

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTÉ DE GÉNIE ÉLECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE  
DÉPARTEMENT D'ÉLECTROTECHNIQUE

## Mémoire de Fin d'Études De MASTER ACADÉMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Électrotechnique Industrielle

*Présenté par*  
**Dekhli Mounir**

Thème

# ***Exploitation du logiciel Comsol Multiphysics en vue de la détection de défauts surfaciques par le contrôle non destructif par courant de foucault***

*Mémoire soutenu publiquement le 28/09/2023 devant le jury composé de :*

**M BIROUCHE Chafik**  
MAA, UMMTO, Président

**M DICHE Arezki**  
MAA, UMMTO, Examineur

**Mme MOHELLEBI Zehor Epse OUDNI**  
MCA, UMMTO, Promotrice

Promotion : 2022/2023

## Remerciements

Nous tenons tout d'abord à exprimer notre reconnaissance envers Dieu tout-puissant pour nous avoir accordé la force et la détermination nécessaires pour mener à bien cette entreprise.

Nous adressons nos plus sincères remerciements à Madame OUDNI-MOHELLEBI Zehor, Maître de Conférences classe A à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, pour sa confiance en nous ayant proposé ce sujet de recherche. Nous sommes profondément reconnaissants qu'elle ait accepté de superviser notre travail, nous soutenant tout au long de la rédaction de ce mémoire et mettant à notre disposition une précieuse documentation. Son expertise scientifique, ses qualités humaines exceptionnelles, ainsi que sa capacité à guider nos recherches de manière magistrale, ont été d'une aide inestimable. Sa disponibilité pour répondre à nos questions et ses conseils éclairés ont été une source constante d'orientation et d'apprentissage. Nous lui serons éternellement redevables.

Nous exprimons également nos chaleureux remerciements à Monsieur BIROUCHE Chafik, Maître Assistant classe A à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, pour avoir accepté de présider le jury. C'est un grand honneur pour nous.

Nous souhaitons témoigner notre profonde reconnaissance envers tous les membres du jury qui ont généreusement accepté d'évaluer notre travail, en particulier Monsieur DICHE Arezki, Maître Assistant classe A à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Leur contribution au jury est une marque d'honneur qui nous touche profondément.

Nous n'oublions pas de remercier nos parents pour leurs encouragements constants, qui ont été une source d'inspiration et de motivation tout au long de ce parcours.

Enfin, nous tenons à exprimer notre gratitude envers toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail. Leur soutien a été précieux et a grandement contribué à notre réussite.

# Dédicaces :

Je dédie ce modeste travail :

À ma chère Mère pour sa chaleur et attachement affectif qui m'avait donné la force morale et le bonheur de me consacrer pour mes études.

À mes chers frères : RYANE, WALID, LAMINE

À mes amis en particulier : LAMARA, IDIR, HALIM, KENZA, OUERDA

A tout ceux qui me sont cher (es) et qui m'aiment.

À toute la promo 2022/2023.

# Tables des matières

- Introduction générale
- **Chapitre 1 : fondement théorique du CND**

1	Le contrôle non destructif : .....	3
2	Le but de Contrôle Non Destructif.....	4
2.1	la rapidité d'exécution .....	4
3	Quand utiliser le contrôle non destructif [7].....	5
4	Différentes techniques du contrôle non destructif .....	5
4.1	Examen Visual.....	5
4.1.1	Principe.....	5
4.1.2	Domaine d'application .....	6
4.1.3	Propriétés (Avantages et Inconvénients) du CND par l'Examen Visual .....	6
4.2	Ressuage .....	6
4.2.1	Principe.....	6
4.2.2	Domaines d'application du Ressuage .....	7
4.3	Magnétoscopie.....	7
4.3.1	Principe.....	7
4.3.2	Domaine d'application de la Magnétoscopie .....	8
4.3.3	Propriétés (Avantages et Inconvénients) du CND par Magnétoscopie .....	8
4.4	Radiographie.....	8
4.4.1	Principe.....	8
4.4.2	Domaine d'application .....	9
4.4.3	Propriétés (Avantages et Inconvénients) du CND par Radiographie.....	9
4.5	Thermographie.....	9
4.5.1	Principe.....	9
4.5.2	Domaines d'applications de la thermographie infrarouge .....	10
4.5.3	Propriétés (Avantages et Inconvénients) du CND par Thermographie.....	10
4.6	Ultrasons .....	10
4.6.1	Propriétés (Avantages et Inconvénients) du CND par Ultrasons .....	11
5	Technique du contrôle non destructif par courant de Foucault.....	11
5.1	Principe du CND-CF .....	12
5.2	Objectifs du CND-CF .....	12

5.3	Avantages et Inconvénients .....	13
6	Domaines d'application .....	13
7	Méthodologie de développement des systèmes de CND : .....	14
8	Principes de détection des défauts .....	14
9	Classement des défauts détectés en CND .....	15
9.1	Défauts de surface .....	15
9.1.1	Défauts ponctuels .....	15
9.1.2	Défauts internes .....	15
9.2	Limite de détection .....	16
9.2.1	Le rapport signal/bruit .....	16
9.2.2	Le pouvoir séparateur .....	16
9.3	Principe des capteurs inductifs .....	16
9.3.1	Capteur à courants de Foucault (CCF) .....	16
9.3.2	Inspection des pièces magnétiques (CCF et CM) .....	17
□	Critères de choix de la méthode de contrôle .....	18
10	Conclusion .....	18

