



UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA -BEJAÏA  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



# Mémoire de Fin de Cycle

Présenté par:

M<sup>elle</sup> BENSALAMA Hakima

&

M<sup>elle</sup> SAADA Nesrine

Pour l'obtention du diplôme de

**MASTER EN ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE**

Thème :

*Détection de vibration des pièces métalliques par capteur inductif en continu*

Encadré par :

**Pr Bachir MAOUCHE & Mr Badis BOUCHEBAH**

**Année Universitaire 2022-2023**

# Remerciements

En premier lieu nous tenons à remercier Le Bon Dieu Tout Puissant et Miséricordieux de la bonne santé, de la volonté et de la patience qu'il nous a accordé tout au long de notre parcours étude,

" EL hmdulli'Allah"

Nous ne saurions, réellement, trouver les expressions élégantes que mérite notre encadreur Mr, **BACHIR MAUCHE** afin de le remercier pour son sympathie, ses encouragements, son aide, son dévouement pour le travail et son présence totale, ses conseils, ses aides et sans lui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour. Ainsi que,

**Badis BOUCHEBAH** et **Badea IDIR.**

Nous tenons à exprimer nos profondes gratitude à tous nos Enseignants qui ont contribué à notre formation durant notre parcours études.

Nos remerciements vont également à tous les membres du staff de notre département de Génie électrique, pour leur disponibilité et leur gentillesse. Ainsi, tous les membres de jury d'avoir accepté d'examiner notre travail.

Un remerciement spécial aux Étudiants du département de Génie électrique et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

**Nesrine, Hakima**

*Dédicace*

*Avec une profonde gratitude, je dédie ce mémoire :*

*À mes parents, mon père qui est toujours prêt à tout donné afin de me voir devenir ce que je suis, ma mère qui m'a encouragé et priée durant toute sa vie pour que je puisse réussir, Merci mes parents.*

*À Mes chers frères, Lyes, Riad, Nordine et Yanou*

*À ma grande Mère SAFIA*

*À mes oncles et mes tantes*

*À ma cousine Sihem*

*À tous mes amis(e), Ahlem, Imal, Maissa, Lisa, Hako, Taous, chouchou, Asma, Djazia, Yasmine, Hanifa, Kahina, Ferhat, Messi, Yanis, et toute la promotion 2022/2023, Électrotechnique.*

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

*À tous les chercheurs et les auteurs dont les travaux ont été une source d'inspiration et de connaissance. Vos contributions précieuses ont élargi mes horizons et ont enrichi ce mémoire.*

*Nesrine*

## *Dédicace*

*Avec une profonde gratitude, je dédie ce mémoire :*

*À mes parents, (Mohand Saïd et Daouia) qui ont été ma source de soutien inconditionnel, pour leur amour indéfectible, leur encouragement constant et leurs sacrifices sans fin. Votre confiance en moi a été ma force motrice.*

*À mes professeurs, qui ont partagé leur connaissances et leur passion, m'ont guidé avec bienveillance et ont façonné ma pensée critique. Votre enseignement précieux restera à jamais gravé dans ma mémoire.*

*A la mémoire de mon frère Djamel et nana Fatima que dieu les accueille dans son vaste paradis.*

*A mes chères sœurs, Ghania, Drifa, Warda, Kamilia. Et leurs mari Hacem, Ahmed, Kociela et Yacine. Mes frères, Madjid, Boubaker, Hafid, et Ma belle-sœur Rebekka qui n'ont pas cessé de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de les études.*

*A mes petits neveux Sami, Dassil, Alilou, Lilas, Joujou, Aghilas et Amayas.*

*A mes petites nièces Taous, Djazia, Fifi, Romi et Annarose*

*A ma grande Mère ouardia et ma tante Taous*

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

*A tous mes amis(e), Amira, Ninouche, Nounou, Sondi, Lisa, Chiraz, Imal, Elodie, Chouchou, Ayoub, Yahia, Aymen, Messi, yanis et Massi.*

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

*A tous les chercheurs et les auteurs dont les travaux ont été une source d'inspiration et de connaissance. Vos contributions précieuses ont élargi mes horizons et ont enrichi ce mémoire.*

**Hakima**

---

**TABLE DES MATIERES**

<b>TABLE DES MATIERES .....</b>	<b>1</b>
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>5</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX .....</b>	<b>8</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>9</b>
<b>I- Vibrations et capteurs.....</b>	<b>10</b>
I.1- Introduction .....	10
I.2- Machines tournantes .....	10
I.2.1- Types de machines tournantes .....	10
I.2.2- Origine des vibrations des machines tournantes.....	11
I.3- Description des vibrations .....	12
I.3.1- Paramètres d'une vibration .....	12
I.3.2- Types de vibrations .....	14
I.3.2.1- Vibrations périodiques.....	14
I.3.2.2- Vibrations aléatoires .....	14
I.3.2.3- Vibration sinusoïdale .....	14
I.3.3- Caractéristiques du signal vibratoire .....	15
I.3.4- Source des vibrations .....	15
I.3.4.1- Déséquilibre.....	16
I.3.4.2- Mauvais alignement.....	16
I.3.4.3- Usure.....	17
I.3.4.4- Desserrement .....	18
I.3.4.5- Défauts dans les systèmes de commande .....	18
I.3.5- Conséquences des vibrations .....	18
I.4- Capteur de vibration .....	19
I.4.1- Définition .....	19
I.4.2- Principe de fonctionnement .....	19
I.4.3- Caractéristiques : .....	19
I.4.4- Types de capteurs des vibrations .....	20
I.4.4.1- Capteur de déplacement.....	20
I.4.4.2- Capteur de vitesse .....	21
I.4.4.3- Capteur d'accélération .....	21

I.4.5-	Choix de l'emplacement de capteurs .....	22
I.4.5.1-	Emplacement .....	22
I.4.5.2-	Consignes pour la fixation des capteurs .....	23
I.5-	Principes anomalies et leurs fréquences déferent .....	24
I.6-	Analyse vibratoire.....	24
I.6.1-	Définition .....	24
I.6.2-	Objectif .....	25
I.6.3-	Surveillance .....	25
I.7-	Diagnostic .....	27
I.7.1-	Définition .....	27
I.7.2-	Etapas de Diagnostic.....	27
I.7.3-	Méthodologie de mise en œuvre .....	28
I.8-	Conclusion .....	29
<b>II-</b>	<b>Description et modélisation électromagnétique .....</b>	<b>30</b>
II.1-	Introduction .....	30
II.2-	Courants de Foucault .....	30
II.2.1-	Effet de peau .....	30
II.2.2-	Phénomène des courant de Foucault.....	31
II.2.3-	Méthode de contrôle par courant de Foucault .....	31
II.2.4-	Avantages et inconvénients .....	33
II.2.5-	Fondements du magnétisme dans les capteurs de vibration inductifs .....	33
II.2.5.1-	Surveillance des vibrations par courant de Foucault .....	34
II.2.5.2-	Courant de Foucault et loi de Lenz.....	34
II.2.6-	Interaction entre le champ magnétique et les courants induits .....	35
II.2.7-	Caractéristique des capteurs de vibration par courant de Foucault .....	35
II.2.7.1-	Sensibilité et résolution du capteur.....	36
II.2.7.2-	Gamme de fréquence de détection.....	37
II.2.8-	Impact des matériaux et de la distance de détection .....	37
II.3-	Etude électromagnétique .....	38
II.3.1-	Equations de Maxwell .....	38
II.3.2-	Lois de comportements des milieux .....	38
II.3.3-	Equations maxwell en régime quasi-stationnaire : .....	39
II.3.4-	Notion du potentiel magnétique vecteur : .....	39

---

II.3.5- Equation de diffusion généralisée : .....	40
II.3.6- Formule de Biot et Savart .....	41
II.4- Méthodes de résolution.....	41
II.4.1- Méthodes analytiques .....	42
II.4.2- Méthodes Numériques .....	42
II.4.3- Méthodes semi-analytiques .....	42
II.5- Modèle général et loi de Biot et Savart .....	42
II.5.1- Formulation intégrale des équations .....	43
II.5.2- Formulation bidimensionnelles en coordonnées cylindrique .....	43
II.6- Système axisymétrique .....	45
II.6.1- Expression analytique du potentiel vecteur magnétique .....	45
II.6.2- Expression analytique de l'induction magnétique .....	49
II.6.3- Expression analytique du potentiel scalaire électrique .....	50
II.7- Conclusion .....	51
<b>III- Modélisation par les circuits couplés et application .....</b>	<b>52</b>
III.1- Introduction .....	52
III.2- Equations générale entre deux points couplés.....	52
III.2.1- Equation dans le capteur .....	52
III.2.2- Equation dans la pièce .....	54
III.2.3- Equation globale du système .....	55
III.2.4- Induction électromagnétique de Neumann .....	56
III.2.4.1- Définition.....	56
III.2.4.2- Système d'équation à résoudre .....	56
III.2.5- Induction électromagnétique de Lorentz .....	56
III.2.5.1- Définition.....	56
III.2.5.2- Modèle électromagnétique.....	56
III.2.5.3- Variation de la résistance vue par le capteur .....	57
III.3- Applications et résultats.....	58
III.3.1- Modèles géométriques .....	58
III.3.1.1- Vibration radiale .....	58
III.3.1.2- Vibration axiale .....	59
III.3.1.3- Configuration axisymétrique .....	59
III.3.2- Résultats de la simulation .....	60

---

III.3.2.1- Discrétisation du capteur et de la pièce .....	60
III.3.2.2- Forme de la vibration.....	60
III.3.2.3- Signature de la vibration.....	61
III.3.2.4- Influence de la fréquence dans la détection .....	65
III.3.2.5- Influence de l'épaisseur de la pièce .....	66
III.3.2.6- Influence de l'amplitude des vibrations (Entrefer).....	67
III.4- Conclusion .....	69
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>70</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>71</b>

**LISTE DES FIGURES**

Figure I.1 : Origine d’une vibration ..... 11

Figure I.2 : Efforts qui traduisent les vibrations..... 12

Figure I.3 : Schéma d’une vibration..... 12

Figure I.4 : Modélisation d’une vibration ..... 12

Figure I.5 : Amplitude d’une vibration ..... 13

Figure I.6 : Vibrations périodiques..... 14

Figure I.7 : Vibrations sinusoïdale. .... 15

Figure I.8 : Déséquilibre Statique..... 16

Figure I.9 : Déséquilibre dynamique ..... 16

Figure I.10 : Défaut d’alignement ..... 17

Figure I.11 : Usure d’un roulement ..... 17

Figure I.12 : Proximètre ..... 20

Figure I.13 : Proximetre monté sur un palier ..... 20

Figure I.14 : Capteur de vitesse ..... 21

Figure I.15: Capteur d’accélération..... 21

Figure I.16 : Fixation du capteur sur palier ..... 22

Figure I.17 : Choix directionnel pour la prise de mesure ..... 22

Figure I.18 : Différents types de l’emplacement de capteurs ..... 23

Figure I.19 : Analyse vibratoire ..... 25

Figure I.20 : Types de surveillance vibratoire..... 26

Figure I.21 : Organigramme de la méthodologie de mise en œuvre ..... 28

Figure II.1 : Courant de Foucault ..... 30

Figure II.2 : Phénomène de courant de Foucault..... 31

Figure II.3 : Principe de détection par courant de Foucault ..... 32

Figure II.4 : Loi de Lenz Induction électromagnétique..... 35

Figure II.5 : Interaction électromagnétique .....	35
Figure II.6 : Caractéristique d'un capteur .....	37
Figure II.7 : Représentation vectorielle .....	41
Figure II.8 : Géométrie de type Pancake .....	43
Figure II.9 : Effet mutuel entre deux points quelconques .....	44
Figure II.10 : Vue du plan de la spire .....	45
Figure II.11 : Potentiel vecteur magnétique créé par une spire circulaire .....	46
Figure II.12 : Fonction elliptique $E_1(k)$ et $E_2(k)$ .....	48
Figure III-1 : Géométrie d'une vibration radiale .....	58
Figure III-2 : Géométrie d'une vibration axiale .....	59
Figure III-3 : Géométrie axisymétrique .....	59
Figure III-4 : Géométrie axisymétrique discrétisée .....	60
Figure III-5 : Déplacement et vitesse du capteur .....	61
Figure III-6 : Variation de la résistance en fonction du temps .....	62
Figure III-7 : Courant induit dans la pièce en fonction du temps .....	62
Figure III-8 : Variation de la résistance en fonction du déplacement .....	63
Figure III-9 : Courant induit dans la pièce en fonction du déplacement .....	63
Figure III-10 : Variation de la résistance en fonction du déplacement pour $v_z > 0$ et $v_z < 0$ .....	64
Figure III-11 : Courant induit en fonction du déplacement pour $v_z > 0$ et $v_z < 0$ .....	64
Figure III-12 : Variation de la résistance en fonction du déplacement pour différentes valeurs de la fréquence .....	65
Figure III-13 : Variation de la résistance en fonction du temps pour différentes valeurs de l'épaisseur de la pièce .....	66
Figure III-14 : Variation de la résistance en fonction du déplacement pour différentes valeurs de l'épaisseur de la pièce .....	67
Figure III-15 : Variation de la résistance en fonction du temps pour différentes valeurs de l'amplitude de la vibration .....	67

Figure III-16 : Variation de la résistance en fonction du temps pour différentes valeurs de l'amplitude de la vibration.....68

Figure III-17 : Variation de la résistance en fonction du déplacement pour différentes valeurs de l'amplitude de la vibration .....68

## **LISTE DES TABLEAUX**

Table I-1: Types des machines tournantes .....	10
Table I-2 : Principes défauts et leurs fréquences .....	24
Table II-1 : Methodes de controle par courant de foucault .....	32
Table II-2 : Avantages et inconvenients des courants de Foucault .....	33

# *Introduction Générale*

## **INTRODUCTION GENERALE**

L'analyse et la modélisation des courants induits pour la détection des vibrations des pièces métalliques constituent un domaine de recherche captivant et en constante évolution. Particulièrement, les machines tournantes, telles que les moteurs électriques, les générateurs et les turbines, jouent un rôle essentiel dans de nombreux secteurs industriels. Il est donc crucial d'identifier précocement les vibrations anormales au sein de ces machines afin de prévenir les pannes coûteuses, les interruptions non planifiées et les accidents graves.

Le contrôle des vibrations et du bruit dans les machines électriques, en particulier sur les parties mobiles, peut être réalisé grâce à la technique du contrôle par des courants induits. Cette approche consiste à utiliser des champs magnétiques pour induire des courants électriques dans les parties conductrices en mouvement.

Pour modéliser le phénomène, nous exploitons les équations de Maxwell dans le cas du phénomène linéaires, du régime lentement variable et de géométries axisymétriques. Le modèle obtenu peut être résolu par différentes méthodes, telles que les approches analytiques, numériques et semi-analytiques. Nous avons opté pour une résolution par la méthode des circuits électriques couplés qui est une méthode semi-analytique.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres.

Le premier chapitre est consacré aux vibrations ainsi que leurs capteurs et les techniques de diagnostic. Le chapitre second est réservé aux équations électromagnétiques de Maxwell, leur simplification liée au dispositif de détection et l'élaboration d'un modèle général. La partie concernant la résolution par la méthode des circuits électriques couplés, l'application et résultats de simulation est traité dans le troisième chapitre et de Foucault seront ensuite abordés dans le deuxième chapitre.

# **CHAPITRE**

## **I- Vibrations et capteurs**

---

## I.1- Introduction

Toutes les machines vibrent et le spectre des fréquences et de leurs vibrations a un profil particulier lorsqu'elles sont en état de bon fonctionnement. Mais dès que les phénomènes d'usure, de fatigue, de vieillissement apparaissent, le profil de ce spectre se modifie. Ainsi, une machine neuve en excellent état de fonctionnement produit très peu de vibrations.

## I.2- Machines tournantes

Une machine est un ensemble des pièces mécaniques, hydrauliques ou électriques courant à exercer une ou plusieurs fonctions données et, en particulier, l'application d'une force modulée ou non, destinée à vaincre une résistance ou à assurer un mouvement avec ou sans transmission de force. [1]

### I.2.1- Types de machines tournantes

Il existe de nombreux types de machines tournantes, chacun ayant des caractéristiques spécifiques et des utilisations particulières, dont voici quelques exemples :

**Table I-1** : Types des machines tournantes

Types des machines tournantes	Caractéristique
Moteur	convertisseur de l'énergie électrique en énergie mécanique
Générateur électrique	convertisseur de l'énergie mécanique en énergie électrique
Turbine à vapeur	utilise la vapeur pour produire un mouvement rotatif
Turbine à gaz	utilise la combustion de gaz pour produire un mouvement rotatif
Mixeur	utilisé pour mélanger des liquides ou des poudres
Compresseur	comprimer des gaz pour augmenter leur pression
Turbine hydraulique	Utilise l'énergie hydraulique pour produire un mouvement rotatif
Eolienne	Utilise l'énergie éolienne pour produire un mouvement rotatif
Pompe centrifuge	Utilise une force centrifuge pour déplacer des liquides à travers des conduites

### I.2.2- Origine des vibrations des machines tournantes

Au fil du temps, les machines subissent des changements et des dégradations qui entraînent une augmentation des niveaux vibratoires. Ces vibrations excitent les résonances et ajoutent une charge dynamique aux paliers, ce qui peut endommager les composants mécaniques. L'analyse de ces vibrations permet de détecter les composants défectueux, de localiser les problèmes et d'estimer la durée de vie restante en fonction du niveau de vibration atteint et des lois d'endommagement. [2]

L'analyse vibratoire est utilisée en maintenance préventive conditionnelle (MPC) pour la surveillance des machines tournantes. Les machines tournantes sont des systèmes dans les quels peut se distinguer [3] :

- Un rotor
- Une structure
- Des liaisons

La rotation du rotor, soutenu par la structure de la machine, crée des forces qui varient en fonction de l'état de la machine, et ces forces se propagent à travers tous les composants de la machine.

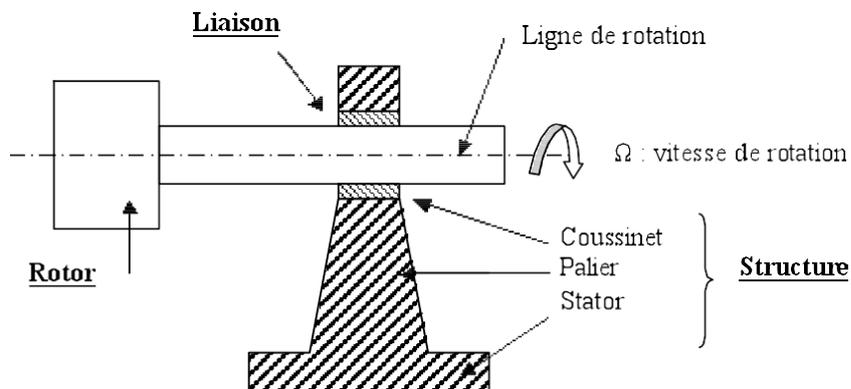


Figure I.1 : Origine d'une vibration

Ces efforts vont se répercuter sur tous les éléments de la machine. Des vibrations vont être créées si ces efforts rencontrent une mobilité (un peu de jeu ou un élément peu rigide). Une vibration peut donc être vue comme [3] :

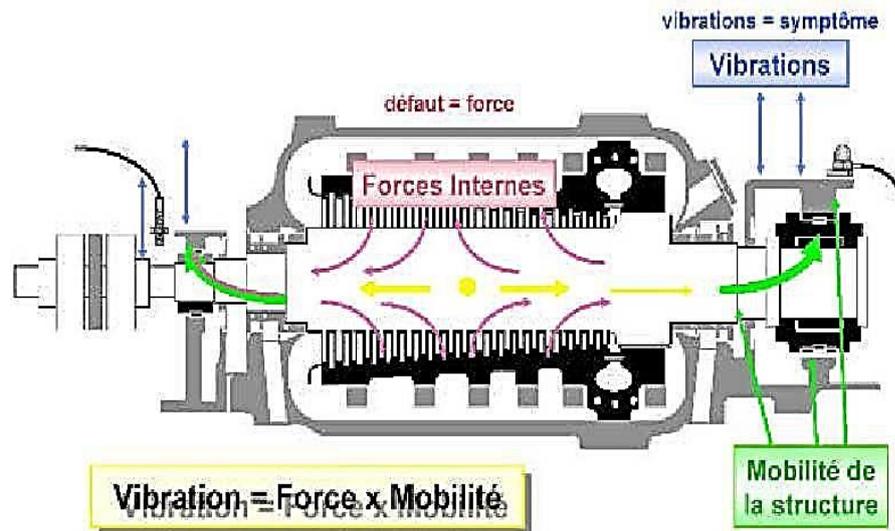
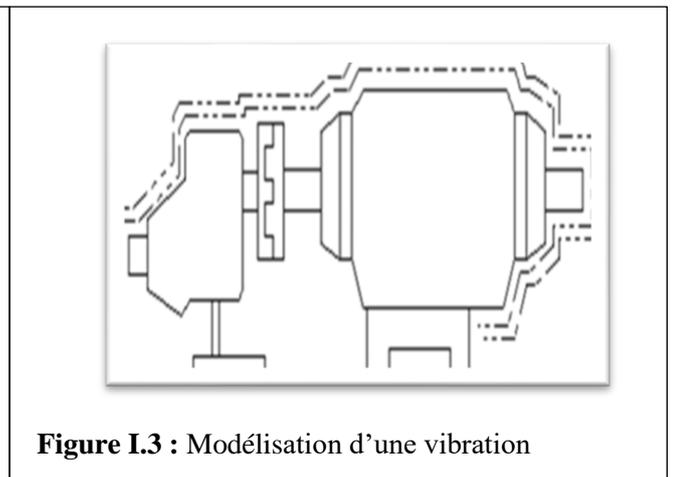
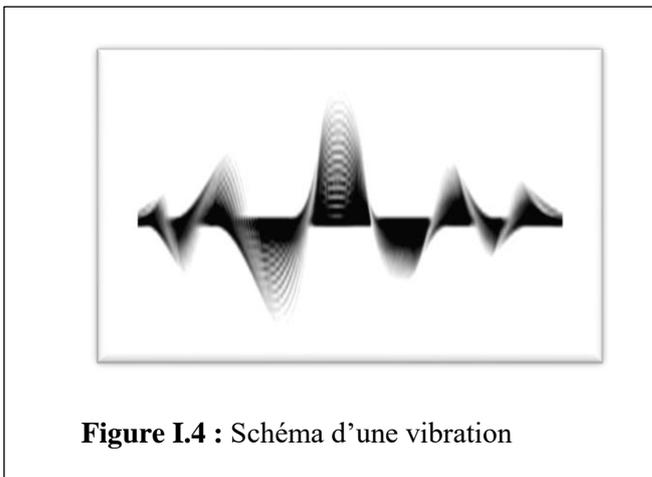


Figure I.2 : Efforts qui traduisent les vibrations

### I.3- Description des vibrations

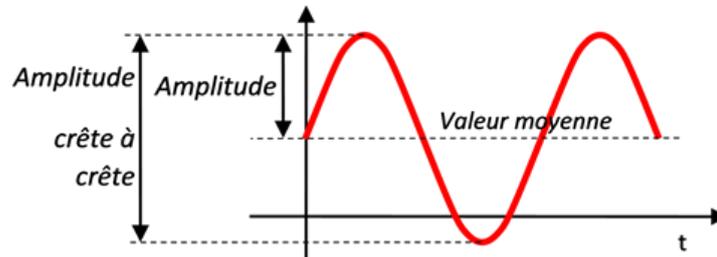
Une vibration est un phénomène mécanique, dans les quelles oscillations mécanique autour d'une position d'équilibre stable ou d'une trajectoire moyenne, la vibration d'un système peut être libre ou forcée.



