_s} \sum_{p=1}^{N_S} r_s(p) \sum_{m=1}^{N_C} G_{SC}(p,m) I_C(m) \quad (IV.56)$$

Par conséquent, la variation d'impédance due à la présence de la pièce est exprimée par :

$$\Delta Z_0 = Z - Z_0 = \frac{\omega \mu_0}{I_s} \sum_{p=1}^{N_S} r_s(p) \sum_{m=1}^{N_C} G_{SC}(p,m) I_C(m) \quad (IV.57)$$

En final, le système à résoudre est le suivant :

$$\begin{cases} \Delta Z_0 = \frac{j\omega \mu_0}{I_s} \sum_{p=1}^{N_S} r_s(p) \sum_{m=1}^{N_C} G_{SC}(p,m) I_C(m) & (a) \\ \sum_{n=1}^{N_C} \frac{2\pi}{\sigma_C S_C} I_C(n) + j\omega \mu_0 \sum_{n=1}^{N_C} \sum_{m=1}^{N_C} G_{CC}(n,m) I_C(m) + j\omega \mu_0 I_S \sum_{n=1}^{N_C} \sum_{q=1}^{N_S} G_{CS}(n,q) = 0 & (b) \end{cases} \quad (IV.59)$$

#### IV.8.2.6 Variation d'impédance en présence de la pièce en vibration

Quand la pièce vibre, les coordonnées de cette pièce par rapport au capteur changent. Dans ce cas, la fonction  $G_{SC}(p,m)$  qui dépend de ces coordonnées est une fonction du temps qui peut se réécrire comme suit :  $G_{SC}(p,m,t)$

On note donc par  $Z(t=0)$ , l'impédance du système sans vibration à l'instant initial ( $t=0$ ) et  $Z(t)$  l'impédance du système lorsque la pièce est en vibration, soit :

$$\begin{cases} Z(t=0) = \frac{j\omega \mu_0}{I_S} \sum_{p=1}^{N_s} r_s(p) \sum_{m=1}^{N_c} G_{SC}(p,m,0) I_C(m) & (a) \\ Z(t) = \frac{j\omega \mu_0}{I_S} \sum_{p=1}^{N_s} r_s(p) \sum_{m=1}^{N_c} G_{SC}(p,m,t) I_C(m) & (b) \end{cases} \quad (IV.60)$$

La variation de l'impédance visualisée est donnée par :

$$\Delta Z(t) = Z(t) - Z(t=0)$$

### IV.9 Modèle géométrique

On considère une pièce de forme cylindrique (exemple d'un rotor) à côté duquel on place une bobine excitée avec une tension sinusoïdale de fréquence 500Hz. Les dimensions du capteur sont très faibles devant celles de la pièce par conséquent la forme de la pièce apparaît comme plate vis-à-vis du capteur, comme le montre la (figure IV.6).