**- chapitre 2: Contrôle non destructif par courant de Foucault**

1	Introduction .....	21
2	LE PRINCIPE DU CONTRÔLE PAR COURANTS DE FOUCAULT .....	22
2.1	L'effet de peau .....	24
2.2	Exemple de pièces contrôlées en CND par courants de Foucault .....	25
3	Modélisation du dispositif de CND par CF .....	27
4	Mise en équations .....	28
4.1	Equations de Maxwell .....	28
4.2	Lois constitutives .....	29
4.3	Conditions aux limites .....	29
4.4	Conditions de continuité .....	29
4.5	Conditions de Jauge .....	30
4.6	Hypothèses simplificatrices .....	30
4.7	Champs et potentiels .....	31
5	Méthodes de résolution .....	31
5.1	Méthodes analytiques .....	32
5.2	Méthodes semi analytiques .....	32
5.3	Méthodes numériques .....	32
5.3.1	Méthode des différences finis (MDF) .....	32

5.3.2	Méthode des éléments finis (MEF) .....	32
5.3.3	Méthode des intégrales de frontières (MIF) .....	33
5.3.4	Méthode des volumes finis (MVF) .....	33
6	Conclusion .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

**- chapitre 3: COMSOL MULTIPHYSICS 5.4**

1	Présentation du logiciel COMSOL Multi-physiques : .....	35
1.1	Les avantages : .....	35
1.2	Les inconvénients : .....	35
2	Description de l'interface COMSOL : .....	36
3	Description des différentes étapes de simulation : .....	37
3.1	Dimension 1D, 2D, 3D : .....	37
3.2	La fenêtre « Ajouter des physiques » : .....	38
3.3	La fenêtre « Etude » : .....	38
3.4	La fenêtre « Définitions globales » : .....	39
3.5	La fenêtre « Géométrie » : .....	39
3.6	La fenêtre « Matériel » : .....	40
3.7	La fenêtre « Maillage » : .....	40
3.8	La fenêtre « étude » : .....	41
3.9	La fenêtre « Résultats » : .....	41
3.10	Solution 1 : .....	41
4	Conclusion : .....	41

**- chapitre 4: simulation et interprétation**

1	Introduction : .....	42
2	Description du dispositif a étudier : .....	42
	.....	42
3	Dimensionnement de notre dispositif : .....	42
4	Paramétrage du dispositif étudiant : .....	43
5	Simulation : .....	47
6	Interprétation des résultats : .....	48
	□ Tension pour la plaque sans défaut : .....	48
	□ Tension pour la plaque avec défaut : .....	50
7	Conclusion : .....	55

# Liste des figures

Figure 1: Jean Bernard Léon Foucault 1819-1868.....	4
Figure 2: Principe de l'Examen Visuel .....	5
Figure 3: Principe du CND par Ressuage .....	6
Figure 4: Principe du CND par magnétoscopie .....	7
Figure 5: Principe du CND par Radiographie .....	8
Figure 6: Principe du CND par Thermographie.....	9
Figure 7: Principe du CND par Ultrason.....	11
Figure 8: Principe du CND par courant de Foucault .....	12
Figure 9: Objectif du CND par CF .....	13
Figure 10: Méthodologie usuelle pour l'étude et développement des systèmes de CND, .....	14
Figure 11: Capteur à courants de Foucault, .....	17
Figure 12: Principe du CND par Courants de Foucault .....	21
Figure 13: Principe de fonctionnement du contrôle non destructif par courants de Foucault..	22
Figure 14: Bobine parcourue par un courant I et flux magnétique $\vec{A}_0$ généré par ce courant .	23
Figure 15: Effet du défaut sur la valeur de l'impédance de la bobine. ....	23
Figure 16: : Répartition des courants de Foucault dans une pièce en fonction de la profondeur z. ....	24
Figure 17: Conductivité électrique et perméabilité magnétique théoriques de matériaux à contrôler dans l'industrie.....	25
Figure 18: Évolution de l'épaisseur de peau en fonction de la fréquence dans les matériaux..	25
Figure 19: Production de tubes en acier du groupe Vallourec (©Patrick Landmann). ....	26
Figure 20: Système capteur-fissure. ....	27
Figure 21: Cas général, d'un problème magnétodynamique, .....	28
Figure 22: Interface entre deux milieux, .....	29
Figure 23: l'interface de COMSOL .....	36
Figure 24: Fenêtre Description des différentes étapes de simulation.....	37
Figure 25: Fenêtre Description des dimensions .....	37
Figure 26: Fenêtre ajouter un matériau .....	38
Figure 27: Fenêtre de type de régime .....	38
Figure 28: Fenêtre de définitions générale .....	39
Figure 29: la Fenêtre graphique .....	39
Figure 30: Fenêtre de type matériaux.....	40
Figure 31: Fenêtre de réalisation maillage .....	40
Figure 32: Fenêtre de type d'étude.....	41
Figure 33: Fenêtre des résultats.....	41
Figure 34 : plaque à contrôler .....	42
Figure 35 : représentation de notre simulation .....	43
Figure 36 : model 2D pure .....	44
Figure 37 : construction du model.....	44
Figure 38 : Attribution des matériaux à la géométrie.....	45
Figure 39 : Choix de l'isolant magnétique .....	45
Figure 40 : paramétrage de la bobine .....	46
Figure 41 : domaine fréquentielle .....	47
Figure 42 : densité de flux magnétique et tension obtenu .....	48