#### I.3.1- Paramètres d'une vibration

- **Amplitude** : se réfère à la mesure de la distance maximale parcourue par un objet ou un système en mouvement périodique depuis sa position d'équilibre jusqu'à son point extrême. En d'autres termes, Elle est importante pour comprendre les caractéristiques d'un mouvement

périodique, car elle peut influencer d'autres propriétés du mouvement, telles que la fréquence et la période, elle est mesurée en mètres(m). Elle peut s'exprimer aussi soit en vitesse (m/s), soit en accélération (m/s<sup>2</sup>).



**Figure I.5 :** Amplitude d'une vibration

- **Période :** c'est la durée nécessaire pour qu'elle effectue une oscillation complète, c'est-à-dire le temps qu'il faut pour que la machine passe d'un point extrême de son mouvement, puis revienne à ce même point. Elle est inversement proportionnelle à la fréquence de vibration. La période de vibration est mesurée en secondes (s)
- **Fréquence :**  
La vibration d'un objet se produit lorsqu'il effectue un mouvement de va-et-vient autour de sa position normale, et le nombre de cycles complets qu'il effectue par seconde est sa fréquence, mesurée en hertz (Hz). La mesure et l'analyse de la fréquence de vibration des machines sont cruciales pour détecter les problèmes potentiels tels que le déséquilibre, le mauvais alignement et l'usure des paliers. Cela est généralement réalisé à l'aide d'un équipement d'analyse vibratoire qui enregistre les niveaux de vibration au fil du temps, permettant ainsi de détecter les tendances et les variations [1]. Elle est donnée par cette équation :  $f = \frac{1}{T}$
- **Phase:** permet de déterminer la position de la particule d'un corps oscillant à un instant donné [1]. Elle peut être utilisée pour décrire la relation entre deux ou plusieurs vibrations.
- **Direction:** c'est la direction dans laquelle la vibration se propage. Elle peut être longitudinale, dans le cas d'une onde sonore, ou transversale, dans le cas d'une vibration mécanique.
- **Intensité :** c'est l'énergie transportée par la vibration par unité de temps. Elle peut être mesurée en termes de puissance ou d'intensité acoustique.

### I.3.2- Types de vibrations

#### I.3.2.1- Vibrations périodiques

Une vibration périodique est une somme d'infini des mouvements sinusoïdaux qui correspond à un mouvement périodique, il consiste en la superposition, c'est-à-dire l'addition algébrique d'une vibration pure fondamentale et de vibrations pures harmoniques. Les fréquences des harmoniques sont des multiples entiers de celle du fondamental. Par exemple, le mouvement d'un piston d'un moteur à combustion interne génère des oscillations harmoniques. [4]

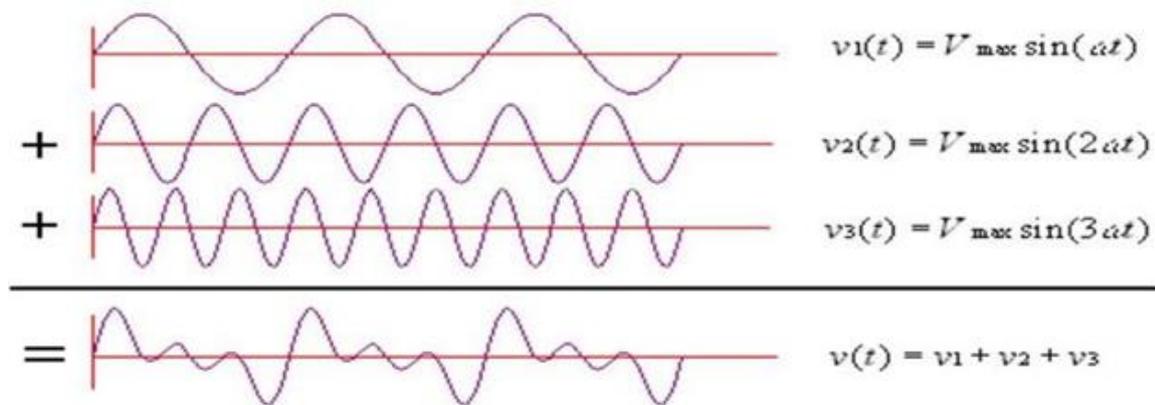


Figure I.6 : Vibrations périodiques

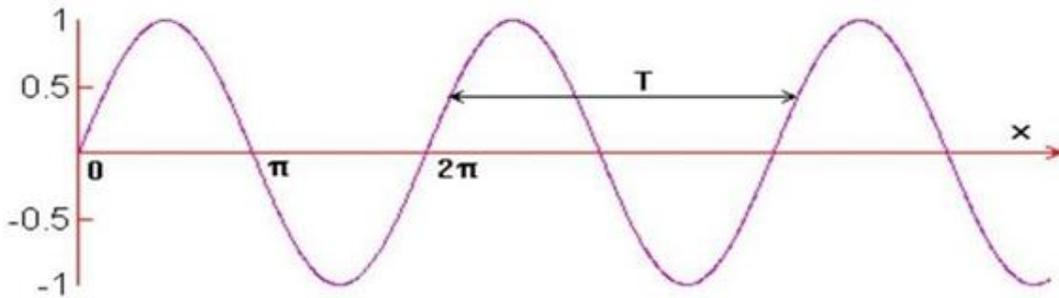
#### I.3.2.2- Vibrations aléatoires

Les vibrations aléatoires sont des signaux périodiques peuvent être décomposés en une somme de signaux harmonique, ils se disent d'un signal vibratoire qui ne peut être décrit que par ses propriétés statistiques. La forme d'onde des vibrations n'a pas toujours une structure aussi simple que celle des vibrations pures et des vibrations harmoniques. Très souvent, on ne peut plus y distinguer la répétition d'un motif, la forme du signal vibratoire évolue au contraire constamment de manière anarchique, ce sont les vibrations aléatoires. [4]

#### I.3.2.3- Vibration sinusoïdale

Une vibration sinusoïdale est une oscillation périodique qui suit la forme d'une onde sinusoïdale, se répétant régulièrement dans le temps et pouvant être représentée par une fonction mathématique sinusoïdale, c'est la forme d'onde la plus simple à décrire, et elle peut être visualisée comme le mouvement de l'extrémité d'une aiguille d'une horloge ou le déplacement d'un système masse-ressort non amorti. [4]

Une sinusoïde est une courbe alternative avec une valeur moyenne de zéro, exprimée par une fonction mathématique simple.



**Figure I.7 :** Vibrations sinusoïdale.

### I.3.3- Caractéristiques du signal vibratoire

Les signaux vibratoire ont une structure complexe, et sont constitués de différents composants:

- Une partie du signal provient des phénomènes cycliques (déterministes ou non) se produisant dans le système, comme la rotation des arbres, les chocs des engrènements, les mouvements existants au sein d'un roulement.
- Une partie aléatoire, due aux phénomènes parasites générés lors du fonctionnement d'un système (jeu, frottement...).

Ces signaux ne sont globalement pas stationnaires. En effet, ils ne sont pas indépendants du temps même si la vitesse de fonctionnement reste constante. Cette non-stationnarité a plusieurs origines [5] :

- Vieillessement du système.
- Excitation du système en vibration due aux chocs internes successifs voire chaotiques (engrenages, roulements...).
- Non-stationnarité des efforts transmis à travers les systèmes. Imperfection des surfaces de contact, et contact variable entre dentures.

### I.3.4- Source des vibrations

Les vibrations peuvent résulter de divers facteurs, soit isolés soit combinés. Il est important de se rappeler que les problèmes de vibrations ne sont pas uniquement causés par l'équipement principal, mais peuvent également provenir d'un équipement auxiliaire, voici les différentes causes des vibrations:

### I.3.4.1- Déséquilibre

Un déséquilibre peut causer des vibrations lorsque le poids déséquilibre d'un composant rotatif tourne autour de l'axe de la machine, créant une force centrifuge. Ce déséquilibre peut être causé par des défauts de fabrication (erreurs d'usinage, défauts de fonderie) ou des problèmes d'entretien (aubes de ventilateur sales ou déformées, absence de masse d'équilibre).

Les effets du déséquilibre s'accroissent à mesure que la vitesse de la machine augmente. Il peut non seulement causer des vibrations indésirables, mais aussi réduire de manière considérable la durée de vie des roulements.

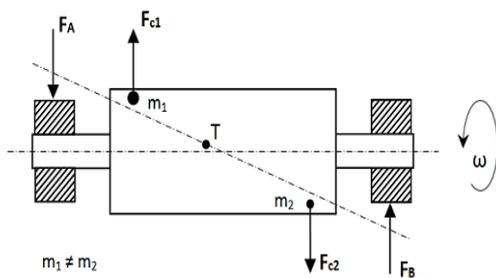


Figure I.9 : Déséquilibre dynamique

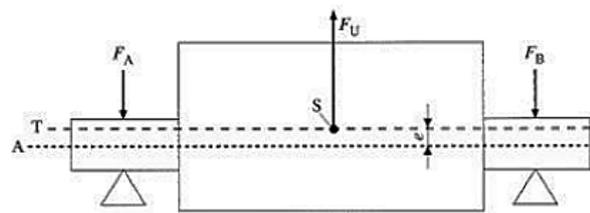
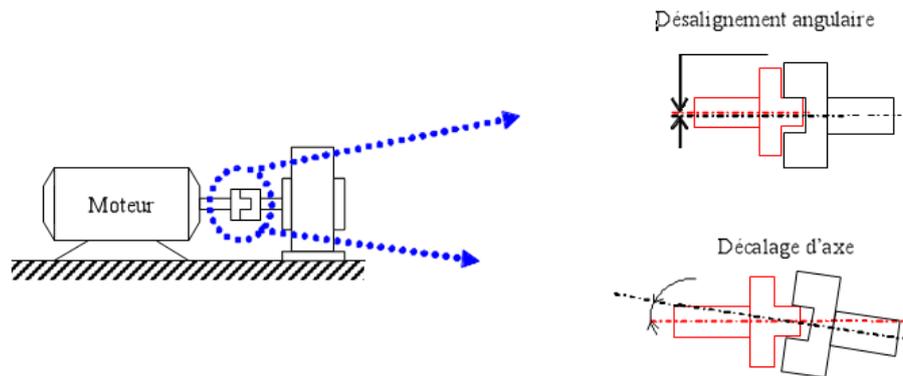


Figure I.8 : Déséquilibre Statique

### I.3.4.2- Mauvais alignement

Des vibrations peuvent survenir lorsque les arbres de la machine ne sont plus alignés. Un mauvais alignement angulaire se produit lorsque les axes du moteur ne sont pas parallèles.

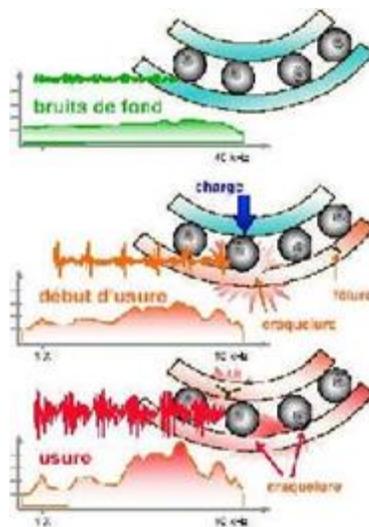
Le mauvais alignement peut être causé lors de l'assemblage ou se développer avec le temps en raison de la dilatation thermique, du mouvement des composants ou d'un réassemblage incorrect après des travaux d'entretien, d'un défaut de montage d'un palier, d'un mauvais calage des pattes de fixation. Les vibrations qui en résultent peuvent être radiales ou axiales dans l'axe de la machine ou les deux à la fois.



**Figure I.10** : Défaut d'alignement

### I.3.4.3- Usure

Lorsque des composants s'usent, tels que les roulements à billes ou à rouleaux, les courroies de transmission ou les engrenages peut également causer des vibrations. Par exemple, lorsqu'un roulement usée tourne, les contacts métalliques entre les éléments roulants et les cages émettent des bruits de fond aléatoires et provoquer des vibrations à chaque passage des rouleaux sur la zone endommagée. Une dent d'engrenage très écaillée ou très usée, ou une courroie de transmission cassée, peuvent également produire des vibrations.



**Figure I.11** : Usure d'un roulement

#### **I.3.4.4- Desserrement**

Des vibrations, qui pourraient être tout à fait anodines, peuvent devenir évidentes et destructrices si le composant qui vibre est mal fixé ou si ses roulements sont desserrés. Ce desserrement peut éventuellement être causé par des vibrations sous-jacentes. Quel que soit son origine, le desserrement permet aux vibrations de provoquer des dommages, comme l'usure des roulements ou l'usure et la fatigue des fixations de l'équipement et d'autres composants.

#### **I.3.4.5- Défauts dans les systèmes de commande**

Les défauts dans les systèmes de commande de la machine peuvent également causer des vibrations en perturbant la régulation de la machine.

#### **I.3.5- Conséquences des vibrations**

Les vibrations peuvent causer une usure accrue, une augmentation de la consommation d'énergie et des effets indésirables tels que des risques pour la sécurité et des conditions de travail dégradées.

Dans les situations les plus graves, elles peuvent endommager l'équipement de manière irréversible, entraînant l'arrêt de la production de l'usine.

Les vibrations peuvent causer :

- une usure prématurée des pièces de la machine, ce qui peut entraîner une défaillance de la machine à long terme.
- une augmentation de la consommation d'énergie de la machine, car elle doit travailler plus dur pour compenser les perturbations.
- Défaillance des roulements de la machine, ce qui peut entraîner une défaillance de la machine.
- Nuisances sonores qui sont des bruits et des vibrations audibles, qui peuvent être gênants pour les personnes travaillant à proximité de la machine ou pour les personnes à proximité.
- Risques pour la sécurité des travailleurs et des utilisateurs de la machine en cas de défaillance ou de panne de la machine.
- Détérioration des alignements qui est une dégradation rapide des performances et une perte d'efficacité de la machine en causant des désalignements dans ses composants.

## **I.4- Capteur de vibration**

### **I.4.1- Définition**

Les capteurs de vibrations sont indispensables pour surveiller l'état des machines industrielles, détecter les anomalies et prévenir les pannes coûteuses. Ils améliorent la sécurité des travailleurs en détectant les vibrations excessives et optimisent la maintenance en identifiant les pièces à remplacer. Ces capteurs réduisent les coûts de maintenance et les pertes de production.

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

Il mesure les oscillations ou les mouvements de la machine, il se compose d'un capteur de vibrations qui peut être un accéléromètre, un capteur de pression ou un capteur de déplacement, ainsi que d'un circuit de traitement de signal pour convertir les vibrations en données numériques exploitables. Lorsque la machine est en marche, elle génère des vibrations qui sont transmises au capteur de vibrations, puis il convertit les mouvements mécaniques en un signal électrique. Le signal est ensuite envoyé à un circuit de traitement de signal qui filtre, amplifie et convertit le signal analogique en données numériques exploitables.

### **I.4.3- Caractéristiques :**

Un capteur de vibration est caractérisé principalement par :

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

## I.4.4- Types de capteurs des vibrations

### I.4.4.1- Capteur de déplacement

Aujourd'hui, le proximètre le plus utilisé pour la surveillance de machines est le capteur inductif à courants de Foucault. Ce capteur, représenté en figure(I.13), est relié à un émetteur-démodulateur-conditionneur [6].



Figure I.12 : Proximètre

Le capteur de déplacement est utilisé pour toutes les applications où la surveillance des jeux entre les arbres et les paliers s'avère essentielle. C'est pourquoi l'on retrouve des capteurs de déplacement installés sur la plupart des turbines hydroélectriques 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 les seuils d'alerte et de danger en terme de déplacement qu'en terme de vitesse ou d'accélération.

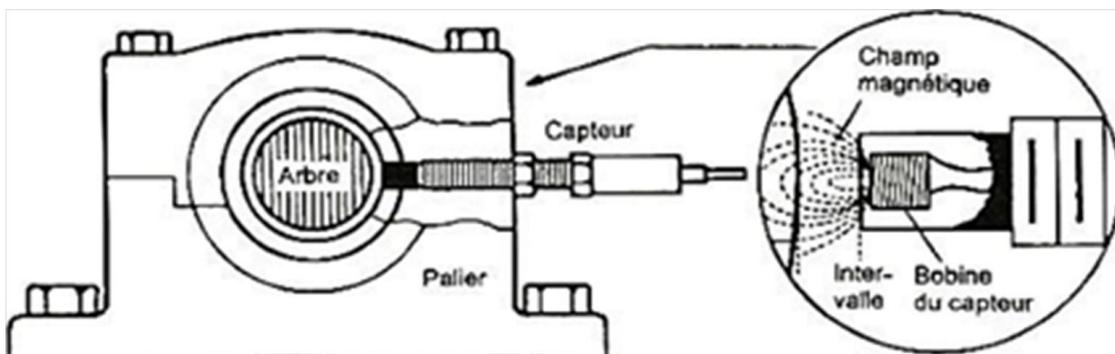


Figure I.13 : Proximètre monté sur un palier

#### I.4.4.2- Capteur de vitesse

Les capteurs de vitesse ou vélocimétries sont constitués d'une sonde à contact dite sonde sismique qui mesure le mouvement absolu de l'organe sur lequel elle est fixée. Ce type de capteur présente l'avantage de ne nécessiter ni source d'alimentation ni préamplificateur. [6]

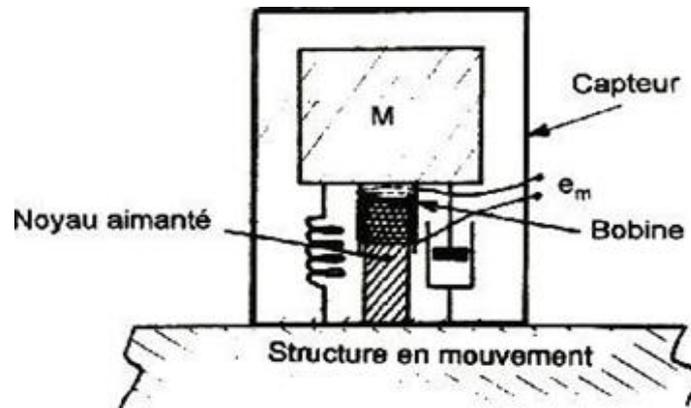


Figure I.14 : Capteur de vitesse

#### I.4.4.3- Capteur d'accélération

Les accéléromètres piézoélectriques tendent à devenir les capteurs de vibrations absolues les plus utilisés pour la surveillance des machines tournantes. Leur principe de fonctionnement repose sur la propriété des matériaux piézoélectriques de générer une charge électrique proportionnelle à la contrainte de compression ou de cisaillement subie. [6]

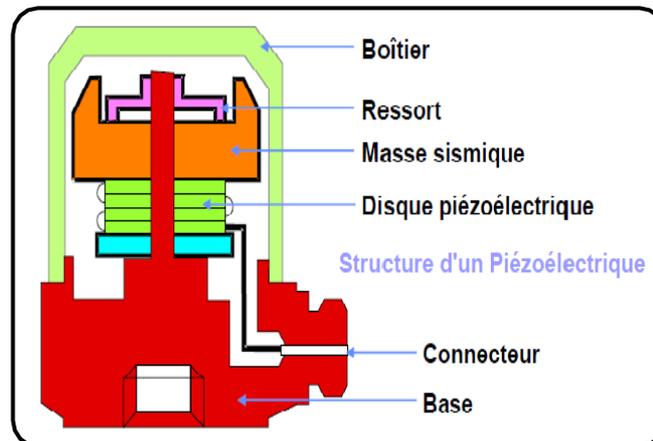


Figure I.15 : Capteur d'accélération

## I.4.5- Choix de l'emplacement de capteurs

### I.4.5.1- Emplacement

Dans le cas des machines tournantes, les principales mesures seront effectuées le plus souvent au droit des paliers qui sont les parties fixes les plus directement en relation avec les efforts appliqués à la partie mobile. Ces efforts de deux types :

- **Efforts tournants** : ce sont les efforts liés à la rotation de l'arbre, générés par exemple par un balourd ou un désalignement, et dont les amplitudes seront plus grandes dans le cas d'une mesure effectuée dans un plan radial.