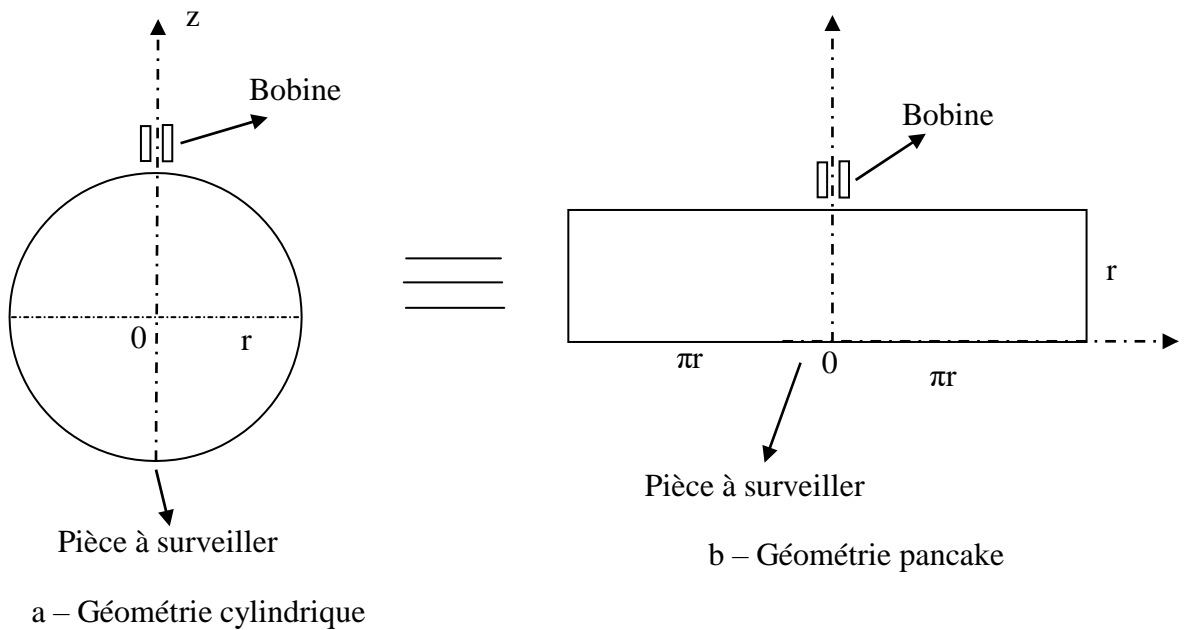


Figure IV.6 – Géométrie du système

La configuration étant axisymétrique, le domaine d'étude réduit à la moitié du domaine de la géométrie précédente (Figure IV.7).

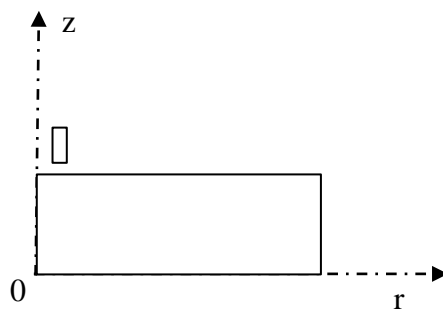


Figure IV.7 – Géométrie axisymétrique 2D

#### IV.10 Description du dispositif

La pièce à contrôler est de conductivité  $\sigma = 10^6$  S/m, d'une longueur de 20 mm et d'épaisseur de 1mm susceptible de varier la figure IV.8.

Le capteur est de forme cylindrique et comprend 330 spires de section circulaire. Le rayon de la bobine du capteur est 0.75mm et de hauteur de 2mm d'épaisseur. Le lift-off représente la distance séparant le capteur et la pièce.