Figure 43 : évolution de U en fonction du déplacement à 60Hz.....	49
Figure 44 : évolution de U en fonction du déplacement à 75000Hz.....	49
Figure 45 : évolution de U en fonction du déplacement à 150000Hz.....	50
Figure 46 : évolution de U en fonction du déplacement à 60Hz.....	51
Figure 47 : évolution de U en fonction du déplacement à 75000Hz.....	51
Figure 48: évolution de U en fonction du déplacement à 150000Hz.....	52
Figure 49: évolution de $\Delta U$ en fonction du déplacement a 60HZ.....	53
Figure 50: évolution de $\Delta U$ en fonction du déplacement a 75000HZ.....	53
Figure 51: évolution de $\Delta U$ en fonction du déplacement a 150000HZ.....	54

# **Introduction**

- **Introduction générale**

De nos jours, la qualité et la gestion des risques sont deux paramètres que ne peuvent négliger les industriels fabriquant, mettant en œuvre ou utilisant les matériaux, les produits ou les structures de toutes natures. Les Contrôles Non Destructifs (CND) sont donc devenus essentiels en quelques dizaine d'années ce qui explique que leur périmètre d'application ne cesse de s'accroître au-delà du domaine d'emploi traditionnel constitué par les industries métallurgiques et les activités où la sécurité est primordiale, telles que le nucléaire et l'aéronautique. où la défaillance des pièces pouvant entraîner des conséquences plus ou moins importantes. qui s'expriment souvent en termes de sécurité des personnes ou de dégâts environnementaux. L'enjeu du CND est aussi d'ordre économique : la rapidité et la fiabilité des techniques employées sont capitales pour la réduction des coûts de maintenance et l'optimisation de la durée de vie des installations,[1],[2].

Les méthodes de CND sont utilisées soit pour évaluer des grandeurs caractéristiques du produit (épaisseur, conductivité, ...etc.), soit pour déceler la présence de défauts et les caractériser. Parmi les méthodes les plus utilisées, on peut citer les ultrasons, les méthodes utilisant des rayonnements ionisants (radioscopie) et les méthodes électromagnétiques (magnétoscopie, courants de Foucault). Le choix d'une méthode dépend d'un grand nombre de facteurs tels que la nature des matériaux constituant les pièces à contrôler, la nature de l'information recherchée (défaut débouchant ou enfoui), les conditions de mise en œuvre ...etc.,[3].

Le contrôle non destructif par courants de Foucault (CND-CF) est une méthode à la fois simple à mettre en œuvre, il est facile de créer des courants de Foucault dans un milieu conducteur à l'aide d'une sonde, et complexe. En effet, pour un contrôle donné, comment peut-on créer une bonne répartition des courants de Foucault permettant d'avoir un 'signal de défaut' aussi important que possible. Il est nécessaire avant toute chose d'avoir une connaissance suffisamment complète du phénomène physique. Les courants de Foucault n'étant pas directement accessibles par la mesure, ils ne peuvent être observés que par l'intermédiaire de mesures sur d'autres grandeurs sur lesquelles ils agissent,[4].

Les tubes et plaque peuvent être testés par courants de Foucault (CF), soit en cours de fabrication, soit lors des phases de maintenance. Le CND par capteurs à courants de Foucault est bien adapté à la détection de défauts dans les pièces métalliques. Cette technique est basée sur l'analyse des changements de l'impédance globale de la bobine dans les environs du défaut. La configuration du dispositif électromagnétique est constituée par capteur (bobine), plaque ou (placée à l'extérieur ou à l'intérieur d'un tube conducteur).

Dans ce contexte, les outils de simulation jouent un rôle de plus en plus important pour concevoir les systèmes de contrôle et démontrer leur performance. La modélisation électromagnétique permet de simuler l'interaction entre la sonde et la pièce testée, et de définir une structure de sonde adaptée à un problème donné. Ainsi, il est possible de prévoir les conséquences de différents choix (configuration géométrique, choix de matériaux, etc.) tout en réduisant le nombre de prototypes à réaliser. Dans le domaine du Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault, la modélisation est devenue un outil essentiel dans la conception des sondes, grâce à la performance des technologies informatiques. La modélisation d'une configuration réelle de CND par CF ne peut généralement pas être obtenue analytiquement et nécessite l'utilisation de méthodes numériques. Parmi celles-ci, la méthode des éléments finis

(MEF) est l'une des plus utilisées, car elle permet de prendre en compte des géométries complexes de sondes et de pièces, et s'est imposée comme un outil efficace pour résoudre numériquement les problèmes électromagnétiques.[5]

Dans le premier chapitre de ce mémoire de fin d'étude, nous explorons l'état actuel de la recherche en matière de contrôle non destructif, en nous penchant sur une variété de méthodes employées. Cette section met en lumière les fondements physiques qui sous-tendent ces méthodes.