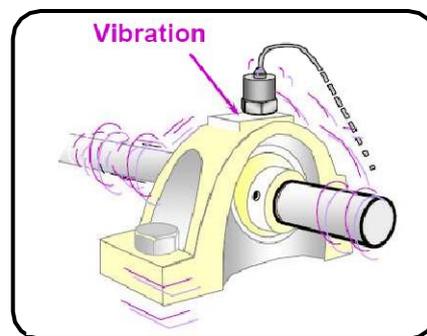


Figure I.16 : Fixation du capteur sur palier

- **Efforts directionnels** : ce sont des efforts liés à une contrainte de l'arbre, générés par exemple par la tension d'une courroie (effort directionnel radial [figure I.17], ou un par le contact d'un engrenage conique (effort directionnel axial).

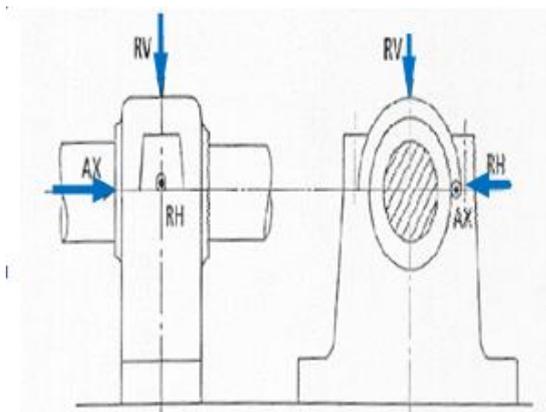


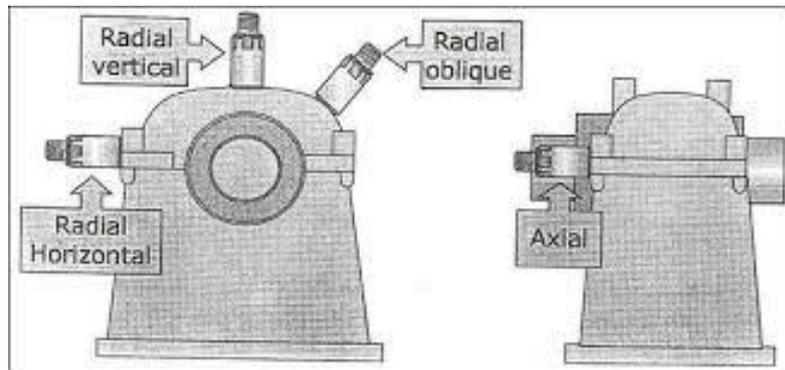
Figure I.17 : Choix directionnel pour la prise de mesure

On note que :

- Bien que l'effort soit constant dans toutes les directions du plan radial, une mesure dans la

direction radiale horizontale donne une valeur d'amplitude plus forte.

- La lecture des valeurs d'amplitude doit tenir compte du temps nécessaire à la prise d'une mesure correcte et de l'estimation des fluctuations de niveaux éventuelles.
- Toute remarque au cours de cette évaluation peut être importante et significative d'un défaut.



**Figure I.18** : Différents types de l'emplacement des capteurs

#### I.4.5.2- Consignes pour la fixation des capteurs

- Les capteurs doivent être placés en liaison aussi directe que possible avec les paliers, en limitant au strict minimum le nombre de pièces assurant l'interface entre l'élément mobile et le capteur.
- L'emplacement 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 perpendiculaires à la direction de mesure.
- Lorsque le palier est difficilement accessible de façon directe, la prise de la mesure est effectuée par un capteur au point judicieusement choisi en fonction des raideurs.
- Les mesures sont effectuées toujours au même endroit sur la machine. Les points de mesure sont repérés, soit par la peinture, soit par la mise en place de goujons.

## I.5- Principes anomalies et leurs fréquences

Table I-2 : Principes défauts et leurs fréquences [7]

Défauts	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 x Fr	Radiale	Intensité proportionnelle à la vitesse de rotation. Déphasage de 90° sur deux Mesures orthogonales.
Défaut de fixation	1, 2, 3, 4 x Fr	Radiale	Aucun déphasage sur deux Mesures orthogonales.
Défaut D'alignement	2 x Fr	Axiale et Radiale	Vibration axiale plus Importante si le défaut d'alignement comporte un écart angulaire.
Vitesse critique de vibration	Fréquence critique du rotor	Radiale	Apparaît en régime Transitoire et s'atténue ensuite.
Détérioration de Roulement	Haute fréquence	Axiale et Radiale	Ondes de chocs dues aux écaillages.

## I.6- Analyse vibratoire

### I.6.1- Définition

L'industrie a progressé dans la maintenance prédictive grâce à l'évolution de la technologie d'analyse des vibrations. Cette technique surveille les machines en mesurant leurs vibrations à l'aide de capteurs spécialisés. Les données sont analysées pour détecter des problèmes tels que l'usure, les déséquilibres et les défauts. L'analyse vibratoire améliore la fiabilité, la sécurité et la rentabilité des machines, en réduisant les coûts de maintenance et en augmentant la productivité et la qualité.

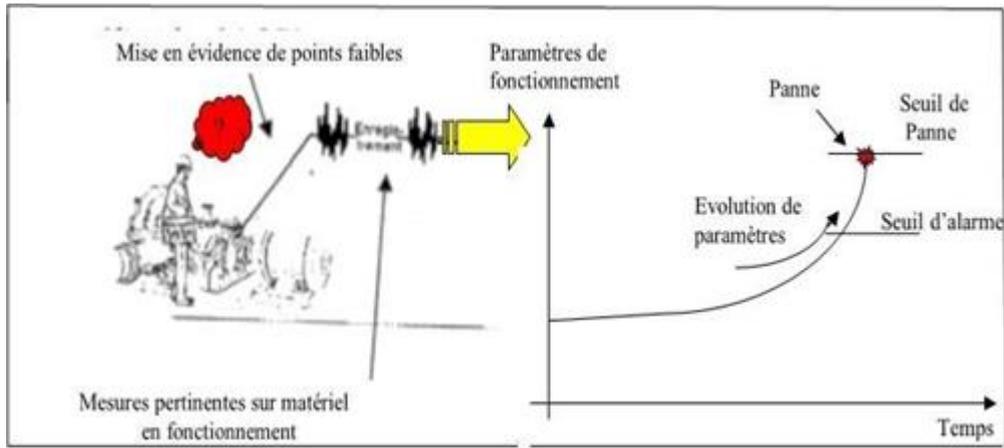


Figure I.19 : Analyse vibratoire

### I.6.2- Objectif

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) **Avantage :**

- Détecter les défauts à un stade précoce.
- réaliser un diagnostic approfondi.
- Autoriser une surveillance continue.
- Permettre de surveiller l'équipement à distance.

#### b) **inconvénient :**

- Spectres parfois difficile à interpréter.
- Installations relativement coûteuses dans le cas de la surveillance continue.

### I.6.3- Surveillance

La surveillance vibratoire consiste de trois stratégies :

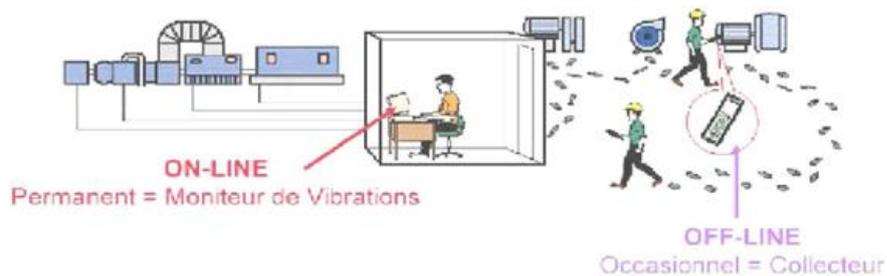
#### a) **Mesure vibratoire en niveau global :**

La comparaison des mesures vibratoires effectuées à intervalles de temps déterminés dans des conditions de fonctionnement identiques permet de suivre l'évolution d'un défaut en exploitant le

signal vibratoire. A partir de ces mesures, il est possible d'obtenir un historique de l'évolution du défaut par rapport à un niveau de référence caractérisé par la signature vibratoire de la machine en bon état. La norme [ISO10816] fixe des critères d'évaluation des niveaux vibratoires permettant d'estimer la sévérité des défauts et donc de l'état de fonctionnement de la machine.

La sévérité vibratoire représente la valeur efficace de la vitesse de vibration mesurée dans la bande fréquentielle [10-1000 Hz] sachant que les critères d'évaluation dépendent de la classe dans laquelle la machine se situe. Mais ces méthodes dites « mesures des niveaux globaux » restent imprécises et ne permettent pas la détermination de la cause de l'augmentation du niveau vibratoire. On distingue alors deux types de surveillances: La surveillance online et offline.

- **On Line:** la machine est surveillée en permanence par un moniteur de vibrations.
- **Off Line :** les mesures sont effectuées lors de rondes à intervalles réguliers. On utilise alors un collecteur de données. Les collecteurs modernes permettent également d'analyser les mesures. [8] [2]



**Figure I.20 :** Types de surveillance vibratoire

### b) Analyse temporelle :

Cette stratégie consiste à suivre, au cours du temps, le comportement vibratoire d'une machine en fonction de ces paramètres de fonctionnement (étude de la vibration d'une turbine lors de son accélération ou sa décélération). Ce type de suivi est simple à exploiter lorsque le signal est simple mais il devient inexploitable lorsque le signal a pour origine des sollicitations multiples.

### c) Analyse spectrale :

L'analyse spectrale consiste à relever le signal vibratoire mesuré sur la machine et de procéder à une analyse systématique pour rechercher la présence d'images vibratoires de l'ensemble des défauts susceptibles d'affecter l'installation considérée. Cela permet d'accéder au diagnostic, c'est à dire, d'identifier avec précision la nature de l'anomalie et si possible en préciser la gravité.

## I.7- Diagnostic

### I.7.1- Définition

Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la défaillance à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test. [1]

### I.7.2- Etapes de Diagnostic

Il peut être effectué en suivant les étapes suivantes:

- **Mesure des vibrations:** consiste à mesurer les vibrations de la machine à l'aide d'un capteur de vibration.
- **Analyse de la vibration :** Après avoir mesuré les vibrations, il est important d'analyser les données pour comprendre l'origine des vibrations. Les données peuvent être analysées à l'aide d'un logiciel d'analyse des vibrations.
- **Identification des fréquences :** L'étape suivante consiste à identifier les fréquences des vibrations, elles peuvent être utilisées pour déterminer les défauts des vibrations cités dans le tableau au-dessous.
- **Inspection visuelle :** Une inspection visuelle de la machine peut également aider à identifier la source des vibrations. Il est important de vérifier l'état des roulements, des courroies, des engrenages, des poulies, etc.
- **Réparation :** En fonction des résultats de l'analyse, des réparations peuvent être nécessaires pour éliminer les vibrations. Les réparations peuvent inclure le remplacement de pièces défectueuses, l'ajustement de la tension de la courroie, la correction de l'alignement, etc.

## I.7.3- Méthodologie de mise en œuvre

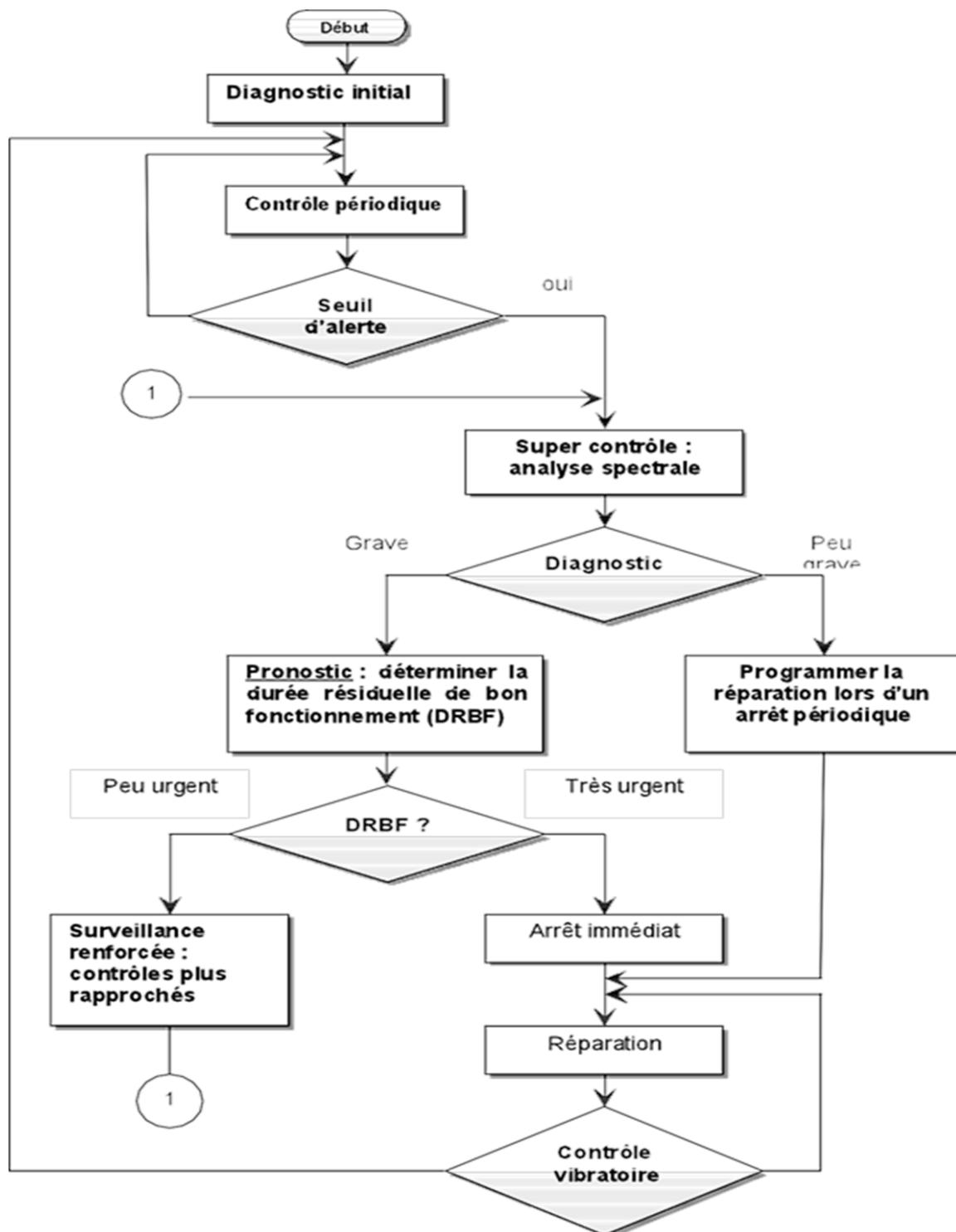


Figure I.21 : Organigramme de la méthodologie de mise en œuvre [3]

## **I.8- Conclusion**

Dans ce chapitre on a conclu que la détection des vibrations dans les machines tournantes est une tâche essentielle pour prévenir les défaillances et éviter les couts inutiles de maintenance. Les capteurs de vibration et les logiciels de surveillance permettent de détecter rapidement les déviations des vibrations normales et d'identifier les problèmes potentiels avant qu'ils deviennent des problèmes majeurs. Ainsi que, l'analyse vibratoire et sans doute la technique la plus diversifiée, et celle qui permet sur les machines d'aller le plus loin dans le diagnostic.

# **CHAPITRE II**

## **II- Description et modélisation électromagnétique**

## II.1- Introduction

Dans ce chapitre, on explore les principes fondamentaux des équations de Maxwell et ses résolutions ainsi que l'utilisation des courants de Foucault pour la détection des vibrations qui est une technique utilisée pour mesurer et surveiller les vibrations et les déformations d'un objet ou d'une structure. Elle repose sur le principe des courants induits dans un matériau conducteur lorsque celui-ci est soumis à un champ magnétique variable.

## II.2- Courants de Foucault

Le courant de Foucault, également connu sous le nom de "effet de Foucault". Ce sont des courants électromagnétiques induits dans un matériau conducteur lorsqu'il est soumis à un champ magnétique alternatif. Ces courants circulent à la surface du matériau et créent leur propre champ magnétique qui s'oppose au champ magnétique d'excitation. Ce phénomène est connu sous le nom d'effet de peau.

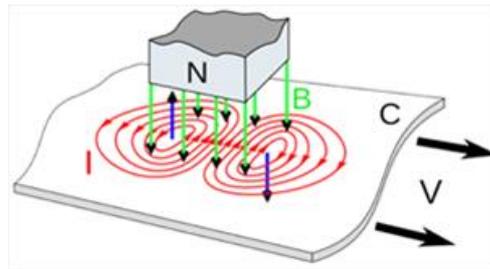


Figure II.1 : Courant de Foucault

### II.2.1- Effet de peau

L'amortissement des courants de Foucault dans le matériau, dans le cas simple d'une onde plane harmonique d'incidence nulle, décroît exponentiellement en fonction de la profondeur du matériau en regard. On définit l'épaisseur de peau par :

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

f : Fréquence d'excitation.

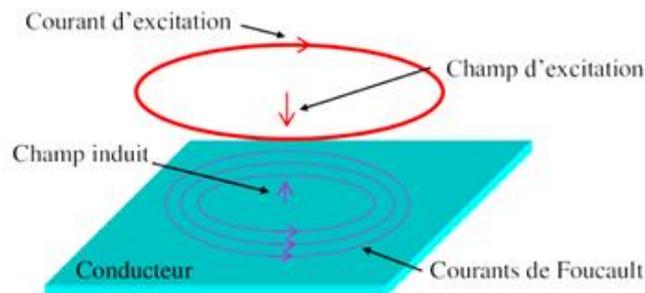
$\sigma$  : Conductivité électrique du matériau

$\mu$  : Perméabilité magnétique du matériau.

Dans le cas général, cette formule rigoureuse mais elle renseigne néanmoins assez précisément sur la profondeur au-delà de laquelle les courants induits sont trop faibles pour être influents. [9]

### II.2.2- Phénomène des courant de Foucault

Dès que l'on soumet des matériaux bons conducteurs de l'électricité à un champ magnétique variable, il se crée dans le matériau des courants électriques générant eux-mêmes un champ magnétique. Suivant les fréquences utilisées, les variations des champs créés par ces courant permettent de détecter des défauts plus ou moins proches de la surface. [10]

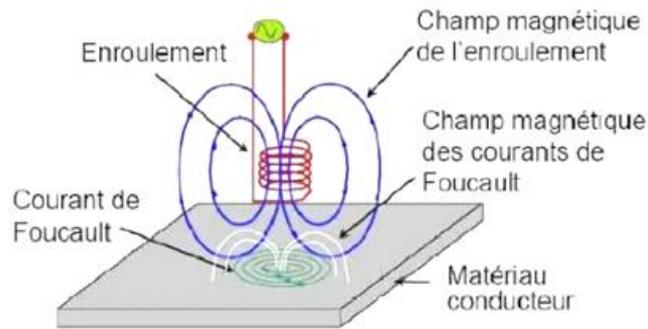


**Figure II.2 :** Phénomène de courant de Foucault

### II.2.3- Méthode de contrôle par courant de Foucault

C'est une méthode importante et largement répandue, comme d'autres méthodes non destructives. Les essais par courants de Foucault permettent la mesure des propriétés physiques, de dimensions ou la détection des vibrations.

Les systèmes d'essai par courant de Foucault ont beaucoup d'avantages qui justifient leur large utilisation. En générale, les essais par courant de Foucault fournissent des mesures presque instantanées, en conséquence ils peuvent être employés dans des chaînes pour examiner des barres en mouvement, des tubes, des tôles, l'état des soudures...etc. [11]



**Figure II.3 :** Principe de détection par courant de Foucault

Il existe plusieurs méthodes de contrôle par courant de Foucault parmi ces méthodes on définit :

**Table II-1 :** Methodes de controle par courant de foucault

Méthode	Définition
Méthode de pont	Elle consiste à mesurer les différences de signal électrique entre deux bobines qui sont disposées de part et d'autre de l'objet inspecté.
Méthode de phase	Elle consiste à mesurer la différence de phase entre le champ magnétique induit et le courant de Foucault dans l'objet inspecté, pour détecter des défauts de surface ou de profondeur.
Méthode de bobinage	Elle consiste à utiliser une bobine d'induction pour générer le champ magnétique, et à mesure le champ magnétique induit à l'aide d'une seconde bobine.
Méthode de balayage	Elle consiste à déplacer une sonde sur la surface de l'objet inspecté, en utilisant un capteur pour détecter les variations du champ magnétique induit par les courants de Foucault.

## II.2.4- Avantages et inconvénients

**Table II-2 :** Avantages et inconvénients des courants de Foucault

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Détecter les défauts de surface et de sous-surface dans les matériaux conducteurs tels que les métaux.</li> <li>• Le courant de Foucault ne nécessite pas de contact physique avec le matériau à inspecter, ce qui le rend adapté à l'inspection de surfaces délicates ou difficiles d'accès.</li> <li>• Le courant de Foucault ne nécessite pas de contact physique avec le matériau à inspecter, ce qui le rend adapté à l'inspection de surfaces délicates ou difficiles d'accès.</li> <li>• Les techniques de détection de défauts basées sur le courant de Foucault peuvent être rapides et permettent de détecter des défauts de manière efficace.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les équipements nécessaires pour générer des courants de Foucault peuvent être coûteux, en particulier pour les applications à grande échelle</li> <li>• Les techniques de détection de défauts basées sur le courant de Foucault peuvent être complexes et nécessitent une formation spécialisée pour être utilisées efficacement.</li> <li>• Le courant de Foucault ne peut pénétrer qu'à une profondeur limitée dans le matériau, ce qui peut limiter sa capacité à détecter les défauts de profondeur.</li> </ul>

## II.2.5- Fondements du magnétisme dans les capteurs de vibration inductifs

Le magnétique dans les capteurs de vibration par courant de Foucault est basé sur le principe de l'induction électromagnétique. Le courant de Foucault est généré lorsque des conducteurs circulent près d'un champ magnétique variable.