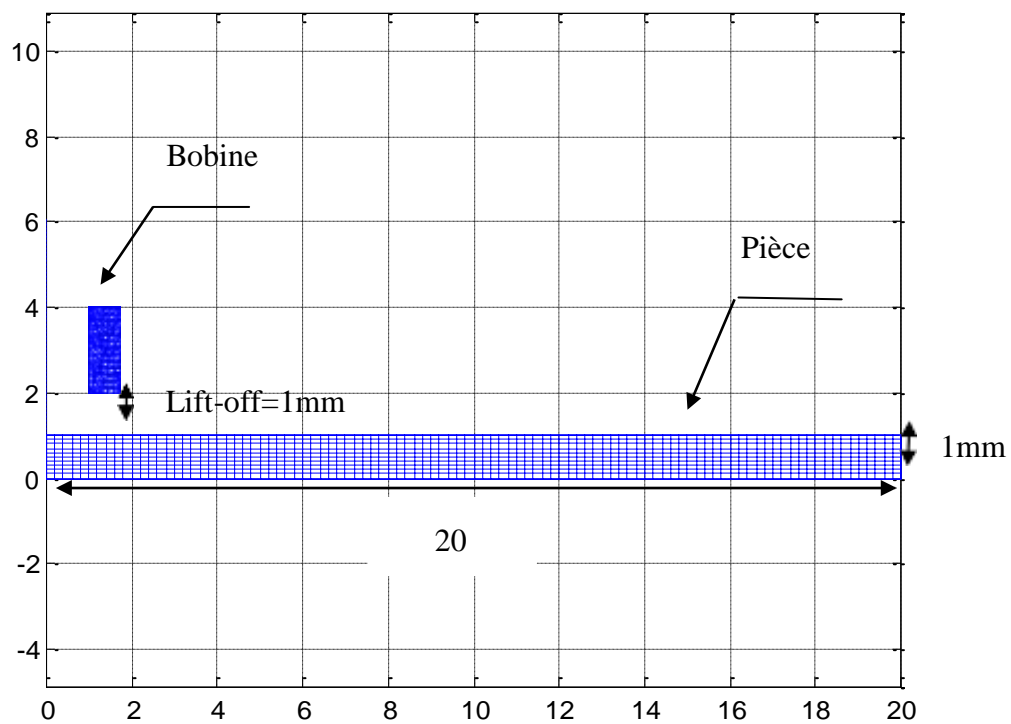


Figure IV.8- Géométrie axisymétrique discrétisé

La grandeur électromagnétique essentiellement visualisée est l'impédance aux bornes de la bobine.

Pour cet exemple, on considère une vibration de forme sinusoïdale de fréquence 100Hz et d'amplitude 1mm, comme le montre la figure ci-dessous.



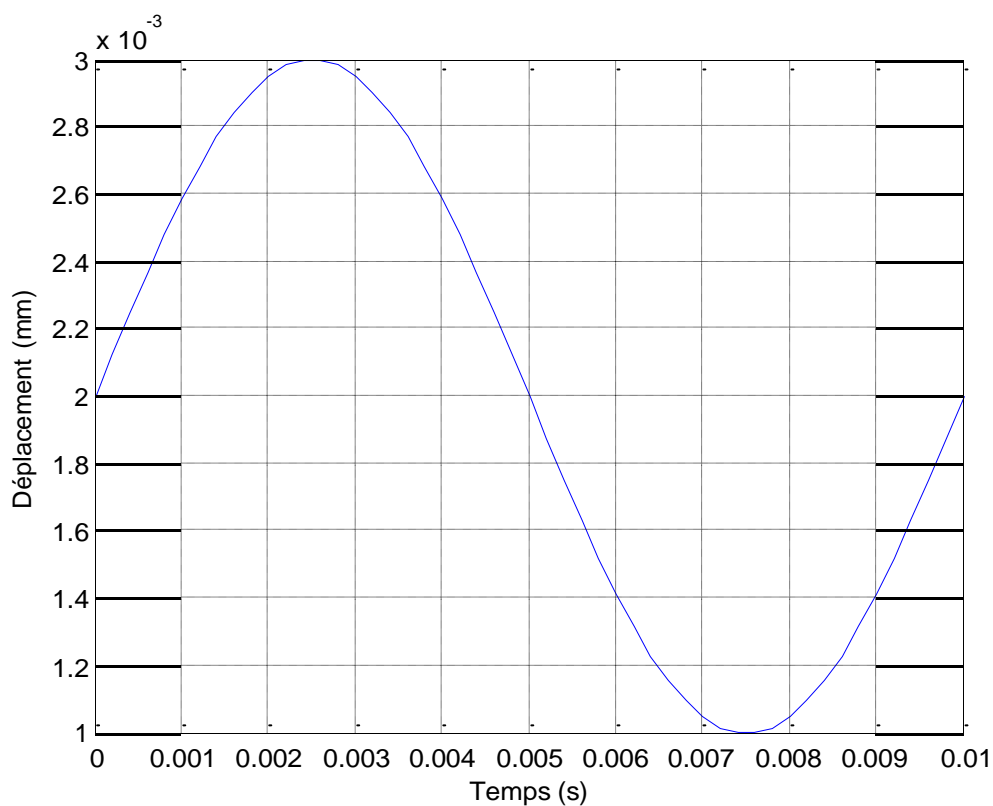


Figure IV.9- Forme sinusoïdale d'une vibration

#### IV.11 Evaluation de $\Delta R$ et $\Delta X$

Pour un lift-off égal à 1mm correspondant à l'amplitude de la vibration et une épaisseur de la pièce de 1mm correspondante aussi à celle d'un récipient de mélangeur en rotation, nous obtenons les résultats de la variation de la résistance et de la réactance représentées dans la figure IV.10.

Notant que dans le lobe positif de la vibration, la pièce s'éloigne du capteur alors que qu'elle se rapproche dans le lobe négatif.

Lors de l'éloignement de la pièce vibrante du capteur dans la première demi-période, la valeur absolue de la variation de la résistance ainsi que celle de la réactance sont faibles par rapport à la seconde demi-période qui correspond au rapprochement de la pièce au capteur.