Le second chapitre approfondit davantage le sujet du contrôle non destructif par courant de Foucault.

Le troisième chapitre de ce mémoire se consacrera à l'étude approfondie du logiciel COMSOL. Au cours de ce chapitre, nous explorerons en détail les fonctionnalités, les outils, et les capacités de COMSOL,

Le dernier chapitre est consacré à la simulation à l'analyse des résultats obtenus.

# Chapitre 1



## 1 Le contrôle non destructif

- Les enjeux de sûreté, les contrôles qualité et de santé des pièces deviennent un impératif incontournable. Le contrôle non destructif (CND) a comme objectif de vérifier le fonctionnement correct des parties critiques d'un système sans en altérer les propriétés physiques. L'histoire du CND commence à la fin du XIX siècle, avec la physique moderne, mais c'est à partir de la seconde guerre mondiale que les techniques de CND ont pris leur essor dans l'industrie, en particulier dans la métallurgie. Vers les années 1960-1970, le développement des centrales nucléaires et de l'aéronautique a engendré une forte accélération du progrès du CND, et différentes méthodes ont été mises au point afin de pouvoir remplir les contraintes dues à la nature du défaut recherché, de la pièce à contrôler (rivetée, soudée, laminée, de forme complexe, . . .) et des conditions dans lesquelles le contrôle doit être effectué (en cours de fabrication, en recette, en service). Les défauts recherchés peuvent être classés en deux grandes familles : les défauts **surfaiques** et les défauts **internes** .
- Les défauts **surfaiques** sont les plus problématiques sur le plan technologique. Ils incluent les criques, les fissures, les piqures, les craquelures pouvant provoquer à terme la rupture de la pièce, ou d'*aspect*, c'est à-dire la variation de paramètres géométriques et/ou physiques de la pièce tels que sa rugosité, son épaisseur, l'homogénéité de la surface, qui rendent la pièce inutilisable.
- Les défauts **internes** sont des hétérogénéités de nature, forme et dimensions variées, localisées dans le volume du corps à contrôler. Ils sont susceptibles d'affecter la santé de la pièce et peuvent se présenter sous la forme d'une crique interne, des porosités, des soufflures, d'inclusions diverses.
- Les techniques développées se différencient essentiellement par le type d'onde utilisé pour sonder le matériau, par exemple les méthodes ultrasonores, les courants de Foucault, les rayons X ou la thermographie infrarouge. Quelle que soit la méthode, les objectifs sont les mêmes : la fiabilité de l'examen, la reproductibilité, la localisation des défauts, leur caractérisation et classement. Les étapes d'un contrôle sont les suivantes :
  - Mise en œuvre d'un processus physique,
  - Modulation ou atténuation de ce processus par les défauts,
  - Détection de ces modifications par un capteur approprié,
  - Traitement des signaux et interprétation des résultats.



Figure 1: Jean Bernard Léon Foucault 1819-1868.

## 2 Le but de Contrôle Non Destructif

Le contrôle non destructif a pour objectif, comme son nom l'indique, de contrôler l'état des pièces industrielles, pour autant que les examens correspondants ne puissent nuire à leur utilisation future. Ceci peut correspondre à deux types de contrôles : l'estimation d'un paramètre constitutif de la pièce et le deuxième cas, il s'agit en général de défauts. Cette procédure de contrôle se produit souvent plusieurs fois au cours de la vie d'une pièce et doit satisfaire au mieux les critères suivants, [5, 6]

### 2.1 La rapidité d'exécution

Il faut que le contrôle soit rapide pour qu'il ne soit pas trop pénalisant à la fois en termes d'immobilisation physique de chaque pièce, mais aussi au niveau des coûts que sont le temps de travail de la main-d'œuvre ou les frais de fonctionnement de l'usine.

- **Le coût**

Le contrôle qualité représente sur les pièces complexes un coût non négligeable et qui doit être minimisé dans la mesure du possible

- **La reproductibilité**

La mesure ne doit pas souffrir des circonstances extérieures : une même pièce contrôlée plusieurs fois doit toujours donner le même résultat.

- **La fiabilité**

Le contrôle doit remplir son cahier des charges, et par exemple détecter tous les défauts qu'il est censé être capable de détecter, indépendamment des conditions d'inspection.

- **La sensibilité**

La sensibilité est le rapport des variations de la mesure et du mesurande. Plus la sensibilité est grande, plus les petites variations du mesurande sont détectables, comme par exemple les défauts de faibles dimensions.

- **La résolution**

La résolution est la plus petite variation de signal pouvant être détecté, par exemple la dimension du plus petit défaut. Usuellement est défini le pouvoir de résolution, ici la dimension du plus petit défaut visible. Le pouvoir de résolution est fort si cette dimension est petite, [5].