- Dans les capteurs de vibration par courant de Foucault, un aimant permanent est utilisé pour créer un champ magnétique variable qui induit un courant dans un conducteur proche. Lorsque le système est en vibration, le conducteur subit des forces qui modifient sa position et sa distance par rapport à l'aimant permanent, ce qui induit un changement dans le champ magnétique et donc dans le courant de Foucault.

- La mesure du courant de Foucault permet de déterminer la position et l'amplitude de la vibration du conducteur, permettant ainsi de détecter les vibrations non désirées dans les machines et les structures.
- Le magnétisme dans les capteurs de vibration par courant de Foucault est un résultat de l'induction électromagnétique utilisé pour mesure les vibrations et la santé des structures.

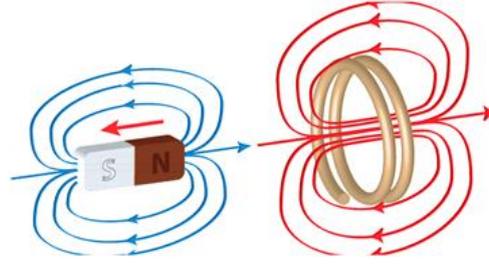
### **II.2.5.1- Surveillance des vibrations par courant de Foucault**

Les courants de Foucault peuvent également être utilisés pour surveiller les vibrations des machines en temps réel. Les capteurs de courant de Foucault peuvent être installés sur des pièces métalliques qui vibrent, telles que les arbres, les roulements et les engrenages. Lorsque la pièce vibre, les champs électromagnétiques à proximité de la surface de la pièce changent également. Les capteurs de courant de Foucault peuvent détecter ces changements et fournir des informations sur les vibrations [12].

### **II.2.5.2- Courant de Foucault et loi de Lenz**

La loi de Lenz et les courants de Foucault sont deux concepts liés à l'induction électromagnétique. La loi de Lenz, énoncée par le physicien russe Heinrich Lenz, indique le sens du courant induit dans un circuit lorsque le flux magnétique à travers ce circuit change. Elle stipule que ce courant induit circule pour s'opposer à la variation du flux magnétique qui l'a engendré.

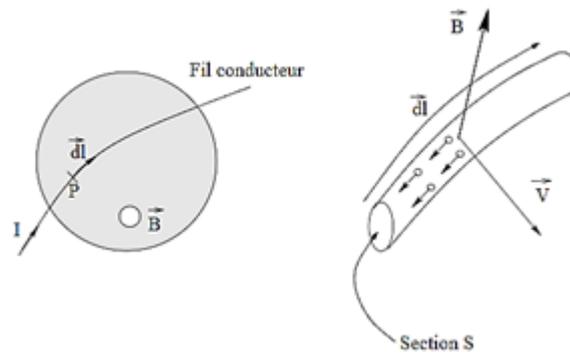
- La loi de Lenz stipule que le courant induit circule de manière à créer un champ magnétique qui s'oppose à la variation du champ magnétique extérieur. Ainsi, lorsque des courants de Foucault se forment dans un matériau conducteur en réponse à un champ magnétique variable, leur direction est déterminée par la loi de Lenz afin de s'opposer au changement du champ magnétique externe.
- Quant aux courants de Foucault, ce sont des courants électriques induits qui se forment dans des conducteurs lorsque ces derniers sont soumis à un champ magnétique variable. Ils se manifestent principalement dans des matériaux conducteurs tels que les métaux.



**Figure II.4 :** Loi de Lenz Induction électromagnétique

### II.2.6- Interaction entre le champ magnétique et les courants induits

L'interaction entre le champ magnétique et les courants induits est un concept fondamental en électromagnétisme. Il se fait, Lorsqu'un conducteur est exposé à un champ magnétique qui change, des courants induits se forment à l'intérieur du conducteur en réponse à cette variation du champ. Cette interaction est régie par les lois de Faraday et de Lenz. Selon la loi de Faraday, toute variation du flux magnétique à travers une surface fermée crée une force électromotrice induite dans un conducteur situé dans ce champ.



**Figure II.5 :** Interaction électromagnétique

### II.2.7- Caractéristique des capteurs de vibration par courant de Foucault

Les caractéristiques spécifiques des capteurs de vibration par courants de Foucault peuvent varier en fonction du modèle, du fabricant et des paramètres d'application spécifiques. Ils possèdent des caractéristiques distinctives. Voici les principales d'entre elles :

- **Non-contact** : Ces capteurs fonctionnent sans contact direct avec la surface vibrante. Ils utilisent le champ magnétique pour détecter les vibrations, évitant ainsi l'usure, la friction et les problèmes liés au contact physique.
- **Réponse linéaire**: Les capteurs de vibration par courants de Foucault offrent généralement une réponse linéaire. La sortie du capteur est proportionnelle à l'amplitude des vibrations détectées, facilitant l'interprétation des mesures et simplifiant la calibration.
- **Sensibilité élevée** : Les capteurs de vibration par courants de Foucault offrent une sensibilité élevée, ce qui leur permet de détecter de petites vibrations et de fournir des mesures précises. Les variations du champ magnétique induites par les courants de Foucault sont proportionnelles à l'amplitude des vibrations, permettant une détection sensible.
- **Insensibilité aux environnements hostiles** : Ces capteurs peuvent fonctionner dans des environnements hostiles tels que des températures élevées, des vibrations mécaniques intenses, des atmosphères corrosives ou des milieux sales. Ils sont robustes et résistants aux conditions difficiles.
- **Temps de réponse rapide** : Les capteurs de vibration par courants de Foucault offrent un temps de réponse rapide, fournissant des mesures en temps réel. Ils conviennent aux applications nécessitant une détection dynamique des vibrations, comme le contrôle des machines et la surveillance des structures.
- **Mesures multiaxes possibles** : Ces capteurs peuvent mesurer les vibrations dans différentes directions, permettant une détection multiaxes des vibrations et une évaluation complète des mouvements vibratoires.

### II.2.7.1- Sensibilité et résolution du capteur

La sensibilité et la résolution sont des caractéristiques distinctes mais interdépendantes. Une plus grande sensibilité peut améliorer la résolution en permettant la détection de plus petites différences de signal. De même, une résolution plus élevée peut permettre de détecter des variations plus subtiles, augmentant ainsi la sensibilité perçue du capteur.

- La sensibilité d'un capteur fait référence à sa capacité à détecter de petites variations dans le signal mesuré. Plus le capteur est sensible, plus il peut détecter de faibles changements ou de petites quantités de l'élément mesuré. La sensibilité est généralement exprimée en termes de la plus petite Variation détectable par le capteur, appelée limite de détection.

- La résolution d'un capteur fait référence à sa capacité à distinguer et à mesurer des valeurs différentes du signal d'entrée. Elle est généralement exprimée en termes de la plus petite différence détectable entre deux valeurs de mesure adjacentes. Par exemple, un capteur de résolution 10 bits peut distinguer et mesurer 1024 valeurs différentes ( $2^{10}$ ) entre sa valeur minimale et maximale. Une résolution élevée permet d'obtenir une précision plus fine dans la mesure.

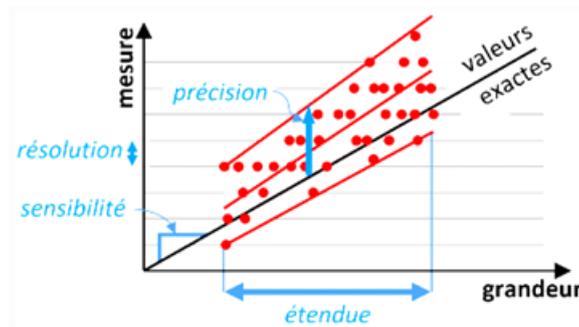


Figure II.6 : Caractéristique d'un capteur

### II.2.7.2- Gamme de fréquence de détection

La gamme de fréquence de détection d'un capteur fait référence à l'intervalle de fréquences dans lequel il est capable de détecter et mesurer des signaux. Chaque capteur est conçu pour fonctionner dans une certaine plage de fréquences spécifiée par le fabricant. Ces spécifications donnent des informations précises sur les fréquences minimales et maximales que le capteur est capable de détecter avec précision. Elle peut varier considérablement en fonction du type de capteur et de son application spécifique.

### II.2.8- Impact des matériaux et de la distance de détection

Les matériaux et la distance de détection ont un impact significatif sur les performances des capteurs. Voici comment ils peuvent influencer la détection :

- **Absorption** : Certains matériaux peuvent absorber ou atténuer le signal détecté par le capteur, ce qui peut réduire sa sensibilité. Par exemple, un matériau opaque peut bloquer la transmission de la lumière à travers un capteur optique.
- **Réflexion** : Certains matériaux peuvent réfléchir ou diffuser le signal détecté. Cela peut entraîner des variations de la force du signal reçu et affecter la précision de la mesure. Par

exemple, la réflexion des ondes sonores par des surfaces réfléchissantes peut entraîner des échos et une distorsion des mesures.

- **Conductivité électrique** : Les matériaux conducteurs peuvent interférer avec les capteurs électriques et magnétiques en perturbant le champ électrique ou magnétique environnant. Cela peut entraîner des erreurs.

## II.3- Etude électromagnétique

### II.3.1- Equations de Maxwell

Les équations de Maxwell sont l'expression la plus générale des lois classiques de l'électromagnétisme. Ils forment un modèle général pour décrire le comportement et les interactions des champs électriques et magnétiques et de leurs sources respectives : densité de charge et de courant [13]. Elles s'expriment sous la forme suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Max-Ampère : } \text{rot } \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \text{Max-Faraday : } \text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \text{Max-Thomson : } \text{div } \vec{B} = 0 \\ \text{Max-Gauss : } \text{div } \vec{D} = \rho \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{(II.2)} \\ \text{(II.3)} \\ \text{(II.4)} \\ \text{(II.5)} \end{array}$$

Avec :

$\vec{E}$ : Champ électrique [V / m]

$\vec{H}$ : Champ magnétique [A / m]

$\vec{B}$ : Induction magnétique [T]

$\vec{D}$ : Induction électrique [C / m<sup>2</sup>]

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

$\rho$  : Densité volumique des charges électriques [C / m<sup>3</sup>]

### II.3.2- Lois de comportements des milieux

Pour une définition exhaustive des phénomènes électromagnétiques à l'intérieur d'un milieu, il est nécessaire d'inclure les lois de comportement propres à ce milieu auxquelles on les applique [14]

:

- Dans le vide :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (\text{II.6})$$

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} \quad (\text{II.7})$$

- Milieu diélectrique :

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (\text{II.8})$$

- Milieu magnétique :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{II.9})$$

- Milieu conducteur :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{II.10})$$

Avec:

$\varepsilon$  : Permittivité électrique du milieu [F/m]

$\varepsilon_0$  : Permittivité électrique du vide [F / m]

$\mu$  : Perméabilité magnétique [H / m]

$\sigma$  : Conductivité électrique [S / m]

$\mu_0$  : Perméabilité magnétique du vide [H / m]

### II.3.3- Equations maxwell en régime quasi-stationnaire :

Les équations précédentes décrivent globalement les phénomènes électromagnétiques et s'appliquent à des états quelconques. Mais Dans la pratique, C'est en fonction du domaine d'utilisation on simplifie ces équations dans le but d'avoir des modèles plus simples, dont le courant de déplacement est négligé devant le courant d'induction, ainsi que la densité de charge volumique nulle, alors l'équation (II.5) ne sera pas exploitée dans notre cas.

On peut donc établir les équations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} r\vec{\partial}t\vec{H} = \vec{J} \\ r\vec{\partial}t\vec{E} = -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \text{div}\vec{B} = 0 \end{array} \right. \quad (\text{II.11})$$

$$(\text{II.12})$$

$$(\text{II.13})$$

### II.3.4- Notion du potentiel magnétique vecteur :

Les équations de Maxwell forment un système différentiel de premier ordre qui implique un grand nombre de variables. En utilisant le potentiel magnétique vecteur, on peut diminuer le nombre

d'inconnues dans le système. Le champ magnétique dérive un vecteur, c'est-à-dire qu'il existe au moins un potentiel vecteur tel que :

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A} \quad (\text{II.14})$$

Le vecteur  $\vec{A}$  n'a pas de solution unique car le rotationnel du gradient de toute fonction scalaire est nul ( $\text{rot}(\text{grad} \varphi) = 0$ ). Par conséquent, tout vecteur ( $\vec{A} + \text{grad} \varphi$ ) satisfait la relation (II.4). Pour garantir l'unicité de  $\vec{A}$ , il est suffisant d'imposer une condition de jauge [15], telle que :

$$\text{div} \vec{A} = 0 \quad (\text{II.15})$$

À partir des équations (II.3) et (II.14), on déduit :

$$\text{rot} \left( \vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (\text{II.16})$$

Étant donné que le rotationnel du gradient de toute fonction scalaire  $V$  est nul, le champ  $\vec{E}$  varie dans le temps en fonction du potentiel vecteur magnétique  $\vec{A}$  et dans l'espace en fonction du potentiel scalaire électrique  $V$ , tel que :

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \text{grad} V \quad (\text{II.17})$$

### II.3.5- Equation de diffusion généralisée :

La densité de courant se déduit de l'équation (II.17) et (II.10) :

$$\vec{J} = -\sigma \left( \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \text{grad} V \right) \quad (\text{II.18})$$

Avec :

$\sigma$  : conductivité électrique [ohm / m]

$J$  : Densité de courant [A / m<sup>2</sup>]

En combinant les équations (II.11), (II.14) et (II.6), on obtient :

$$\text{rot}(\text{rot} \vec{A}) = \mu_0 \vec{J} \quad (\text{II.19})$$

On obtient alors l'équation de diffusion généralisée du potentiel vecteur magnétique :

$$\text{rot}(\text{rot}\vec{A}) + \mu_0\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\mu_0\sigma \text{grad}V \quad (\text{II.20})$$

### II.3.6- Formule de Biot et Savart

Le théorème d'Ampère ne permet de déterminer le champ magnétique que dans des situations très symétrique de telle sorte que l'on puisse évaluer facilement la circulation du champ magnétique. Ceci limite sa facilité d'application mais pas sa validité. La loi de Biot et Savart considère un circuit de forme quelconque dans lequel circule un courant  $I$  [16]. Selon cette loi, chaque élément du circuit ( $d\vec{l}$ ) participe à la création d'un champ magnétique en tout point de l'espace suivant une relation qui s'écrit :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_c \frac{I d\vec{l} \times \vec{u}}{r^2} \quad (\text{II.21})$$

Où :

$\vec{u}$  : Représente le vecteur unitaire entre l'élément du circuit et le point considéré.

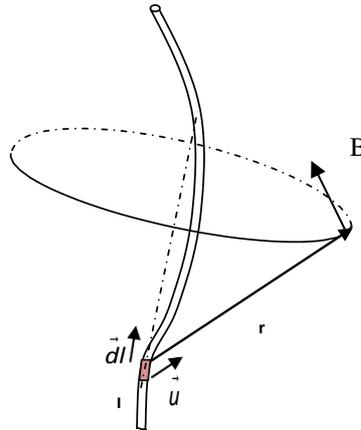


Figure II.7: Représentation vectorielle

## II.4- Méthodes de résolution

Les problèmes d'électromagnétisme traités préalablement dans ce chapitre sont d'une grande complexité en termes de résolution. Une approche de résolution numérique approximative peut constituer un moyen de remédier à cela. Par la suite, on présente brièvement les méthodes de résolution fréquemment utilisées.

### II.4.1- Méthodes analytiques

Dans la majorité des cas, les méthodes analytiques sont utilisées pour la modélisation des configurations ayant des structures électromagnétiques et géométriques simples. Les modèles électromagnétique et géométrique traités sont respectivement linéaires et unidimensionnels ou bidimensionnels mais rarement tridimensionnels. Outre les méthodes analytiques comme celle de séparation des variables, on distingue plusieurs outils analytiques de formulation d'un problème électromagnétique (noyau de Green, équation de Fredholm, loi de Biot et Savart, théorème de réciprocité de Lorentz, théorème des images utilisé en optique, etc.).

### II.4.2- Méthodes Numériques

Avec l'évolution de l'outil informatique, l'utilisation des méthodes numériques pour la résolution de cette catégorie d'équations se généralise de plus en plus. Les méthodes numériques les plus connues sont : la méthode des intégrales, la méthode des différences finies, la méthode des volumes finis et la méthode des éléments finis. Nous devons cependant signaler que ces méthodes exigent des temps de calcul relativement longs et des espaces mémoires considérablement grands, donc des outils informatiques développés [16].

### II.4.3- Méthodes semi-analytiques

Ce sont des méthodes qui utilisent simultanément des expressions analytiques et des résolutions numériques, elles ont été élaborés afin d'alléger le temps de simulation et d'avoir des résultats proches de la réalité [15].

Dans notre cas, on opte pour l'utilisation de la méthode des circuits couplés. Cette méthode repose sur l'application de la loi de Biot et Savart aux grandeurs électromagnétiques. Il convient de noter que cette méthode ne résout pas directement l'équation de diffusion (II.20). Au lieu de cela, elle se base sur la résolution de l'équation de Poisson (II.19), qui établit la relation entre le champ magnétique  $H$  et sa source  $J$ . Par la suite, la solution obtenue est combinée avec l'équation (II.17), où ce même champ magnétique devient à son tour la source de cette densité du courant.

## II.5- Modèle général et loi de Biot et Savart

Pour décrire les phénomènes électromagnétiques de manière optimale, il est recommandé de simplifier les équations de Maxwell en un système de deux équations couplées exprimant le potentiel vecteur magnétique et la densité de courant de manière couplée.

### II.5.1- Formulation intégrale des équations

A partir de cette forme vectorielle :

$$r\vec{ot}(r\vec{ot}\vec{A}) = g\vec{rad}(\text{div}\vec{A}) - \Delta\vec{A} \tag{II.22}$$

Et selon l'équation (II.14), l'équation (II.22) devient :

$$r\vec{ot}(r\vec{ot}\vec{A}) = -\Delta\vec{A} \tag{II.23}$$

On aura donc :

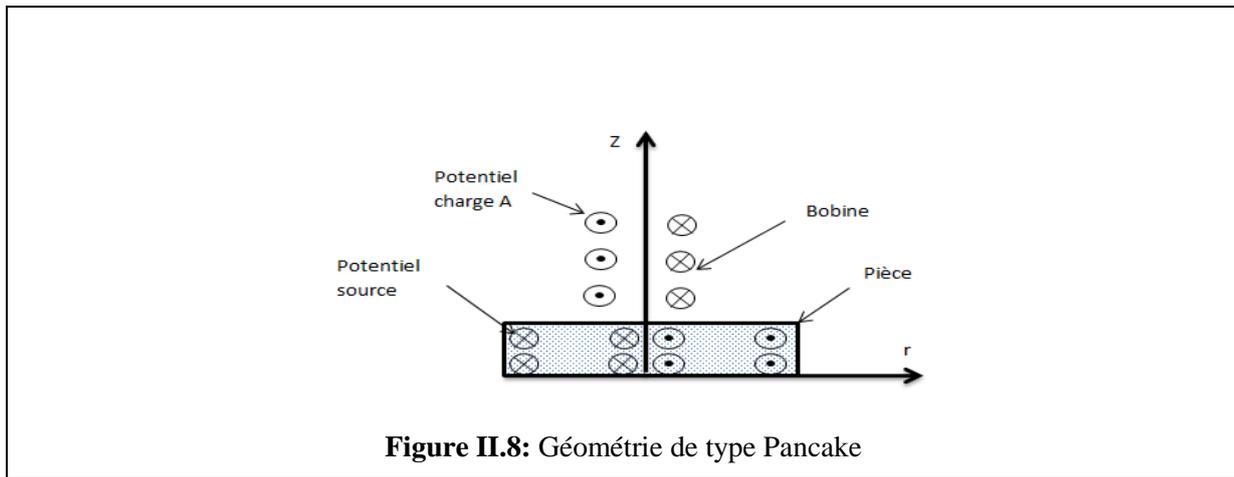
$$r\vec{ot}(r\vec{ot}\vec{A}) = -\text{div}(g\vec{rad}A) \Rightarrow \text{div}(g\vec{rad}A) = -\mu_0\vec{J} \tag{II.24}$$

Si on considère le cas amagnétique linéaire, le problème se simplifie en résolvant les deux équations couplées suivantes :

$$\begin{cases} \text{div}(g\vec{rad}A) = -\mu_0\vec{J} & \text{(a)} \\ \vec{J} = -\sigma\left(\frac{\partial\vec{A}}{\partial t} + g\vec{rad}V\right) & \text{(b)} \end{cases} \tag{II.25}$$

### II.5.2- Formulation bidimensionnelles en coordonnées cylindrique

En prenant en compte la configuration où une bobine (capteur) est placée en face d'une charge plane (pièce), en négligeant l'effet de l'inductance des spires, ce système présente une symétrie de révolution. Ainsi, le problème se réduit à une dimension bidimensionnelle. [11]



Le potentiel se simplifie a une composante suivant l'axe  $\theta$ , appelée composante azimutale, qui dépend uniquement des variables r et z.