Cette constatation est nettement visible dans la courbe du module de la variation d'impédance montrée en figure IV.11.

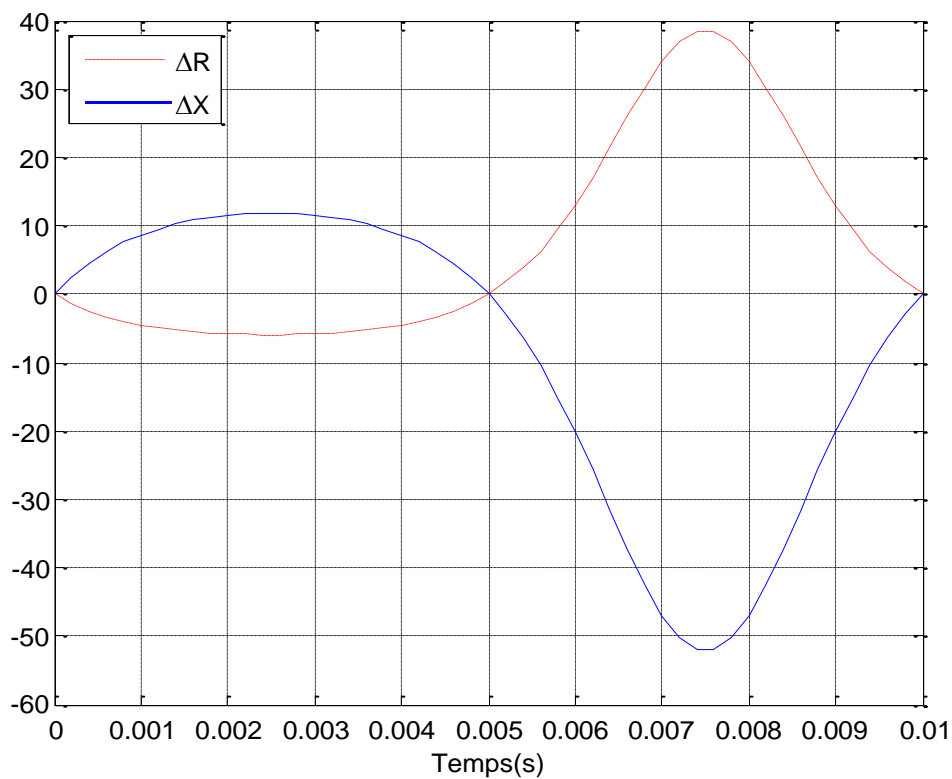


Figure IV.10- Variation de l'impédance

On constate aussi la fréquence d'oscillation de la vibration est reproduite dans la variation de l'impédance.