### 3 Quand utiliser le contrôle non destructif

- Il existe des applications des essais non destructifs à tous les stades de la fabrication d'un composant ; Assistance dans le développement de la production ;
- Examen et choix des matériaux ;
- Gestion, amélioration ou contrôle du processus de fabrication, Vérification des assemblages[7]

### 4 Différentes techniques du contrôle non destructif

La diversité des pièces à inspecter, de leurs géométries, de leurs matériaux et des conditions d'inspection, interdit à une méthode de CND d'être universelle. Un certain nombre de technique existe et chacune présente certains avantages et inconvénients. [3] Parmi les techniques de contrôle non-destructif existant, nous proposons d'étudier, les techniques de ressuage, examen Visual, la magnétoscopie, la radiographie, la thermographie, les courants de Foucault et l'ultrason.

#### 4.1 Examen Visuel

Le contrôle visuel est le plus ancien des contrôles non-destructifs, c'est la méthode la plus utilisée, car la plus économique à mettre en œuvre. Elle nécessite uniquement les « bons yeux » d'un opérateur.

##### 4.1.1 Principe

L'examen visuel est le procédé de contrôle le plus ancien, le plus simple et le plus général. L'examen visuel ancestral le plus élémentaire, est la base des contrôles optiques non automatiques. Il peut être aidé, par un éclairage laser ou classique, une loupe binoculaire, ou un système de télévision. De façon automatique, sont réalisées en général des acquisitions d'images par balayage laser ou par utilisation de barrettes de capteurs optiques suivies de traitement d'images tels que le seuillage ou la reconnaissance de formes.

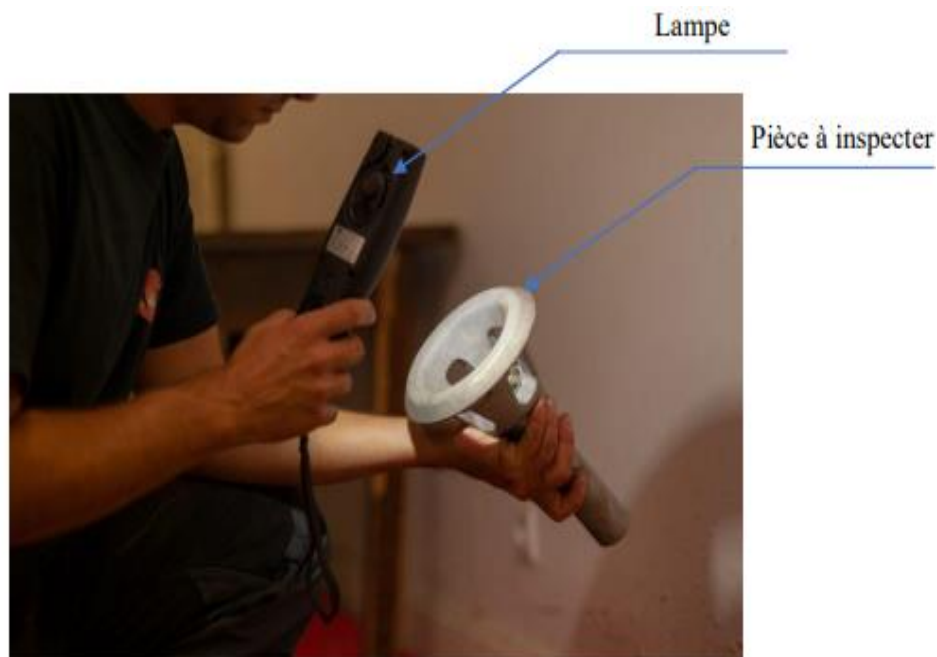


Figure 2:Principe de l'Examen Visuel

### 4.1.2 Domaine d'application

Applicable pour tous les matériaux et pour défauts débouchant.

### 4.1.3 Propriétés (Avantages et Inconvénients) du CND par l'Examen Visual

#### ❖ Avantages

- Souplesse de mise en œuvre
- Ce type de contrôle beaucoup plus efficace, rapide et fiable.

#### ❖ Inconvénients

- Un contrôle suffisant pour la détection des défauts débouchant en surface.
- Définition incomplète des critères.
- Complémentaire à une autre technique.

## 4.2 Ressuage

Le ressuage, appelé aussi « liquide pénétrant d'inspection », est l'une des techniques de CND les plus simples et les plus largement utilisées. Cette technique ne permet de détecter que les défauts de surface, quel que soit leur forme et leur taille, dans tous les matériaux.