D'où :

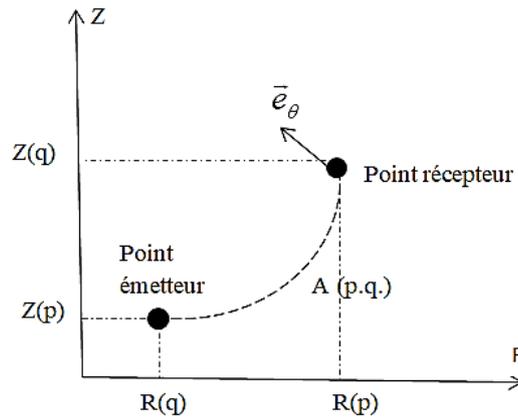
$$\begin{cases} \vec{A} = A_\theta(r, z)\vec{e}_\theta & \text{(a)} \\ \vec{J} = J_\theta(r, z)\vec{e}_\theta & \text{(b)} \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

A, J seront considérés dans la suite de l'étude comme étant des scalaire et sont égaux respectivement à  $A_\theta, J_\theta$ .

Donc le système examiné se réduit à :

$$\begin{cases} \text{div}(\text{grad}A_\theta) = -\mu_0 J_\theta & \text{(a)} \\ J_\theta = -\sigma \left( \frac{\partial A_\theta}{\partial t} + \text{grad}V \right) & \text{(b)} \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

L'effet électromagnétique d'un point q (pièce) en mouvement, sur un point p (bobine) est représenté sur la figure (II.9) :



**Figure II.9:** Effet mutuel entre deux points quelconques

Cet effet se décrit par les équations de Maxwell simplifiées suivantes :

$$\begin{cases} \text{div}(\text{grad}A(p)) = \mu_0 J(q) & \text{(a)} \\ \frac{J(p)}{\sigma(p)} + \frac{dA(p,q)}{dt} = -\text{grad}V(p) \cdot \vec{e}_\theta & \text{(b)} \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

L'équation (II.27.a) traduit, que la densité de courant  $J(q)$  au point  $q$ , est la source du potentiel vecteur  $A(p,q)$  au point  $p$ . L'équation (II.28.b) définit le phénomène d'induction, telle que la densité de courant  $J(p)$  est induite sous la variation temporelle du potentiel magnétique  $A(p,q)$  et spatiale du potentiel  $V(p)$ . D'où le nom des « grandeurs électromagnétiques couplées ». [15]

## II.6- Système axisymétrique

### II.6.1- Expression analytique du potentiel vecteur magnétique

Pour résoudre le système d'équations (II.28), on commence par rechercher la solution de l'équation (II.28.a) dans le vide, qui sera ensuite utilisée dans l'équation (II.28.b). Cela forme le système d'équations à résoudre. L'équation (II.28.a), connue sous le nom d'équation de Poisson vectoriel, peut être résolue en utilisant la transformation de Fourier, dont le résultat est simplement l'expression du potentiel vectoriel magnétique de Biot et Savart [15].

$$A(p, q) = \frac{\mu_0}{2\pi} \iiint_{\tau} \frac{J(q)d\tau}{|op - oq|} \tag{II.29}$$

Le potentiel  $A(p)$  est déterminé en fonction des coordonnées des points  $p$ , où l'on calcule ce potentiel, et  $q$ , où se trouve la densité de courant  $J(q)$  qui est la source de ce potentiel. Ces deux points peuvent appartenir ou non au même domaine. La section de la spire  $s(q)$  et le contour  $(c)$  sont parcourus par une intensité de courant  $J(q) d\tau$ .

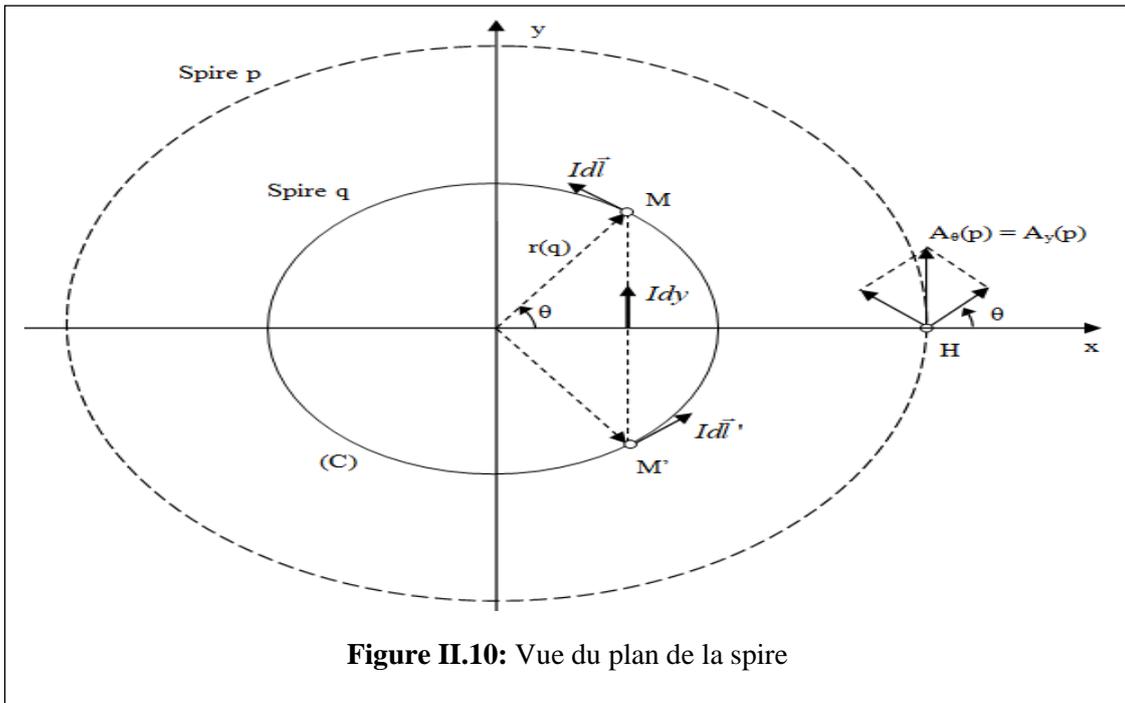


Figure II.10: Vue du plan de la spire

On fait l'hypothèse, de manière approximative, que le courant reste constant dans la section de la spire.

$$\begin{cases} J(q)d\tau = I(q)dl & \text{(a)} \\ I(q) = J(q)s(q) & \text{(b)} \end{cases} \quad \text{(II.30)}$$

On suppose qu'un courant circule dans la spire q de circonférence c située dans le plan xoy à une hauteur z(q). Cette spire génère un potentiel vecteur magnétique au un point p tangent à une circonférence de centre o. l'équation (II.29) devient :

$$\vec{A}(p, q) = A_\theta(p, q)\vec{e}_\theta = \frac{\mu_0}{4\pi} I(q) \int_c \frac{\vec{dl}}{|\vec{op} - \vec{oq}|} \quad \text{(II.31)}$$

Le point q est représenté par les points M et M'. L'association de I(q) dl avec son symétrique I(q) dl', revient à considérer un courant Idy porté par l'axe oy. Ce dernier produit un potentiel vecteur magnétique au point p parallèle à l'axe oy (figure II.10).

$$A_\theta(p) = A_y(p) = \frac{\mu_0 I(q)}{2\pi} \int_c \frac{dy}{\|MP\|} \quad \text{(II.32)}$$

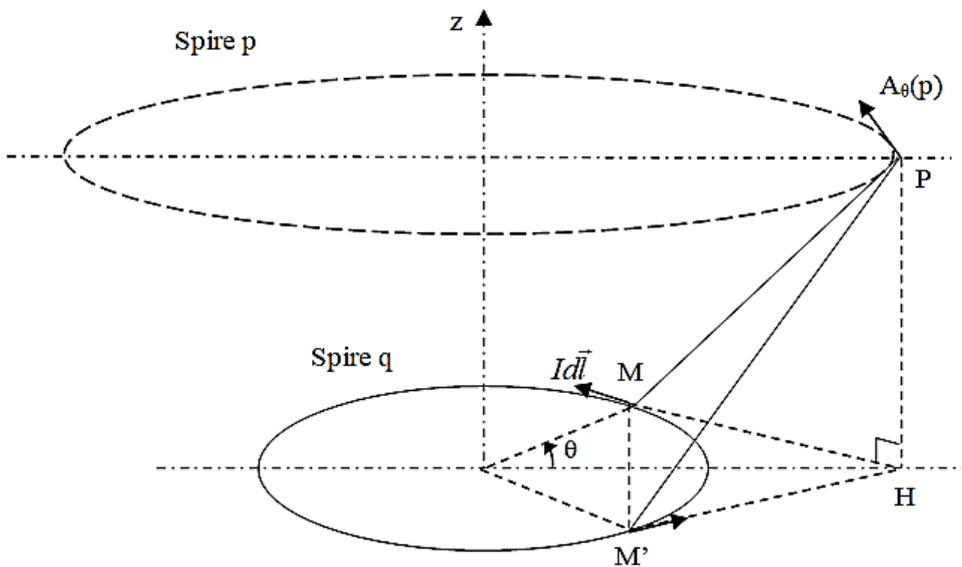


Figure II.11: Potentiel vecteur magnétique créé par une spire circulaire

A partir de la figure (II.10), on exprime les paramètres et les variables comme suit :

$$\begin{cases} y = r(q) \sin \theta & \text{(a)} \\ dy = r(q) \cos \theta d\theta & \text{(b)} \end{cases} \quad \text{(II.33)}$$

$$\begin{cases} \|\overline{MP}\| = \sqrt{\overline{MH}^2 + [z(p) - z(q)]^2} & \text{(a)} \\ \overline{MH}^2 = (\overline{OH} - \overline{OM})^2 = \overline{OH}^2 + \overline{OM}^2 - 2\|\overline{OM}\|\|\overline{OH}\|\cos \theta & \text{(b)} \end{cases} \quad \text{(II.34)}$$

Étant donné que les points M et H se trouvent respectivement sur les contours des spires q et p, on déduit :

$$\begin{cases} \|\overline{OM}\| = r(q) \text{ et } \|\overline{OH}\| = r(p) & \text{(a)} \\ \|\overline{OH}\| = \sqrt{r^2(q) + r^2(p) - 2r(q)r(p)\cos \theta + [z(p) - z(q)]^2} & \text{(b)} \end{cases} \quad \text{(II.35)}$$

Après introduction des expressions (II.35.a) et (II.35.b) dans l'expression du potentiel (II.32), on aboutit à :

$$A_\theta(p) = \frac{\mu_0 I(q)}{2\pi} \int_0^\pi \frac{r(q) \cos \theta d\theta}{\sqrt{r^2(q) + r^2(p) - 2r(q)r(p)\cos \theta + [z(p) - z(q)]^2}} \quad \text{(II.36)}$$

En vue de ramener l'expression (II.36) à une expression composée de fonctions connues, on introduit d'autres paramètres et après le changement de variables ci-dessous :

$$\begin{cases} \theta = \pi - 2\varphi \Rightarrow \begin{cases} d\theta = -2d\varphi \\ \cos \theta = -2\sin^2 \varphi - 1 \end{cases} & \text{(a)} \\ k = \sqrt{\frac{4r(p)r(q)}{[r(p) + r(q)]^2 + [z(p) - z(q)]^2}} & \text{(b)} \end{cases} \quad \text{(II.37)}$$

On aboutit à l'expression suivante :

$$A_\theta(p) = \frac{\mu_0 I(q)}{2\pi} \sqrt{\frac{r(q)}{r(p)}} k \int_0^{\pi/2} \frac{2\sin^2 \varphi - 1}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi}} d\varphi \quad \text{(II.38)}$$

$$\text{En notant que : } \frac{k^2 \sin^2 \varphi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi}} = \frac{1}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi}} - \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi} \quad \text{(II.39)}$$

L'expression (II.38) devient :

$$A_\theta(p) = \frac{\mu_0 I(q)}{2\pi} k \sqrt{\frac{r(q)}{r(p)}} \left[ \frac{2}{k^2} - 1 \int_0^{\pi/2} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi}} - \frac{2}{k^2} \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi} d\varphi \right] \quad \text{(II.40)}$$

En faisant intervenir les fonctions elliptiques de Legendre  $E_1(k)$  et  $E_2(k)$  respectivement de première et de deuxième espèce donnée ci-dessous :

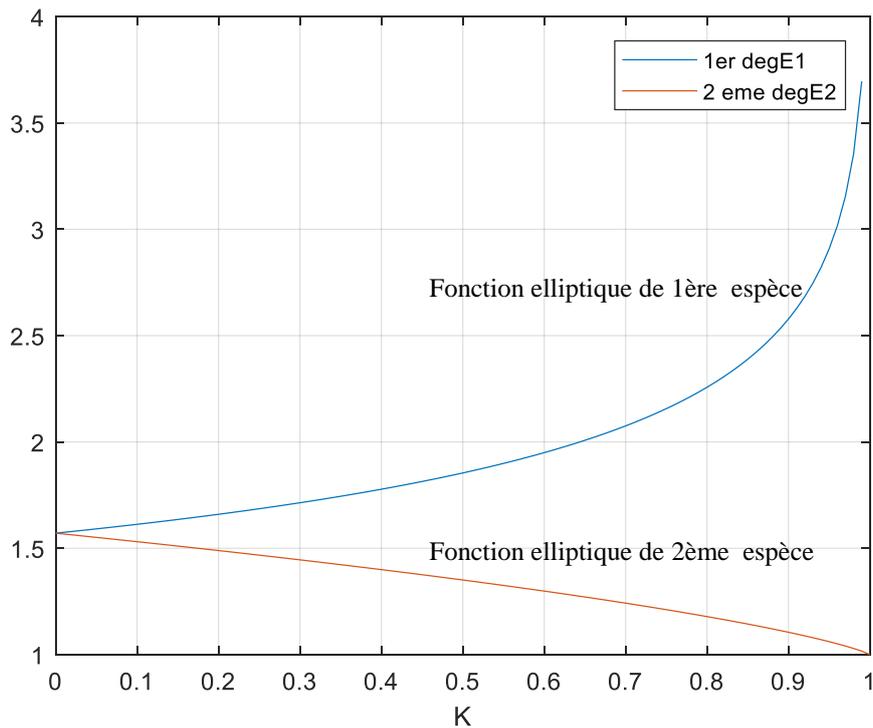
$$\begin{cases} E_1(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\varphi}{\sqrt{1-k^2 \sin^2 \varphi}} & \text{(a)} \\ E_2(k) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-k^2 \sin^2 \varphi} d\varphi & \text{(b)} \end{cases} \quad (\text{II.41})$$

On obtient finalement une expression du potentiel vecteur magnétique composée de ces fonctions de Legendre.

$$A_\theta(p) = \frac{\mu_0 I(q)}{2\pi} \sqrt{\frac{r(q)}{r(p)}} \frac{(2-k^2)E_1(k) - 2E_2(k)}{k} \quad (\text{II.42})$$

Une première étude approximative peut être faire en considérant deux circonférences de rayons identiques. Dans ce cas, la variation du potentiel en fonction de  $k$  peut se ramener à celle de la figure(II.12) de la fonction  $E(k)$  composée des fonctions elliptiques, telle que :

$$E(k) = \frac{(2-k^2)E_1(k) - 2E_2(k)}{k} \quad (\text{II.43})$$



**Figure II.12:** Fonction elliptique  $E_1(k)$  et  $E_2(k)$

En introduisant :  $G(k) = \sqrt{\frac{r(q)}{r(p)}} E(k)$  (II.44)

L'expression (II.42) devient alors :

$$A_\theta(p, q) = \frac{\mu_0 I(q)}{2\pi} G(k) \quad (\text{II.45})$$

## II.6.2- Expression analytique de l'induction magnétique

L'induction magnétique dans une configuration axisymétrique [16] s'écrit :

$$\vec{B} = r\vec{\omega}t\vec{A} = -\frac{\partial A}{\partial t}\vec{e}_r + \frac{1}{r}\frac{\partial(rA)}{\partial z}\vec{e}_z = B_r\vec{e}_r + B_z\vec{e}_z \quad (\text{II.46})$$

$$\begin{cases} B_r(p, q) = -\frac{\partial A(p, q)}{\partial z} & \text{(a)} \\ B_z(p, q) = \frac{1}{r(p)}\frac{\partial\{r(p)A(p, q)\}}{\partial r} = \frac{A(p, q)}{r(p)} + \frac{\partial A(p, q)}{\partial r} & \text{(b)} \end{cases} \quad (\text{II.47})$$

En remplaçant le potentiel vecteur par son expression en fonction de G(p,q), on obtient :

$$\begin{cases} B_r(p, q) = -\frac{\mu_0}{2\pi} I(q)\frac{\partial G(p, q)}{\partial z} & \text{(a)} \\ B_z(p, q) = -\frac{\mu_0}{2\pi} I(q)\left(\frac{G(p, q)}{r(p)} + \frac{\partial G(p, q)}{\partial r}\right) & \text{(b)} \end{cases} \quad (\text{II.48})$$

On calcule les dérivées de  $G[k(p, p_e)]$  par rapport aux coordonnées et cela en faisant apparaître le paramètre k, tel que :

$$\begin{cases} \frac{\partial G(k)}{\partial r} = \sqrt{\frac{r(q)}{r(p)}}\left(\frac{\partial E(k)}{\partial k}\frac{\partial k}{\partial r} - \frac{E(k)}{2r(p)}\right) & \text{(a)} \\ \frac{\partial G(k)}{\partial z} = \sqrt{\frac{r(q)}{r(p)}}\left(\frac{\partial E(k)}{\partial k}\frac{\partial k}{\partial z}\right) & \text{(b)} \end{cases} \quad (\text{II.49})$$

$$\begin{cases} \frac{\partial k}{\partial r} = \frac{k}{2r(p)} - \frac{r(p)+r(q)}{4r(p)r(q)}k^3 & \text{(a)} \\ \frac{\partial k}{\partial z} = -\frac{z(p)-z(q)}{4r(p)r(q)}k^3 & \text{(b)} \end{cases} \quad (\text{II.50})$$

$$\frac{dE(k)}{dk} = -\left(1 + \frac{2}{k^2}\right)E_1(k) + \frac{2}{K^2}E_2(k) + \frac{dE_1(k)}{dk} - \frac{2}{k}\frac{dE_2(k)}{dk} \quad (\text{II.51})$$

On effectue la dérivation de l'équation (II.41), on obtient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dE_1(k)}{dk} = \frac{E_2(k) - (1 - k^2)E_1(k)}{(1 - k^2)} \quad (a) \\ \frac{dE_2(k)}{dk} = \frac{E_2(k) - E_1(k)}{k} \quad (b) \end{array} \right. \quad (II.52)$$

Selon les dérivées de les équations (II.52.a) et (II.53.b), on arrive à :

$$\left\{ \begin{array}{l} B_r(p, q) = \frac{\mu_0}{8\pi} I(q) \frac{z(p) - \bar{z}(q)}{r(p)\sqrt{r(p)r(q)}} \left[ \frac{2 - k^2}{1 - k^2} E_2(k) - 2E(k) \right] k \quad (a) \\ B_z(p, q) = -\frac{\mu_0}{8\pi} I(q) \frac{1}{\sqrt{r(p)r(q)}} \left[ \frac{2 + \frac{r(p)}{r(q)} - k^2}{1 - k^2} E_2(k) - 2E(k) \right] k \quad (b) \end{array} \right. \quad (II.53)$$

On pose :

$$\left\{ \begin{array}{l} Br(p) = \frac{\mu_0}{2\pi} GBr(p, q)I(q) \quad (a) \\ Bz(p) = \frac{\mu_0}{2\pi} GBz(p, q)I(q) \quad (b) \end{array} \right. \quad (II.54)$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} GBr(p, q) = \frac{z(p) - \bar{z}(q)}{4r(p)\sqrt{r(p)r(q)}} \left[ \frac{2 - k^2}{1 - k^2} E_2(k) - 2E_1(k) \right] k \quad (a) \\ GBr(p, q) = \frac{1}{4\sqrt{r(p)r(q)}} \left[ \frac{2 + \frac{r(p)}{r(q)} - k^2}{1 - k^2} E_2(k) - 2E_1(k) \right] k \quad (b) \end{array} \right. \quad (II.55)$$

### II.6.3- Expression analytique du potentiel scalaire électrique

Le gradient du potentiel en coordonnées cylindrique s'écrit :

$$\text{grad} \vec{V}(p) = \frac{\partial V}{\partial r} \vec{e}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} \vec{e}_\theta \quad (II.56)$$

Le courant circule de manière angulaire le long du périmètre moyen de la spire, le gradient du potentiel le long de l'axe radial est nul ( $\partial V / \partial r = 0$ ). De plus, puisque le courant est constant tout au long du périmètre moyen, nous pouvons conclure que le gradient de potentiel est constant [7]. En utilisant u(p) pour représenter la tension appliquée aux bornes du contour, nous pouvons donc écrire :

$$\text{grad}\vec{V}(p) = \frac{-u(p)}{2 \pi r(p)} \quad (\text{II.57})$$

Cette équation (II.56) exprime la variation spatiale du potentiel électrique scalaire en fonction de la géométrie et de la tension induite aux bornes de la spire.

## II.7- Conclusion

Dans ce chapitre on a évoqué la relation entre le courant de Foucault et les vibrations mécaniques, ensuite nous avons décrit les équations de l'électromagnétique qu'on va les utiliser dans notre système. En conclu que, l'étude du magnétisme et l'utilisation des courants de Foucault pour la détection des vibrations offrent des perspectives intéressantes. Bien que certaines limites subsistent, les avancées réalisées jusqu'à présent ont ouvert la voie à de nombreuses applications potentielles. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour surmonter les défis techniques et améliorer encore la sensibilité et la résolution de la détection des vibrations par courants de Foucault.

# **CHAPITRE III**

## **III-Modélisation par les circuits couplés et application**

### III.1- Introduction

Ce chapitre présente le modèle de conception qui repose sur le principe de la méthode des circuits électriques couplés.

On développe les formulations aboutissant à la modélisation par la méthode des circuits couplés obtenue dans le chapitre précédent puis on met en œuvre cette modélisation dans un environnement MATLAB pour extraire les résultats.