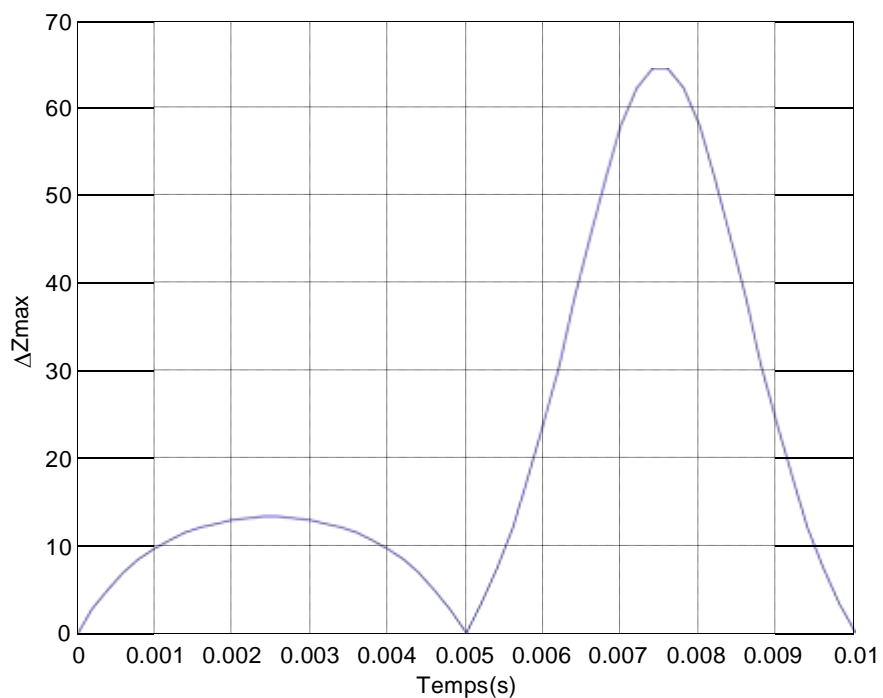


Figure IV.11- Module de la variation de l'impédance

**IV.12 Etude en fonction de l'épaisseur de la pièce vibrante**

**IV.12.1 Variation de la résistance**

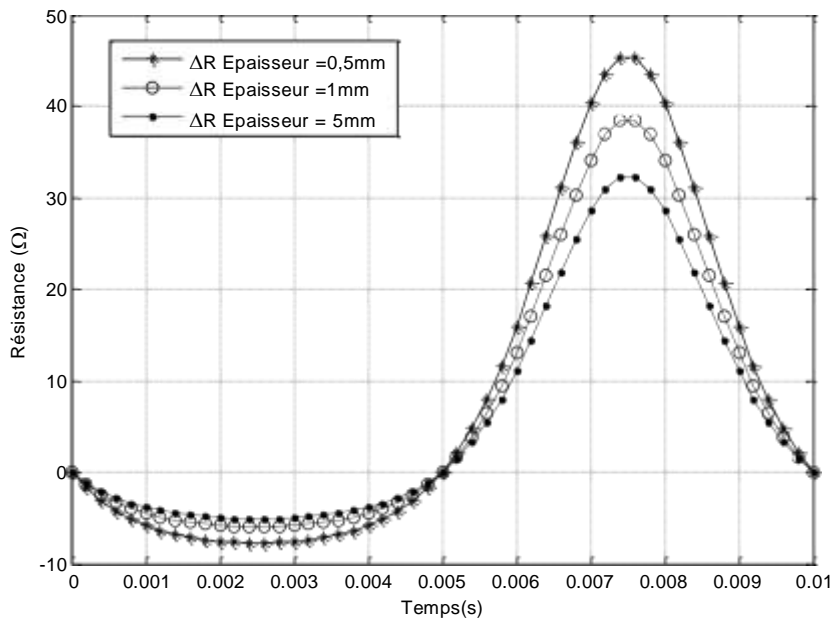


Figure IV.12- Variation de la résistance

### IV.12.2 Variation de la réactance

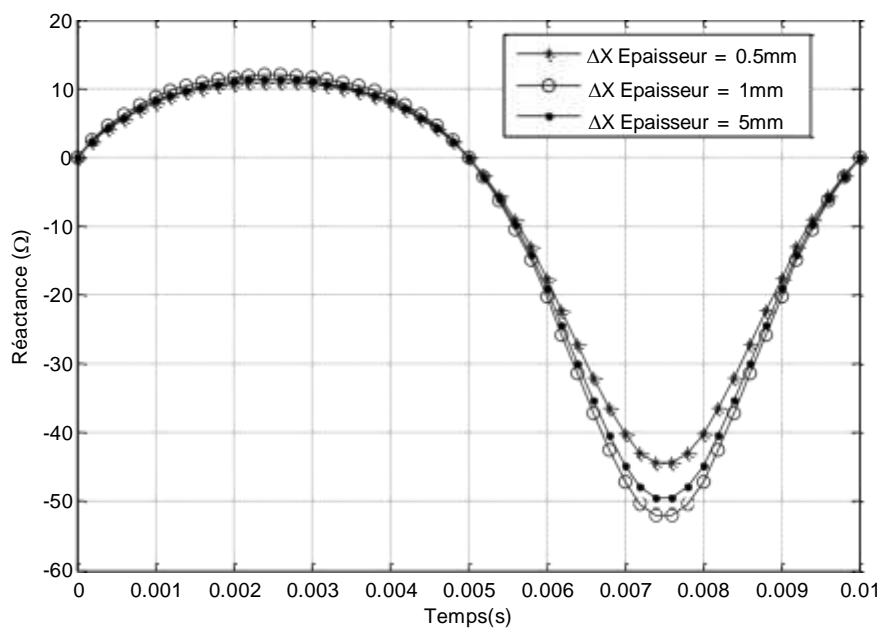


Figure IV.13- Variation de la réactance

### IV.13 Etude en fonction de lift-off

#### IV.13.1 Variation de la résistance

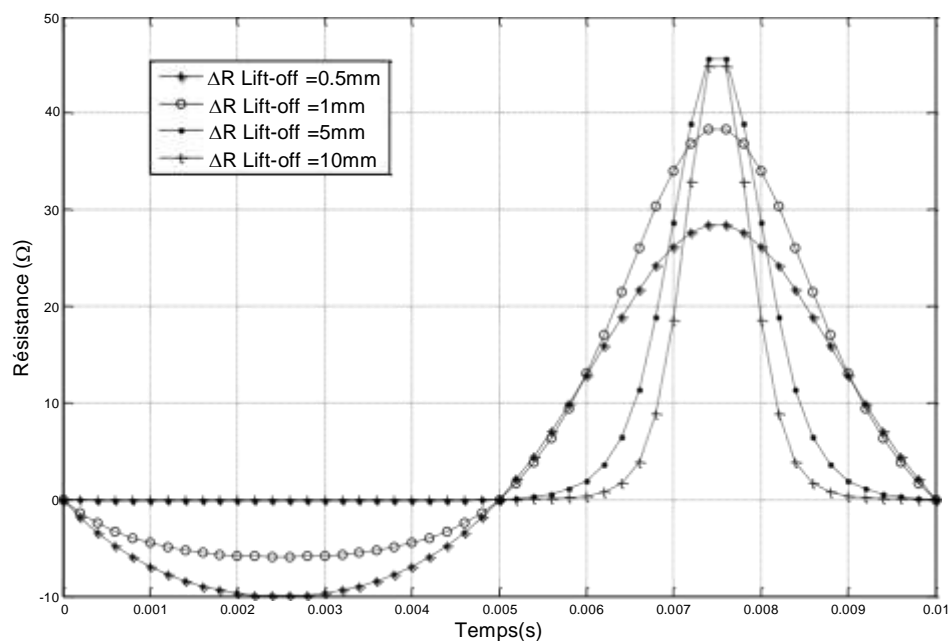