### 4.2.1 Principe

Le ressuage consiste à appliquer sur la surface de la pièce à contrôler, préalablement nettoyée et séchée, un liquide d'imprégnation coloré ou fluorescent. La première étape de la méthode consiste à bien nettoyer la pièce à contrôler. Un liquide coloré ou fluorescent dit « pénétrant » est ensuite appliqué sur la surface de la pièce. Il va s'infiltrer à l'intérieur des anomalies (fissures, porosités...). L'excès du liquide présent à la surface de la pièce est éliminé par lavage. La surface est ensuite recouverte d'un révélateur qui attire le liquide d'imprégnation retenu dans les défauts, ce que désigne le terme « ressuage ». (Voir la figure3)

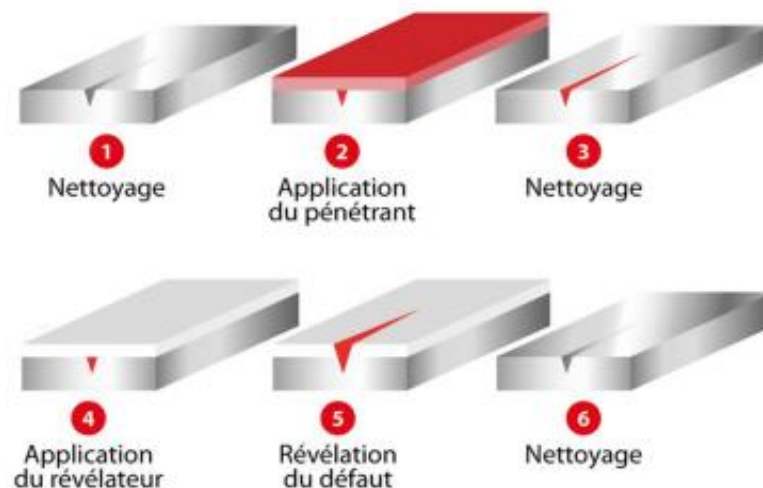


Figure 3:Principe du CND par Ressuage

### 4.2.2 Domaines d'application du Ressuage

Permet de détecter la plupart des défauts débouchant en surface sur les matériaux métallique. Propriétés (Avantages et Inconvénients) du CND par Ressuage

#### ❖ **Avantage**

- Facile à mettre en œuvre manuellement ;
- Économique ;
- Détection possible de petits défauts susceptibles de générer des fuites ;
- Utilisable sur des pièces ferromagnétiques lorsque les problèmes des désaimantations sont critiques ou lorsque les pièces présentent une géométrie trop complexe ;

#### ❖ **Inconvénients**

- Uniquement sur défauts surfaciques ;

## 4.3 Magnétoscopie

La magnétoscopie est une technique de CND qui permet de détecter les défauts de surface (i.e défauts débouchant) ainsi que ceux proche de la surface (i.e défauts sous-jacents) dans les matériaux ferromagnétiques (les aciers ordinaires, le fer, le nickel, le cobalt...). Cette technique est caractérisée par sa simplicité de mise en œuvre et son efficacité maximale dans la détection des défauts de surface.

### 4.3.1 Principe

On applique un fort champ magnétique ou un fort courant sur la pièce et on visualise à l'aide d'une poudre métallique les lignes de champ au droit des défauts. L'examen des pièces se fait le plus souvent sous éclairage UV.

L'examen magnétoscopie consiste à soumettre la pièce ou une partie de la pièce à un champ magnétique de valeur définie en fonction de la pièce. Les discontinuités superficielles provoquent à leur endroit des fuites magnétiques qui sont mise en évidence par des produits indicateurs déposés à la surface de la pièce. L'image magnétique obtenue est observée dans des conditions qui dépendent du produit indicateur utilisé. (Soit à l'aide d'un film magnétisable (magnétoscopie), soit à l'aide d'appareils de mesure de champ magnétique, magnétoscopie).

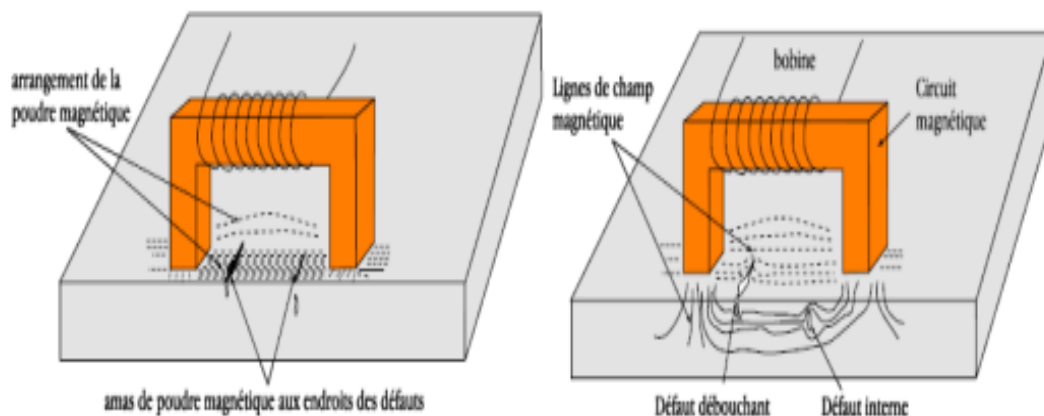


Figure 4: Principe du CND par magnétoscopie

### 4.3.2 Domaine d'application de la Magnétoscopie

Elle ne s'applique qu'aux matériaux et alliages ferromagnétiques (fer, acier, fonte, ...).