### III.2- Equations générale entre deux points couplés

Considérant deux points p et q qui interagissent entre eux. En combinant les équations (II.28), (II.45) et (II.57), on obtient l'expression de base comme suit :

$$\frac{J(p)}{\sigma(p)} + \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{d(G(p,q)I(q))}{dt} = \frac{u(p)}{2\pi r(p)} \quad (\text{III.1})$$

En multipliant par  $I = 2\pi r(p)$  et en tenant compte de  $I = \frac{I(p)}{S(p)}$ , par on obtient :

$$\frac{2\pi r(p)}{s(p)\sigma(p)} I(p) + \mu_0 r(p) \frac{d(G(p,q)I(q))}{dt} = u(p) \quad (\text{III.2})$$

#### III.2.1- Equation dans le capteur

Le capteur est constitué de  $N_s$  spires élémentaires (en série) de sections  $S_s$  et de conductivité  $\sigma_s$ . Ainsi la pièce est composée de  $N_c$  spires (en parallèle) de sections  $S_c$  et de conductivité  $\sigma_c$ .

La contribution de toutes les ( $N_s+N_c$ ) spires q sur la spire p, permet de donner l'équation :

$$\frac{2\pi r(p)}{s(p)\sigma(p)} I(p) + \mu_0 r(p) \sum_{q=1}^{N_s+N_c} \frac{d(G(p,q)I(q))}{dt} = u(p) \quad (\text{III.3})$$

Avec :

$N_s$  : nombre de spires du capteur

$N_c$  : nombre de spires de la pièce

$$\begin{aligned} \frac{2\pi r_s(p)}{S_s(p)\sigma_s(p)} I_s(p) + \mu_0 r_s(p) \sum_{q=1}^{N_s} \frac{d(G_{ss}(p,q)I_s(q))}{dt} \\ + \mu_0 r_s(p) \sum_{q=1}^{N_c} \frac{d(G_{cs}(p,q)I_c(q))}{dt} = u_s(p) \end{aligned} \quad (\text{III.4})$$

La dernière équation, notée (III.4), constitue l'une des équations de la fondation de notre système. Elle représente à la fois l'effet de la source sur elle-même ( $G_{ss}(p,q)$ ) et l'effet de la charge sur la source ( $G_{cs}(p,q)$ )

Étant donné que les spires du capteur sont en série, l'expression de la tension aux bornes de la bobine implique la somme des tensions aux bornes de chaque spire. Ainsi, l'équation (III.4) devient:

$$\begin{aligned} \sum_{p=1}^{N_s} \frac{2\pi r_s(p)}{S_s(p)\sigma_s(p)} I_s(p) + \mu_0 \sum_{p=1}^{N_s} r_s(p) \sum_{q=1}^{N_s} G_{ss}(p,q) \frac{dI_s(q)}{dt} \\ + \mu_0 \sum_{p=1}^{N_s} r_s(p) \sum_{q=1}^{N_c} \frac{d(G_{cs}(p,q)I_c(q))}{dt} = \sum_{p=1}^{N_s} u_s(p) \end{aligned} \quad (\text{III.5})$$

$$\text{On pose : } \begin{cases} R_s = \sum_{p=1}^{N_s} \frac{2\pi r_s(p)}{S_s(p)\sigma_s(p)} & (a) \\ L_s = \mu_0 \sum_{p=1}^{N_s} \sum_{q=1}^{N_s} r_s(p) G_{ss}(p,q) & (b) \\ U_s = \sum_{p=1}^{N_s} u_s(p) & (c) \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

Ou :

$R_s$  : la résistance de la bobine (ohm)

$L_s$  : l'inductance de la bobine (H)

$U_s$  : la tension de la source (v)

L'équation (III.5) s'écrit alors sous la forme :

$$\begin{aligned} R_s I_s + L_s \frac{dI_s}{dt} + \mu_0 \sum_{p=1}^{N_s} r_s(p) \sum_{q=1}^{N_c} G_{cs}(p,q) \frac{dI_c(q)}{dt} \\ + \mu_0 \sum_{p=1}^{N_s} r_s(p) \sum_{q=1}^{N_c} I_c(q) \frac{dG_{cs}(p,q)}{dt} = U_s \end{aligned} \quad (\text{III.7})$$

Si on suppose que la pièce se déplace avec une vitesse ( $v_z$ ) suivant l'axe [oz], alors on peut définir :

$$\frac{dG_{cs}(p, q)}{dt} = \frac{dz}{dt} \frac{dG_{cs}(p, q)}{dz} = v_z GBr_{cs} \quad (\text{III.8})$$

De ce fait l'équation (III.7) se transforme :

$$R_s I_s + L_s \frac{dI_s}{dt} + \mu_0 \sum_{p \neq q}^{N_s} \sum_{q=1}^{N_c} r_s(p) G_{cs}(p, q) \frac{dI(q)}{dt} + \mu_0 v_z \sum_{p \neq q}^{N_s} \sum_{q=1}^{N_c} v_z GBr_{cs}(p, q) I_c(q) = U_s \quad (\text{III.9})$$

$$R_s I_s + L_s \frac{dI_s}{dt} + \mu_0 \sum_{p \neq q}^{N_s} \sum_{q=1}^{N_c} r_s(p) G_{cs}(p, q) \frac{dI_c(q)}{dt} + \mu_0 v_z \sum_{p \neq q}^{N_s} \sum_{q=1}^{N_c} v_z r_s(p) GBr_{cs}(p, q) I_c(q) = U_s \quad (\text{III.10})$$

$$R_s I_s + L_s \frac{dI_s}{dt} + \sum_{q=1}^{N_c} Me_{cs}(q) \frac{dI_c(q)}{dt} + \sum_{q=1}^{N_c} Mm_{cs}(q) I_c(q) = U_s \quad (\text{III.11})$$

Avec :

$$\begin{cases} Me_{cs} = \mu_0 \sum_{p=1}^{N_s} r_s(p) G_{cs}(p, q) & (a) \\ Mm_{cs} = \mu_0 v_z \sum_{p=1}^{N_s} r_s(p) GBr_{cs}(p, q) & (b) \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

Si on exprime la dérivée à l'instant t, l'équation (III.11) s'écrit :

$$R_s I_s(t) + L_s \left. \frac{dI_s}{dt} \right|_{tt} + \sum_{q \neq s}^{N_c} Me_{sc} \left. \frac{dI(q)}{dt} \right|_1 + Mm_{sc} I_c(t) = U_s(t) \quad (\text{III.13})$$

### III.2.2- Equation dans la pièce

La pièce, supposée en mouvement, est décomposable en  $N_c$  spires élémentaires disposées en parallèles et en circuit fermé. On note par  $G_{cc}(p, q)$  une fonction qui définit l'effet électromagnétique de la pièce sur elle-même et par  $G_{sc}(p, q)$  l'effet de la source sur la pièce.

$$\begin{aligned} \frac{2\pi r_c(p)}{S_c(p)\sigma_c(p)} I_c(p) + \mu_0 r_c(p) \sum_{q=1}^{N_c} G_{cc}(p, q) \frac{dI_c(q)}{dt} \\ + \mu_0 r_c(p) \sum_{q=1}^{N_s} \frac{d(G_{sc}(p, q) I_s(q))}{dt} = 0 \end{aligned} \quad (\text{III.14})$$

$$\text{On pose : } \begin{cases} R_c(p) = \frac{2\pi r_c(p)}{S_c(p)\sigma_c(p)} & (a) \\ L_{cc}(p) = \mu_0 r_c(p) G_{cc}(p, q) & (b) \end{cases} \quad (\text{III.15})$$

En remplaçant dans l'équation (III.14) :

$$\begin{aligned} R_c(p) I_c(p) + \sum_{q=1}^{N_c} L_{cc}(p, q) \frac{dI_c(q)}{dt} + \mu_0 r_c(p) \sum_{q=1}^{N_s} I_s(q) \frac{dG_{sc}(p, q)}{dt} \\ + \mu_0 r_c(p) \sum_{q=1}^{N_s} G_{sc}(p, q) \frac{dI_s(q)}{dt} = 0 \end{aligned} \quad (\text{III.16})$$

En remplaçant  $\frac{dG_{sc}(p, q)}{dt}$  par  $v_z GBr_{sc}(p, q)$ , on trouve :

$$R_c(p) I_c(p) + \sum_{q=1}^{N_c} L_{cc}(p, q) \frac{dI_c(q)}{dt} + Mm_{cs}(p) I_s + Me_{cs}(p) \frac{dI_s(q)}{dt} = 0 \quad (\text{III.17})$$

Avec :

$$\begin{cases} Me_{sc} = \mu_0 \sum_{p=1}^{N_s} r_c(p) G_{sc}(p, q) & (a) \\ Mm_{sc} = \mu_0 v_z \sum_{p=1}^{N_s} r_c(p) GBr_{sc}(p, q) & (b) \end{cases} \quad (\text{III.18})$$

Si on exprime la dérivée à l'instant t, l'équation (II.16) s'écrit :

$$R_c I_c(t) + \sum_{q=1}^{N_c} L_{cc} \frac{dI_c(q)}{dt} \Big|_t + Mm_{cs} I_s(t) + Me_{cs} \frac{dI_s(q)}{dt} \Big|_t = 0 \quad (\text{III.19})$$

### III.2.3- Equation globale du système

En combinant les équations dans la source et dans la charge on obtient :

$$\left\{ \begin{array}{l} R_s + L_s \frac{dI_s}{dt} \Big|_t + \sum_{q=1}^{N_c} \left[ Mm_{CS}(q)I_c(q) + Me_{CS}(q) \frac{dI_c(q)}{dt} \Big|_t \right] = U_s \quad (a) \\ Mm_{CS}(p)I_s + Me_{CS}(p) \frac{dI_s}{dt} \Big|_t + R_c(p)I_c(p) + \sum_{q=1}^{N_c} L_c(p,q) \frac{dI_c(q)}{dt} = 0 \quad (b) \end{array} \right. \quad (III.20)$$

### III.2.4- Induction électromagnétique de Neumann

#### III.2.4.1- Définition

Un champ magnétique variable ou dépendant du temps issu d'un circuit alimenté en harmonique, génère des courants induits dans les circuits fixes.

#### III.2.4.2- Système d'équation à résoudre

Par conséquent, la vitesse intervenant dans les équations (III.12.b) et (III.18.b) est nulle ; ce qui réduit l'équation (III.20) à l'équation (III.21) où le terme de dérivée par au temps est remplacé par  $j\omega$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} (R_s + jL_s\omega)I_s + j\omega \sum_{q=1}^{N_c} Me_{CS}(q)I_c(q) = U_s \quad (a) \\ j\omega Me_{CS}(p)I_s + R_c(p)I_c(p) + j\omega \sum_{q=1}^{N_c} L_c(p,q)I_c(q) = 0 \quad (b) \end{array} \right. \quad (III.21)$$

### III.2.5- Induction électromagnétique de Lorentz

#### III.2.5.1- Définition

Un champ magnétique permanent ou stationnaire issu soit d'un aimant ou d'un circuit alimenté en continu, génère des courants induits dans les circuits déformables ou en mouvement. Autrement dit, un circuit en mouvement est le siège des courants induits sous l'effet d'un champ permanent. Par conséquent le terme de dérivée par rapport au temps est nul, qui correspond à la pulsation nulle pour une alimentation continue.

#### III.2.5.2- Modèle électromagnétique

Initialement à  $t=0$ , le courant du capteur est constant car le capteur est alimenté en continu. Après un mouvement de la pièce variable dans le temps, on assiste à un courant induit de Lorentz variable aussi dans le temps. De ce fait, le phénomène de Neumann intervient et le modèle à résoudre reste toujours celui du système d'équation (III.20).

Pour résoudre ce système, il est primordial de réaliser une discrétisation temporelle. Pour étudier seulement le phénomène de Lorentz, on néglige la variation temporelle et le système d'équation (III.20) se limite à :

$$\begin{cases} RsI_s + \sum_{q=1}^{Nc} Mm_{cs}(q)I_c(q) = U_T \\ Rc(q)I_c(q) + Mm_{sc}(q)I_s = 0 \end{cases} \quad (III.22)$$

Exemple pour  $Ns=1$ ,  $Nc=2$  :

$$\begin{cases} RsI_s + Mm_{cs}(1)I_c(1) + Mm_{cs}(2)I_c(2) = U_T \\ Mm_{sc}(1)I_s + Rc(1)I_c(1) + 0 * I_c(2) = 0 \\ Mm_{sc}(2)I_s + 0 * I_c(1) + Rc(2)I_c(2) = 0 \end{cases} \quad (III.23)$$

$$\begin{bmatrix} Rs & Mm_{cs}(1) & Mm_{cs}(2) \\ Mm_{sc}(1) & Rc(1) & 0 \\ Mm_{sc}(2) & 0 & Rc(2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_c(1) \\ I_c(2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_T \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (III.24)$$

### III.2.5.3- Variation de la résistance vue par le capteur

- La résistance en absence de vibrations est donnée pour une vitesse nulle :

$$R_0 = \frac{U_T}{I_s} = R_s \quad (III.25)$$

- En présence des vibrations la résistance est notée par  $R_{mvt}$ .

La résolution analytique du système d'équation (III.22) passe par le système (III.26) pour obtenir l'expression (III.27) :

$$\begin{cases} R_{mvt} = \frac{U_T}{I_s} = R_s + \sum_{q=1}^{Nc} Mm_{cs}(q) \frac{I_c(q)}{I_s} & (a) \\ I_c(q) = -\frac{Mm_{sc}(q)}{Rc(q)} I_s & (b) \end{cases} \quad (III.26)$$

$$R_{mvt} = \frac{U_T}{I_s} = R_s - \sum_{q=1}^{Nc} \frac{Mm_{cs}(q)Mm_{sc}(q)}{Rc(q)} \quad (III.27)$$

- On en déduit la variation de la résistance, telle que :

$$\Delta R = R_{mvt} - R_0 = -\sum_{q=1}^{Nc} \frac{Mm_{cs}(q)Mm_{sc}(q)}{Rc(q)} \quad (III.28)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} R_c(p) = \frac{2\pi r_c(q)}{S_c \sigma_c} \\ Mm_{CS} = \mu_0 v_z \sum_{p=1}^{N_s} r_s(p) GBr_{cs}(p, q) \\ Mm_{SC} = \mu_0 v_z \sum_{p=1}^{N_s} r_c(p) GBr_{sc}(p, q) \end{cases}$$

En tenant compte des relations (III.6.a), (III.12.b) et (III.18.b).

$$\Delta R = \frac{\mu_0^2 \sigma_c}{2\pi} s_c v_z^2 \sum_{q=1}^{N_c} \left( \sum_{p=1}^{N_s} r_s(p) GBr_{cs}(p, q) \sum_{p=1}^{N_s} \frac{r_c(p)}{r_c(q)} GBr_{sc}(p, q) \right) \tag{III.29}$$

### III.3- Applications et résultats

#### III.3.1- Modèles géométriques

Soit une pièce de forme cylindrique tournante susceptible de vibrée radialement ou longitudinalement. Pour détecter ces vibrations, on place à proximité une bobine de détection.

##### III.3.1.1- Vibration radiale

La pièce vibre dans le sens radial. Les dimensions du capteur sont très faibles devant celles de la pièce, par conséquent la forme de la pièce qui est sous forme d'un arc apparaît comme plate vis-à-vis du capteur, comme le montre la (figure III.1).

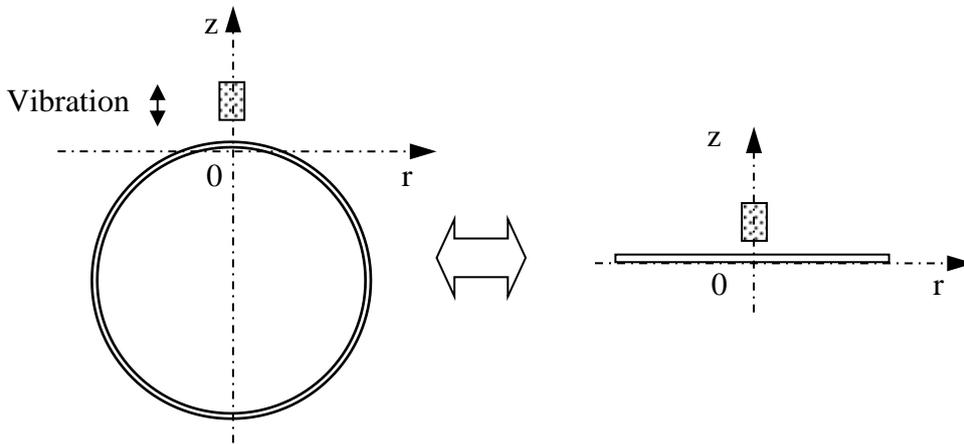


Figure III-1 : Géométrie d'une vibration radiale

### III.3.1.2- Vibration axiale

La pièce vibre dans le sens axial. Les dimensions du capteur très petites devant la base du rotor de la machine tournante. Ce qui permet de négliger les effets de bords.

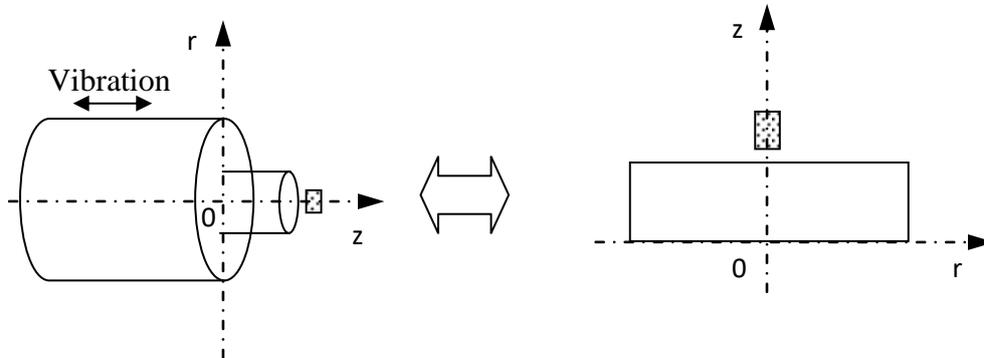
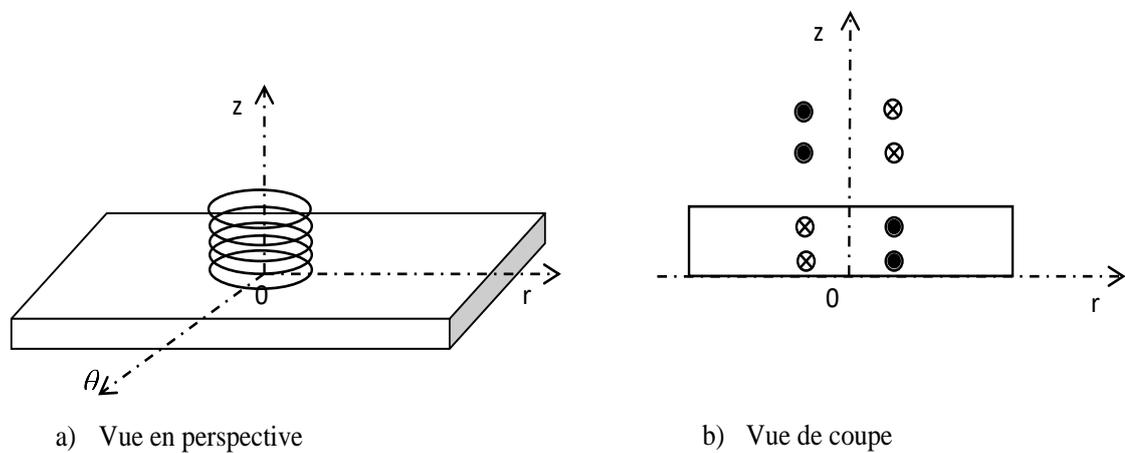


Figure III-2 : Géométrie d'une vibration axiale

### III.3.1.3- Configuration axisymétrique

La géométrie du système présente une forme cylindrique où tous les phénomènes sont symétriques par rapport à l'axe du cylindre ; on parle alors de configuration axisymétrique. La figure (III.3) présente en (a) une vue en perspective et en (b) une vue de coupe



a) Vue en perspective

b) Vue de coupe

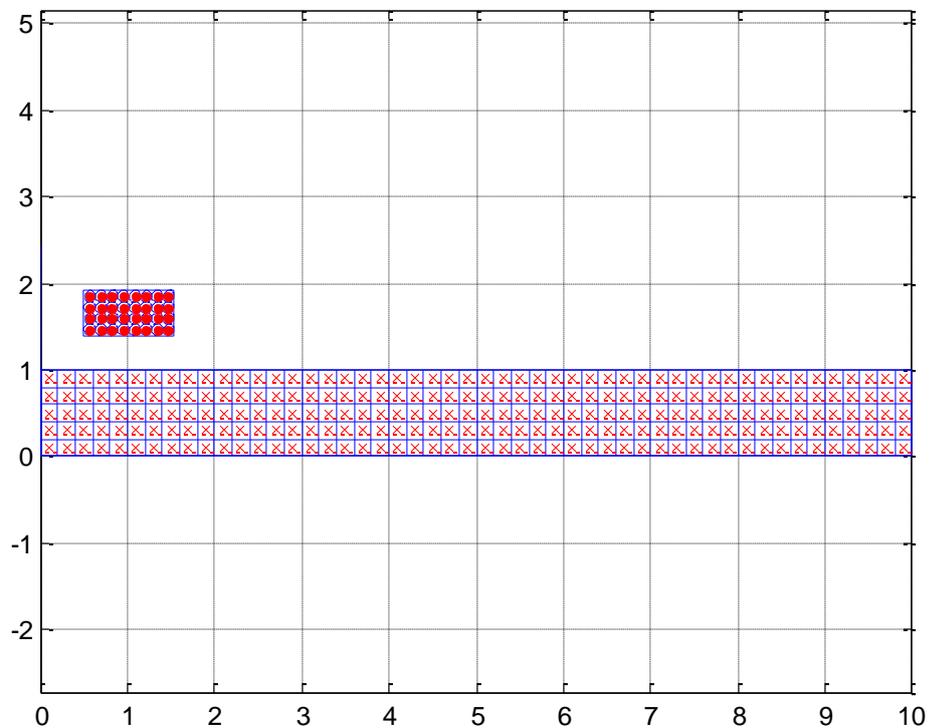
Figure III-3 : Géométrie axisymétrique

### III.3.2- Résultats de la simulation

#### III.3.2.1- Discrétisation du capteur et de la pièce

Le capteur est une bobine de hauteur 0.5mm, de rayon intérieur de 0.5mm et extérieur de 1.5mm. Elle est composée de 120 spires réparties en 15 spires sur l'axe (Or) et 08 spires sur l'axe (Oz). La pièce est supposée cylindrique ou cubique de cotés très grands. Elle l'a une épaisseur 1mm et de rayon 10mm.