Figure IV.14- Variation de la résistance

### IV.13.2 Variation de la réactance

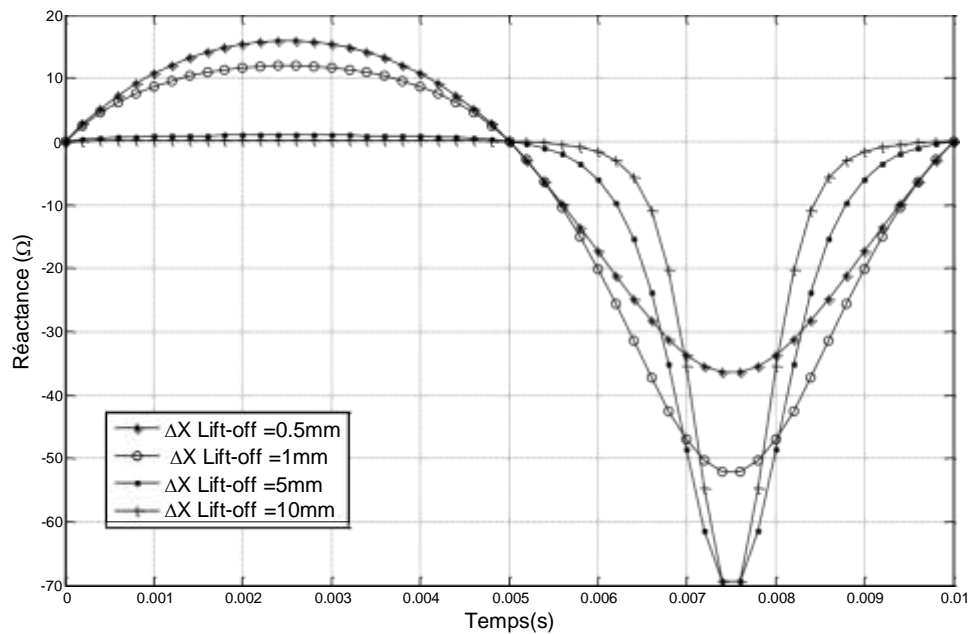


Figure IV.15- Variation de la réactance

### IV.14 Conclusion

Lorsque la pièce vibre, en s'éloignant du capteur, la variation de l'impédance devient faible. En se rapprochant du capteur et pour les grandes amplitudes (Lift-off=5mm et Lift-off=10mm) des vibrations, l'impédance est très faible et sa variation prend la valeur de celle lorsque la pièce est collée au capteur.