### 4.3.3 Propriétés (Avantages et Inconvénients) du CND par Magnétoscopie

#### ❖ Avantages

- La méthode est relativement simple de mise en œuvre ;
- Permet une localisation précise des défauts de surface ou légèrement sous-jacents ;
- Les différentes séquences de la mise en œuvre se prêtent bien à l'automatisation ;

#### ❖ Inconvénients

- La méthode ne s'applique que sur les matériaux ferromagnétiques ;
- La sensibilité est dépendante de l'orientation du défaut par rapport à la direction générale des lignes d'induction ;

## 4.4 Radiographie

La radiographie est l'une des techniques de contrôle non destructif, les largement utilisées. Dans cette technique, les rayons x (ou les rayons gamma) sont utilisés comme moyen de détection.

### 4.4.1 Principe

Le principe de fonctionnement de la radiographie repose sur la différence d'absorption. Un matériau présentant un défaut et ayant un coefficient d'absorption massique  $\mu$  est placé sous une source de rayons x. Étant donné que l'air n'atténue pas le faisceau de rayons x. On peut supposer que le défaut n'absorbe pas les rayons x. Par conséquent, l'intensité du faisceau de rayon x détectée dans le point A sera inférieure à celle enregistrée en B. cela peut s'expliquer par le fait que le faisceau de rayon x passant par le trajet menant au point A traversera plus de matière que celui allant vers le point B, [7].

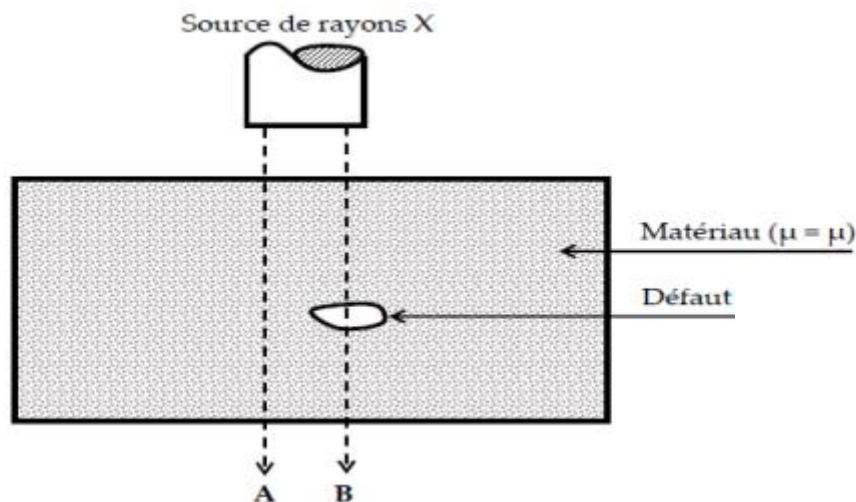


Figure 5: Principe du CND par Radiographie

#### 4.4.2 Domaine d'application

Le champ d'application de la radiographie industrielle est très vaste ; c'est en effet souvent la technique retenue lorsqu'il s'agit de mettre clairement en évidence et de dimensionner des hétérogénéités nocives à l'intérieur des objets de toutes natures, aussi bien au stade de la fabrication qu'à celui des contrôles de maintenance.

La quasi-totalité des matériaux peut être examinée en radiographie et les épaisseurs contrôlées peuvent être importantes. En revanche, la méthode est coûteuse sur le plan du matériel et de la mise en œuvre.

#### 4.4.3 Propriétés (Avantages et Inconvénients) du CND par Radiographie

##### ❖ Avantages

Les avantages majeurs des techniques radiographiques X et  $\gamma$  sont :

- De fournir une image constituant directement un document archivable du contrôle montrant l'absence présumée ou la présence d'un défaut dont on peut éventuellement apprécier la nature et la taille ;
- Contrôle des objets de forme compliquée ;
- De garantir, dans une certaine mesure, la fiabilité de l'examen et le respect des procédures grâce à l'utilisation des témoins IQI.

##### ❖ Inconvénients

- Les inconvénients principaux de ces techniques sont :
- La nécessité de mettre en œuvre des dispositifs et procédures de protection du personnel
- Le risque de ne pas détecter les fissures se présentant selon l'axe du faisceau ;
- La faible productivité allée à un coût élevé lorsqu'il s'agit de faire de multiples examens systématiques avec films.

#### 4.5 Thermographie

L'AFNOR définit la thermographie comme la " technique permettant d'obtenir, au moyen d'un appareillage approprié, l'image thermique d'une scène thermique observée dans un domaine spectral de l'infrarouge ". [8]



Figure 6: Principe du CND par Thermographie

##### 4.5.1 Principe

La thermographie repose sur l'étude de la diffusion de la chaleur dans la cible à contrôler. Une quantité de chaleur est une quantité d'énergie stockée dans la matière et la température en

est un indicateur mesurable. La thermographie consiste en l'interprétation des cartes thermiques (thermogrammes) des surfaces observées.