Par souci de visibilité des détails de la discrétisation, on considère une bobine de 32 spires et un entrefer de 0.4mm comme le montre la figure (III.4).



**Figure III-4 :** Géométrie axisymétrique discrétisée

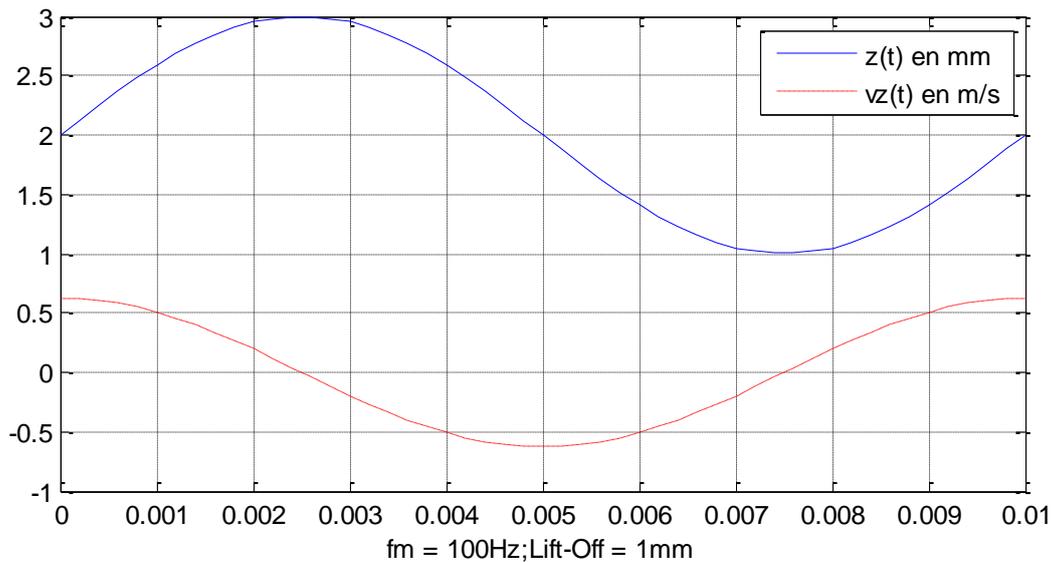
#### III.3.2.2- Forme de la vibration

Le capteur est en cuivre de conductivité  $59.6 \cdot 10^6 \text{ } (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$ . La pièce est en acier inoxydable de conductivité  $1.5 \cdot 10^6 \text{ } (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$ . On excite par une tension continue de 1V. Pour simuler la vibration de la pièce, on considère que cette dernière est animée d'un mouvement sinusoïdal dont l'amplitude est

l'entrefer (Lift-Off) et qui est décrit par l'équation (III.30). L'allure du déplacement et de la vitesse est présentée en figure (III.5).

$$\begin{cases} z(t) = z_0 \sin(\Omega t) & (a) \\ v_z(t) = z_0 \Omega \cos(\Omega t) & (b) \\ \Omega = 2\pi f_m & (c) \end{cases} \quad (\text{III.30})$$

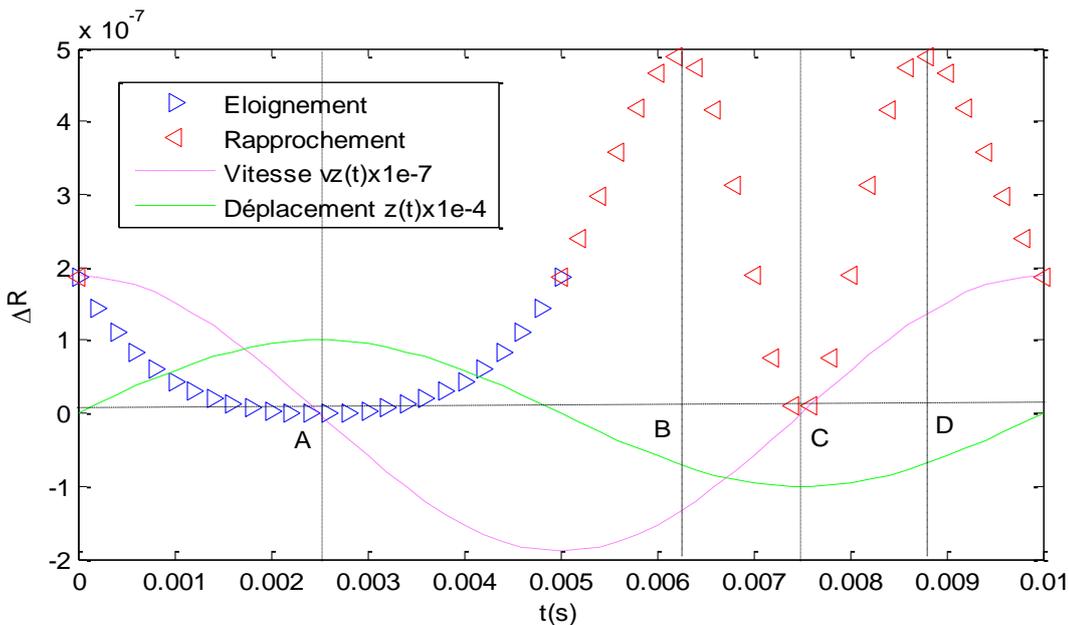
Où  $f_m$  et  $z_0$  sont respectivement la fréquence et l'amplitude des vibrations.



**Figure III-5 :** Déplacement et vitesse du capteur

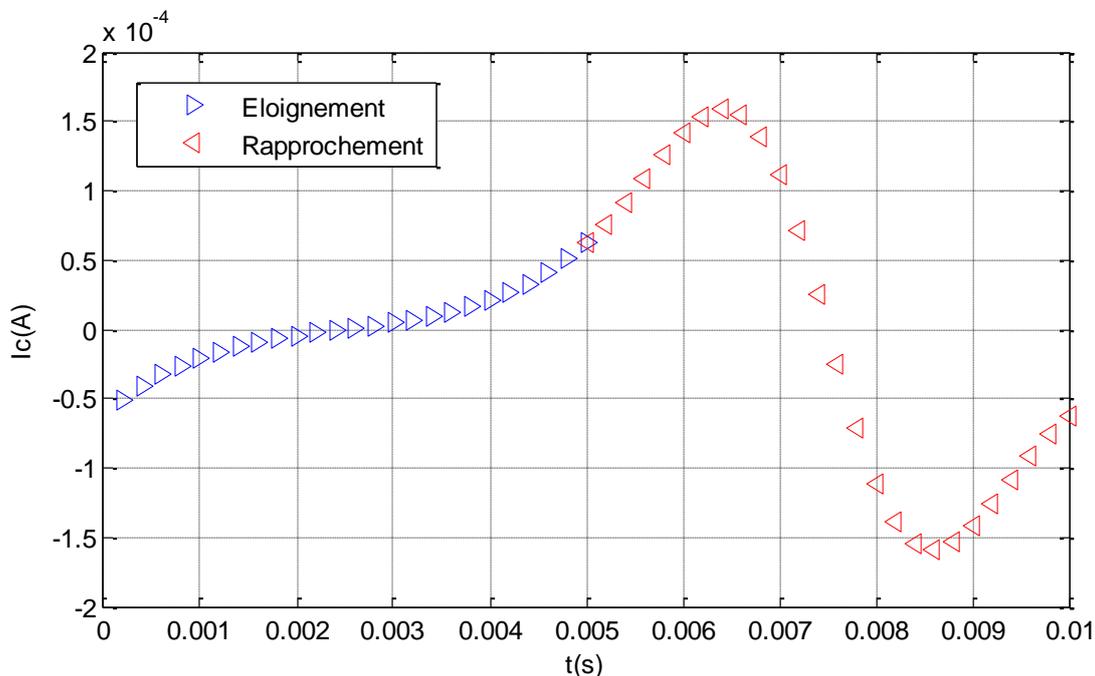
### III.3.2.3- Signature de la vibration

La position du capteur par rapport à la pièce est de 1mm correspondant à l'entrefer cité précédemment et qui représente l'amplitude du mouvement sinusoïdal dont la fréquence est fixée à 100Hz.



**Figure III-6 :** Variation de la résistance en fonction du temps

La détection des vibrations est signée par la mesure du courant du capteur ou par la visualisation de la variation de la résistance comme le montre la figure (III-6) où nous avons visualisé simultanément le déplacement, la vitesse et la variation de la résistance.



**Figure III-7 :** Courant induit dans la pièce en fonction du temps

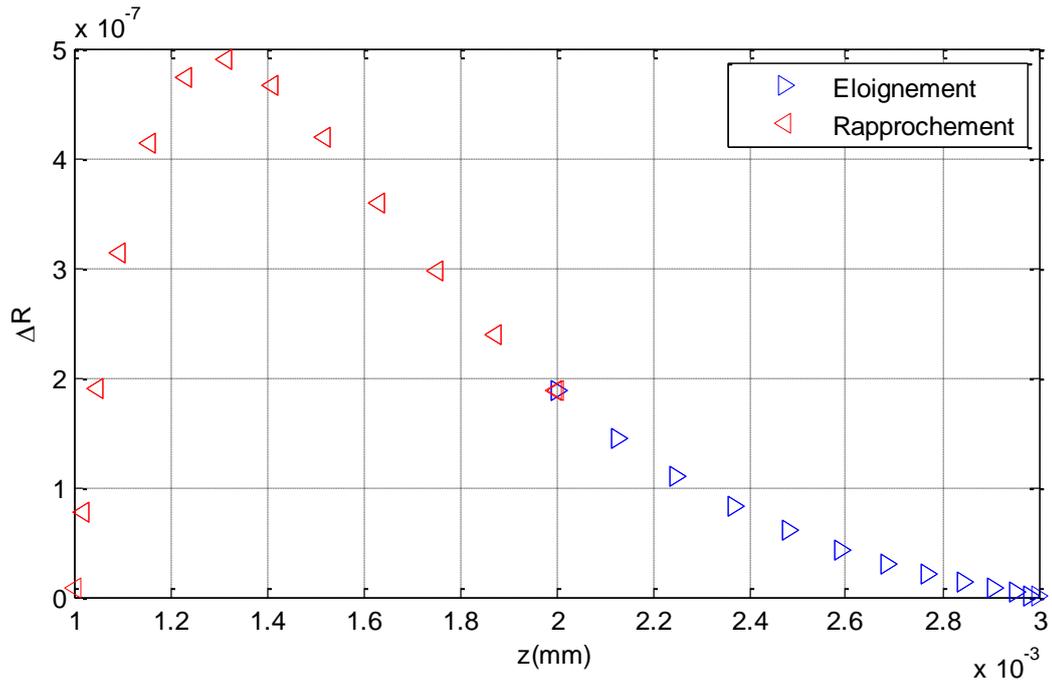


Figure III-8 : Variation de la résistance en fonction du déplacement

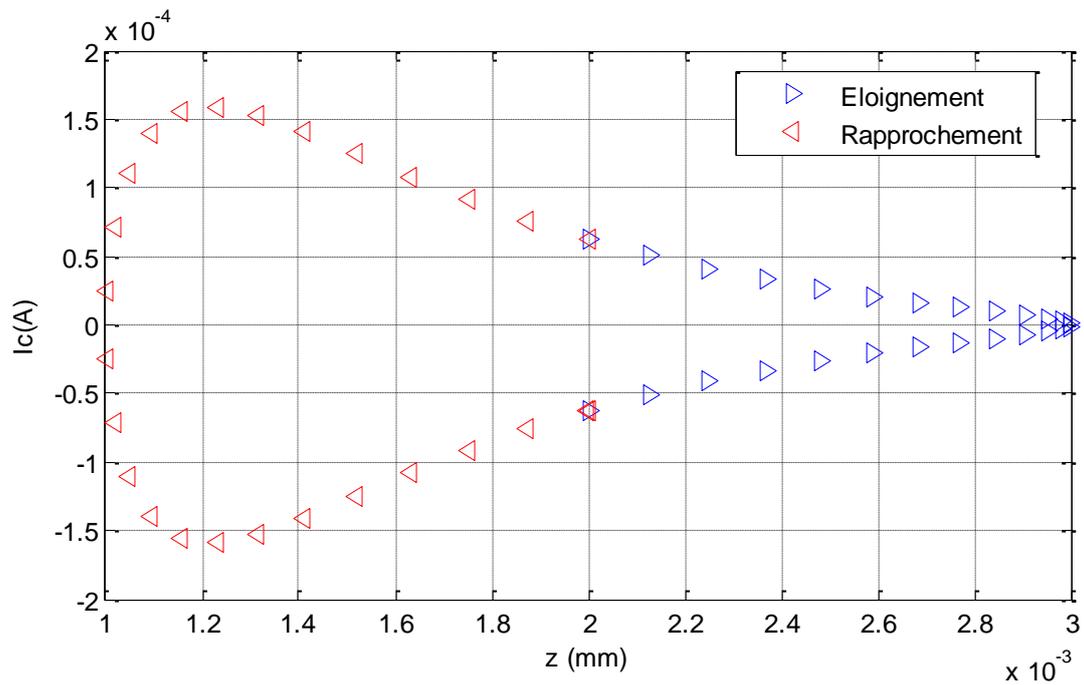


Figure III-9 : Courant induit dans la pièce en fonction du déplacement

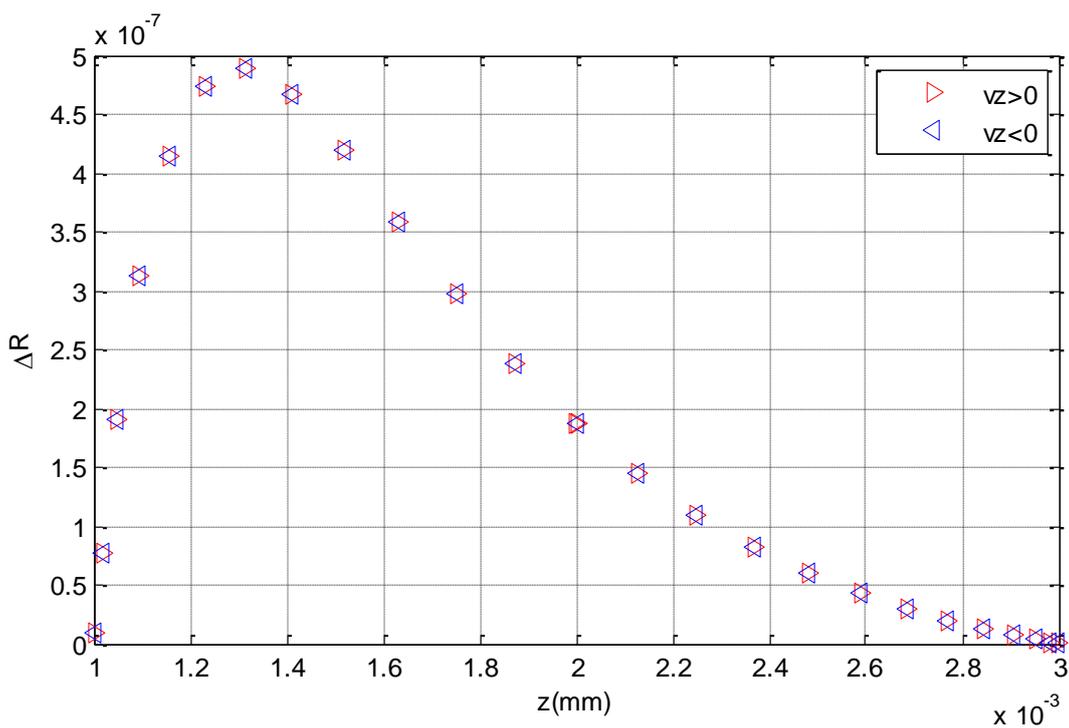


Figure III-10 : Variation de la résistance en fonction du déplacement pour  $v_z > 0$  et  $v_z < 0$

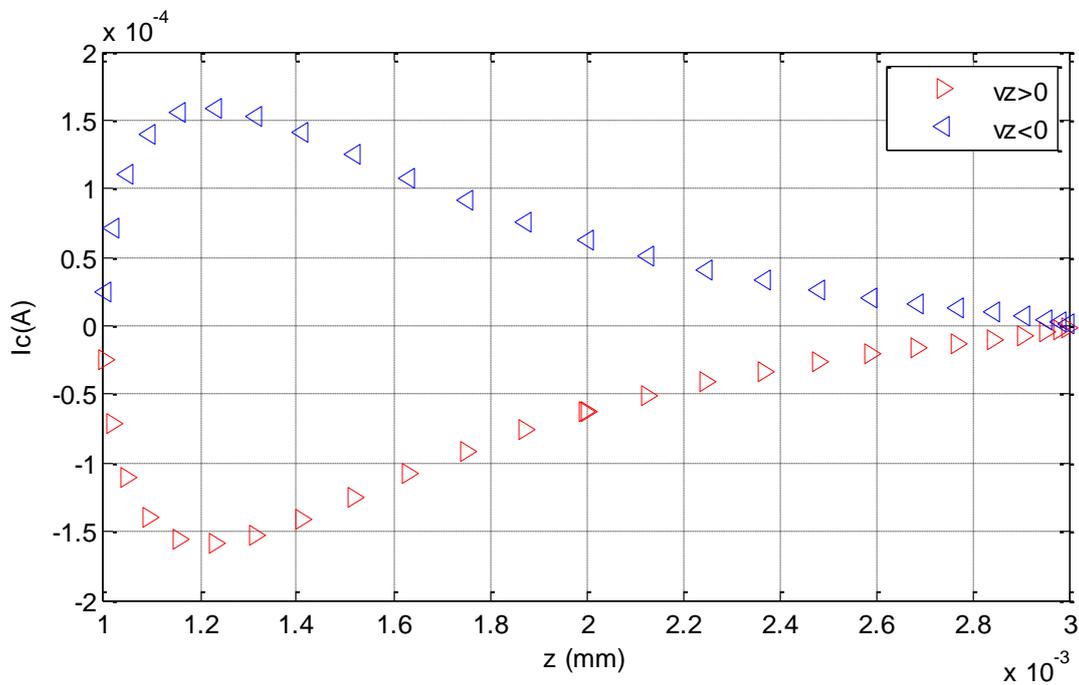


Figure III-11 : Courant induit en fonction du déplacement pour  $v_z > 0$  et  $v_z < 0$

Pour mieux comprendre le phénomène dans sa globalité, on visualise aussi le courant induit par le capteur sur la surface de la pièce au point  $r=1\text{mm}$ .

La visualisation est faite avec des symboles qui montrent que la pièce est proche du capteur (lobe positif du déplacement) et loin du capteur (lobe négative du déplacement).

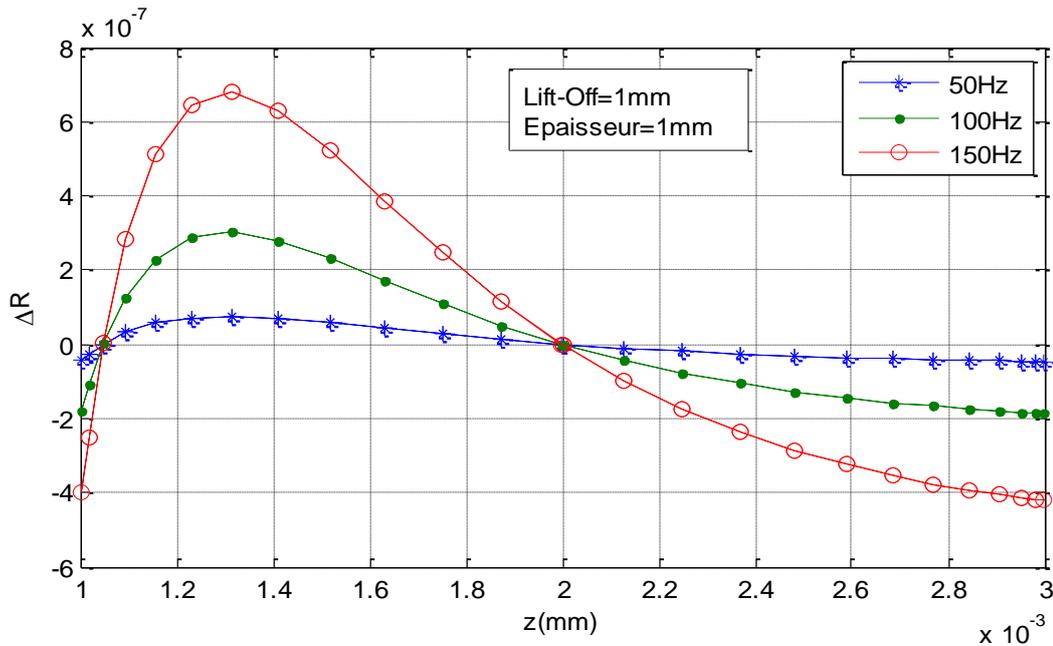
On constate dans la figure (III-6) que la variation de la résistance est nulle aux points A et C où la vitesse est nulle. Cela s'explique par la relation (III.29) où la variation de la résistance est proportionnelle au carée de la vitesse de déplacement ce qui conduit à la variation de la résistance toujours positive même si la vitesse est négative (figure III.10).