## **Conclusion générale**

La description d'un problème physique est souvent réalisée à l'aide d'un modèle mathématique résultant d'une combinaison d'un certain nombre d'équation et d'hypothèses simplificatrices. Dans le cas des problèmes électromagnétiques basse fréquence, ces équations sont celles de Maxwell associé à des lois de comportement des milieux et l'hypothèse du régime quasi-stationnaire.

Une fois que le modèle mathématique est obtenu, il faut l'exploiter pour calculer les différentes grandeurs physiques.

Le but de ce travail est la détection des vibrations d'une machine électrique par la surveillance de son rotor ou de la charge qu'elle entraîne. Cette détection est réalisée par un capteur inductif composé d'une bobine et ces accessoires électroniques.

Les équations de Maxwell sont simplifiées relativement au régime quasi-stationnaire et aux géométries axisymétriques. La modélisation du système capteur-pièce est faite par la méthode des circuits électriques couplés. Le modèle obtenu est implanté sous MATLAB.

Pour simuler la détection des vibrations, nous introduisons dans le modèle, une forme sinusoïdale des vibrations de la pièce. L'évaluation de la variation de l'impédance aux bornes du capteur permet de simuler la détection. En valeur absolue, plus la variation d'impédance est importante, plus la pièce est proche du capteur.

## Références bibliographiques

- [1] La direction d'économie d'énergie. Energie, mines et ressources : Série de la gestion de l'énergie 13 à l'intention des industries, commerces et institutions. Ventilateurs et pompes. 580 rue Booth Ottawa (Ontario) Canada.'Edition Heating ventilating and air conditioning 1987"
- [2] T. BENSANA, "Diagnostic des défaillances basé sur l'analyse vibratoire d'une turbine à vapeur." Mémoire de magister Université de Annaba-Badji Mokhtar, 2009".
- [3] F. A. Andrade, I. Esat, M. N. M. Badi, Gearbox fault detection using statistical methods, time-frequency methods (STFT and Wigner-Ville distribution) and harmonic wavelet - A comparative study, in: Proceedings of COMADEM \_99, Chipping Norton, pp. 77-85, 1999.
- [4] M. M. Ghozlane, "Techniques de Surveillance des machines tournantes "Mémoire de magister électromécanique Université MOHAMED BOUDIAF-M'SILA, 2015"
- [5] M. T. Nabti, "Etude de l'évolution des indicateurs spectraux et cepstraux dans la détection des défauts mécaniques,"thèse de doctorat Université FARHAT ABBAS Sétif 1, 2018"
- [6] K. Ibrahim and S. Youcef, "Détection des défauts d'une machine tournantes par l'analyse FFT." UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA, Mémoire de magister en génie électrique, 2019"
- [7] D. Youcef, "Surveillance et diagnostic des défauts d'une machine électrique par l'analyse vibratoire." UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA, Mémoire de master, 2017.
- [8] T. BENSANA, "Diagnostic des défaillances basé sur l'analyse vibratoire d'une turbine à vapeur." Université de Annaba-Badji Mokhtar, Mémoire de magister en 2008.
- [9] Landolsi Foued, «Cours De Techniques de Surveillance, Partie I Surveillance Des Machines Par Analyse Vibratoire».
- [10] Paresh Girdhar, "Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance", Book of IDC technologies, Newnes an imprint of Elsevier, 2004.
- [11] B. Maouche « Elaboration de modèles par les grandeurs électromagnétiques couplées, 2007 », Thèse de doctorat en électrotechnique Université Sétif Algérie.
- [12] E. DURANT , « Magnétostatique », Université de Paris-VI (1969).
- [13] A. BOSSAVIT « Électromagnétisme, en vue de la modélisation », édition springer, 1998 France.
-