On constate que l'allure du courant induit suit celle de la vitesse conformément à la relation (III.26.b) où le courant est proportionnel à la vitesse. Aussi, relativement à la relation (III.29), la variation de la résistance devrait être maximale aux points B et D où la vitesse est maximale mais ce n'est pas le cas car la variation de la résistance dépend aussi de la position.

D'une manière générale, toutes les valeurs des grandeurs électromagnétiques sont faibles lorsque la pièce s'éloigne du capteur.

**III.3.2.4- Influence de la fréquence dans la détection**

On visualise dans la figure suivante la variation de la résistance en fonction du déplacement pour différentes fréquences de vibration.



**Figure III-12 :** Variation de la résistance en fonction du déplacement pour différentes valeurs de la fréquence

Plus la fréquence de vibration augmente plus la variation de la résistance augmente. Ce résultat est cohérent car la vitesse, dont dépend la résistance, est proportionnelle à la fréquence.

### III.3.2.5- Influence de l'épaisseur de la pièce

La figure (III-13) montre la variation de la résistance en fonction du déplacement pour différentes valeurs de l'épaisseur la pièce.

Pour des faibles valeurs de l'épaisseur de la pièce (inférieure à 1mm), on assiste à une influence importante de celle-ci sur la variation de la résistance du capteur (figure III-13). Par contre pour des épaisseurs supérieures à 1mm, l'influence est négligeable (figure III-14). Le phénomène est équivalent à un transformateur où la résistance est la somme de celle du primaire et de celle du secondaire ramenée au primaire. La résistance électrique de la pièce est inversement proportionnelle à l'épaisseur de la pièce. Plus l'épaisseur de la pièce est grande plus sa résistance électrique est faible et donc son influence est négligeable.

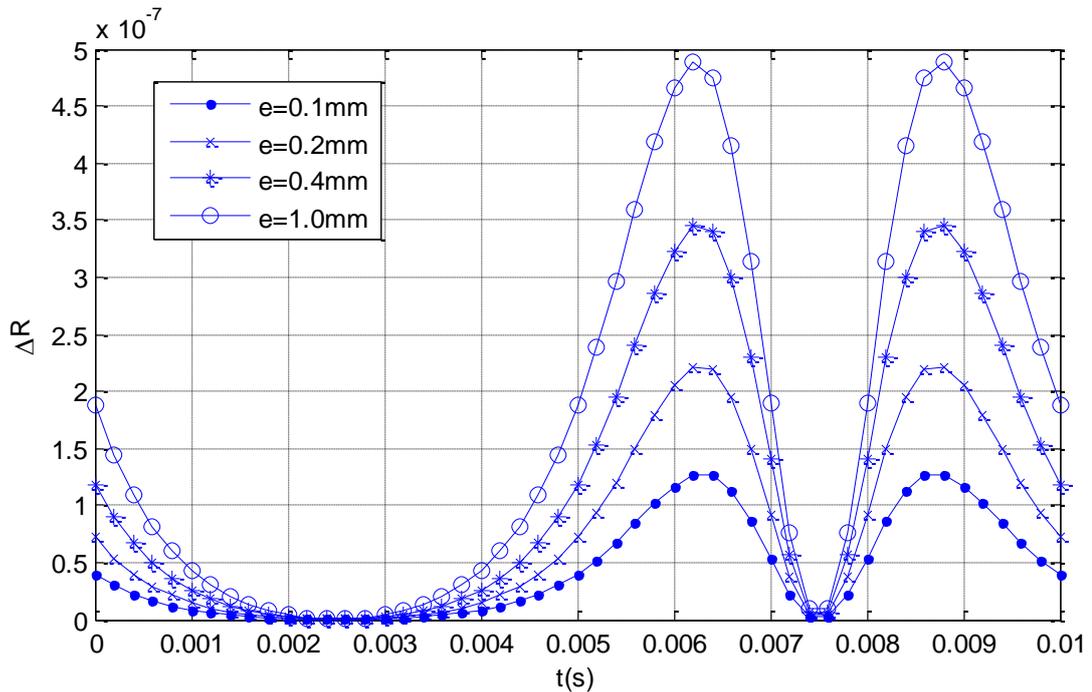
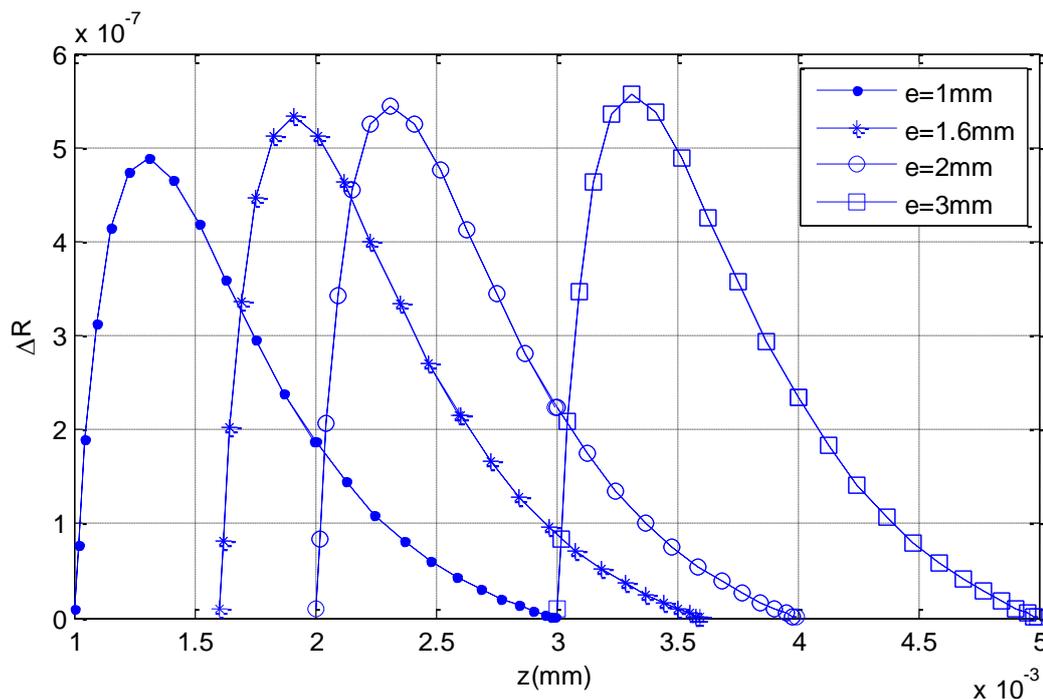


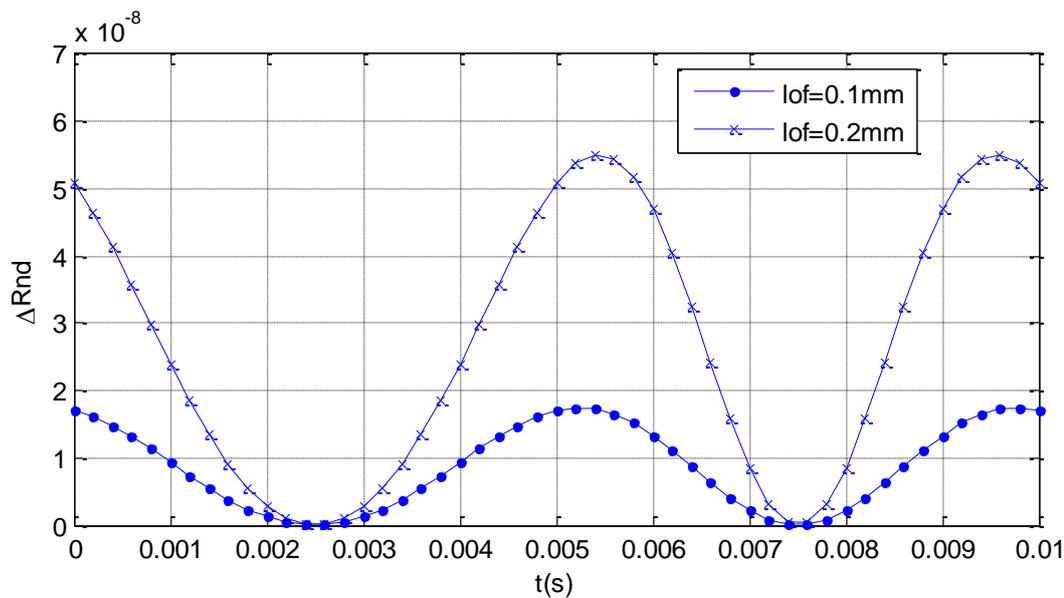
Figure III-13 : Variation de la résistance en fonction du temps pour différentes valeurs de l'épaisseur de la pièce



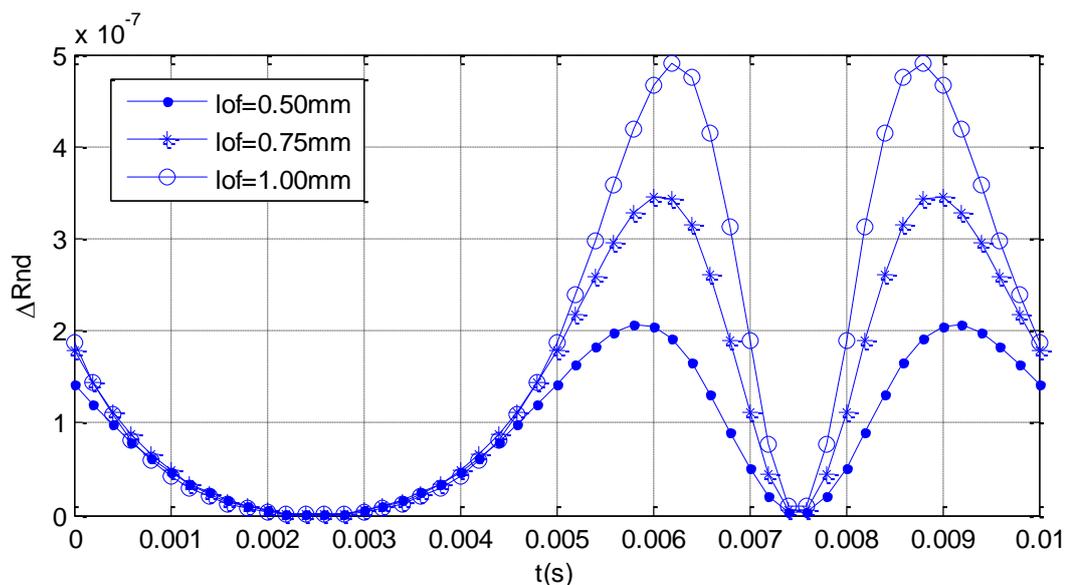
**Figure III-14 :** Variation de la résistance en fonction du déplacement pour différentes valeurs de l'épaisseur de la pièce

**III.3.2.6- Influence de l'amplitude des vibrations (Entrefer)**

Les figures (III-15) et (III-16), montrent la variation de la résistance en fonction du temps et pour différentes valeurs de l'entrefer.

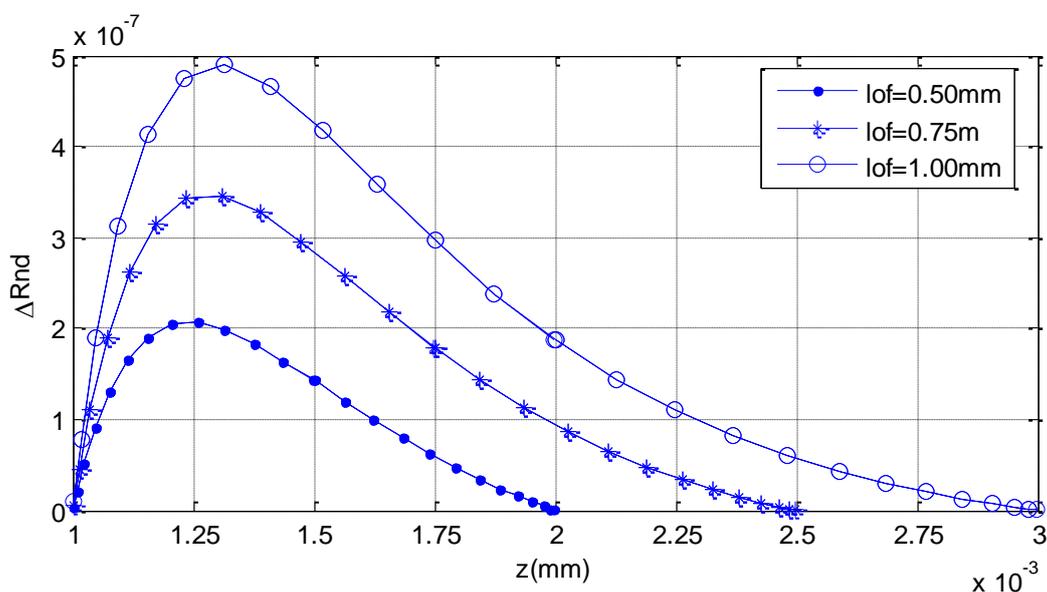


**Figure III-15 :** Variation de la résistance en fonction du temps pour différentes valeurs de l'amplitude de la vibration



**Figure III-16 :** Variation de la résistance en fonction du temps pour différentes valeurs de l’amplitude de la vibration

Lorsque l’entrefer est faible, la forme des allures sont presque symétriques (figure III.15). Dans le cas contraire, on assiste à une dissymétrie temporelle (figure III.16).



**Figure III-17 :** Variation de la résistance en fonction du déplacement pour différentes valeurs de l’amplitude de la vibration

### **III.4- Conclusion**

On conclut que, l'analyse de la variation de la résistance aux bornes du capteur permet de simuler la détection. Cette dernière est influencée par différents paramètres, tels que la fréquence et l'amplitude, ainsi que les caractéristiques propres au dispositif. La détection est plus remarquable pour les fréquences et amplitudes importantes, tandis qu'elle n'est pas sensible à des variations considérables de l'épaisseur de la pièce.

## CONCLUSION GENERALE

Ce mémoire est consacré à l'étude et modélisation de la détection des vibrations dans les pièces conductrices d'électricité à travers les courants induits de Lorentz. La mesure de ces courants passe par la mesure de la variation de la résistance aux bornes du capteur.

Après avoir rappelé certaines caractéristiques liées aux vibrations et leurs capteurs, nous avons procédé, à travers les équations de Maxwell dans le régime quasi-stationnaire, à élaborer un modèle mathématique basé sur la méthode des circuits électriques couplées pour les phénomènes magnétiquement linéaires et configurations géométriquement axisymétriques.

Le modèle mathématique a abouti à un système d'équations qui se discrétise dans l'espace et dans le temps. Pour limiter l'étude au phénomène de Lorentz, nous avons négligé la variation temporelle des courants induits et la résolution du système d'équation abouti à une expression de la résistance du capteur en fonction des caractéristiques des vibrations et des caractéristiques électromagnétique et géométriques du dispositif de mesure.

Le modèle est implanté sous environnement MATLAB. Après introduction d'une forme sinusoïdale des vibrations de la pièce, des données et discrétisation, nous obtenons des résultats sous forme de courbes en fonction du temps et du déplacement de la pièce.

L'évaluation de la variation de la résistance aux bornes du capteur permet de simuler la détection. La détection des vibrations dépend de plusieurs paramètres liés aux vibrations (fréquence, amplitude) et liés au dispositif lui-même. La détection est plus significative pour les fréquences et amplitudes importantes. Par contre elle est insensible à des valeurs importantes de l'épaisseur de la pièce.

En perspective, nous souhaitons que les prochaines promotions poursuivent le travail en le complétant, du côté modélisation, par la discrétisation temporelle des courants induits tout en gardant une excitation en continu du capteur et du côté conception, par l'amplification du signal mesuré.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. IREKTI Anis et BELHADEF Aboubakeur « Détection et classification des défauts des machines tournantes par les réseaux de neurones artificielles » Mémoire de Master, 2021. univ de MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU.
- [2]. BEN BOUDINA Ayoub « Etude de l'analyse vibratoire des machines tournantes » Mémoire de fin d'étude, 2016. univ de M'sila.
- [3]. MOKHTARI Yaakoub « Diagnostic des défauts mécaniques du moteur asynchrone par l'analyse vibratoire » mémoire de master, 2019. université Mohamed Khider de Biskra.
- [4]. Claire BRENEUR, « éléments de maintenance préventive des machines tournantes dans le cas de défauts combinés d'engrenages et de roulements », thèse de l'université de l'INSA de Lyon, année 2002.
- [5]. HACHEMI Mohammed « Application de l'ODS à l'analyse des problèmes de vibration des machines tournantes » Mémoire de fin d'études, 2012. univ Aboubekr Belkaid Tlemcen.
- [6]. BIBI Zahra, BENMANSOUR Fatma « Surveillance des vibrations des équipements industriels par voie d'induction électromagnétique » Mémoire de Fin d'Etudes, 2022. univ de Bejaia.
- [7]. Omar DJEBILI « Contribution à la maintenance prédictive par analyse vibratoire des composants mécaniques tournants. Application aux butées à billes soumises à la fatigue de contact de roulement. » THESE, 2013. UNIV DE REIMS CHAMPAGNE ARDENNE.
- [8]. Aggab Mohamed El Amine « Etude du contrôle non destructif (CND) par courants de Foucault et simulation par la méthode des éléments finis », MEMOIRE DE FIN D'ETUDES, 2015/2016. Université Labri Ben M'Hidi De Oum El Bouaghi.
- [9]. S.YESSAD et H.BOUREBA « caractérisation des pièces et étude des paramètres d'influences sur le contrôle non destructif par courants de Foucault à capteur absolu » mémoire fin d'études, 2005. univ de Bejaia.
- [10]. Benhadda .N, « Modélisation et étude pour la réalisation d'un capteur à courant de Foucault en mode différentiel pour le contrôle non destructif (CND) », thèse de doctorat, 2015. Université de Batna.
- [11]. Benmoussa Oum salama « Utilisation de Méthodes d'Optimisation pour la Résolution des Problèmes Inverses: Application aux Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault » Thèse 2023. UNIV KASDI MERBAH OUARGLA.

- [12]. AROUA Mohamed Lamine, EDJEBAR Mehdi «Récupération d'énergie électromécanique vibratoire des amortisseurs électromagnétiques des véhicules» Mémoire de fin d'études ,2021.univ de Bejaia.
- [13]. IDIRENE Dimya, MOKRANI Souhila « Modélisation, par les circuits électriques couplés, de la récupération de l'énergie électromécanique inductive » Mémoire de fin de cycle, 2019.univ de Bejaia.
- [14]. SIDI AHMED Katia « Méthode des circuits couplés basée sur le calcul des mutuelles appliquée aux dispositifs électromagnétique » Mémoire de Fin d'Etude de Master Académique,2014. Univ. de MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU.
- [15]. MAOUCHE Bachir « Elaboration de modelés par les Grandeurs électromagnétiques couplées. Application au contrôle et a l'évaluation non destructif par courant de Foucault »Thèse doctorat, 2007.Université de Bejaia.
- [16]. Benmoussa Oum salama «Utilisation de Méthodes d'Optimisation pour la Résolution des Problèmes Inverses: Application aux Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault»Thèse doctorat, 2023.Université KASDI MERBAH OUARGLA.

**Titre** : Détection de vibrations des pièces métallique par capteur inductif en continu

**Mot clés** : Electromagnétisme, Lorentz, continu, vibration, détection

**Résumé** : Ce mémoire explore la détection des vibrations dans les pièces conductrices d'électricité via les courants induits de Lorentz. La méthode consiste à mesurer la variation de la résistance du capteur. On propose un modèle mathématique basé sur les équations de Maxwell, discrétisé dans l'espace et le temps en se focalisant sur le phénomène de Lorentz. Ce modèle aboutit à une expression de la résistance du capteur en fonction des caractéristiques des vibrations et des propriétés géométriques et mécanique de la pièce à contrôler. Le modèle est implanté sous environnement MATLAB. Après simulation, la détection est influencée par la fréquence et l'amplitude des vibrations, et par l'épaisseur de la pièce.

**Title**: Vibration detection of metal parts by continuous inductive sensor

**Keywords**: Electromagnetism, Lorentz, continuous, vibration, detection

**Summary**: This dissertation explores the detection of vibrations in electrically conductive parts via induced Lorentz currents. The method consists of measuring the variation in the resistance of the sensor. We propose a mathematical model based on Maxwell's equations, discretized in space and time by focusing on the Lorentz phenomenon. This model results in an expression of the resistance of the sensor as a function of the vibration characteristics and the geometric and mechanical properties of the part to be controlled. The model is implemented in a MATLAB environment. After simulation, detection is influenced by the frequency and amplitude of the vibrations, and by the thickness of the part.

**العنوان**: كشف اهتزازات الأجزاء المعدنية بواسطة الحساس الحثي المستمر

**الكلمات المفتاحية**: الكهرومغناطيسية، لورنتز، المستمر، الاهتزاز، الكشف

**ملخص**: تستكشف هذه الأطروحة اكتشاف الاهتزازات في الأجزاء الموصلة للكهرباء عن طريق تيارات لورنتز المستحثة.

تتكون الطريقة من قياس التباين في مقاومة المستشعر. نقترح نموذجًا رياضيًا يعتمد على معادلات ماكسويل، منفصلاً في

المكان والزمان من خلال التركيز على ظاهرة لورنتز. وينتج عن هذا النموذج تعبير عن مقاومة الحساس كدالة لخصائص

الاهتزاز والخواص الهندسية والميكانيكية للجزء المراد التحكم فيه. يتم تنفيذ النموذج في بيئة MATLAB. بعد المحاكاة، يتأثر

الكشف بتردد وسعة الاهتزازات، ويسمك الجزء.