Une distinction est faite entre la thermographie passive qui résulte de la simple observation des gradients thermiques sur une pièce, et la thermographie active lorsqu'une perturbation thermique a été volontairement générée pour le contrôle (par une source laser par exemple). Les discontinuités dans la pièce se traduisent par des différences de température sur l'image. L'acquisition des images thermiques s'obtient alors à l'aide d'une caméra thermographique. [9]

Cette technique est bien adaptée pour la détection des défauts sous-jacents dans les matériaux métalliques et composites. Toutefois, elle ne permet pas de déceler les défauts profonds puisque sa sensibilité diminue avec les fortes épaisseurs et la géométrie de la pièce contrôlée doit être relativement simple. [11]

#### **4.5.2 Domaines d'applications de la thermographie infrarouge**

L'analyse thermographique est utilisée dans des domaines divers, dans le but d'établir un diagnostic :

- **Industrie** : contrôle des installations électriques, électromécaniques, hydrauliques, frigorifiques...
- **Bâtiment** : contrôle thermique des infiltrations et de l'isolation (sociétés de gestion immobilière, hôpitaux...)

#### **4.5.3 Propriétés (Avantages et Inconvénients) du CND par Thermographie**

##### **❖ Avantages**

- Méthode relativement rapide ;
- Mesure sans contact ;
- Toute l'épaisseur de la pièce est généralement contrôlée ;
- La précision ; grâce à l'image vous savez exactement à quel endroit porter votre attention ;
- La sensibilité à la détection des défauts de faibles dimensions ;
- Mesure en temps réel ;
- Prédiction des défauts, car les gros échauffements sont signes de défaillances annoncées
- La possibilité d'archivage des résultats par la caméra infrarouge.

##### **❖ Inconvénients**

- Nécessite un opérateur compétant et formé ;
- Perturbation des mesures par l'environnement ;
- Des difficultés de localisation de la profondeur des défauts ;
- Nécessite du matériel spécifique et onéreux ;
- Difficulté d'interprétation des résultats.

#### **4.6 Ultrasons**

Les ultrasons sont des vibrations mécaniques qui se propagent dans la matière. Cette technique permet la détection de défaut à l'intérieur d'un matériau par la transmission et la réflexion d'onde de type ultrasons à l'intérieur de ce dernier.

Principe Le principe consiste à émettre une onde ultrasonore (par un transducteur) qui se propage dans la pièce à contrôler et se réfléchit, à la manière d'un écho, sur les obstacles qu'elle rencontre (défauts, limites de la pièce). Les échos sont analysés sur un écran ou traités dans une chaîne de mesure. [8]

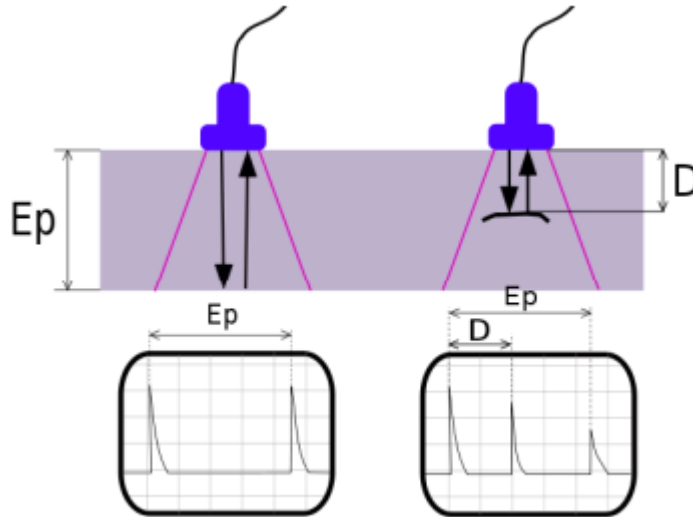


Figure 7: Principe du CND par Ultrason

#### 4.6.1 Propriétés (Avantages et Inconvénients) du CND par Ultrasons

##### ❖ Avantages

- Méthode de contrôle rapide ;
- Adaptée aux zones d'accès difficiles ;
- Détection, localisation et dimensionnement des défauts ;
- Acquisition et analyse en temps réel ;
- Haute sensibilité de détection des défauts ;
- Grand pouvoir de pénétration (plusieurs mètres dans l'acier forge) ;
- Sauvegarde numérique des données.

##### ❖ Inconvénients

- Une méthode qui nécessite une expérience un très haut niveau de technicité ;
- Sensible à la nature et à l'orientation des défauts.
- Inspection limitée par la complexité de la forme de la pièce contrôlée.

## 5 Technique du contrôle non destructif par courant de Foucault

Par sa simplicité et son efficacité, le contrôle par courants de Foucault (CND-CF) est la technique la plus utilisée dans la caractérisation des défauts de surfaces dans les matériaux conducteurs d'électricité. Le CND-CF repose sur le phénomène d'induction électromagnétique dont une particularité essentielle est de pouvoir injecter de l'énergie électromagnétique dans un matériau conducteur (induit), sans qu'il y ait contact avec l'inducteur.

### 5.1 Principe du CND-CF

Lorsque l'on place un corps conducteur dans un champ magnétique variable dans le temps ou dans l'espace, des courants induits se développent en circuit fermé à l'intérieur de celui-ci : ce sont les courants de Foucault (Physicien Français 1819-1868).

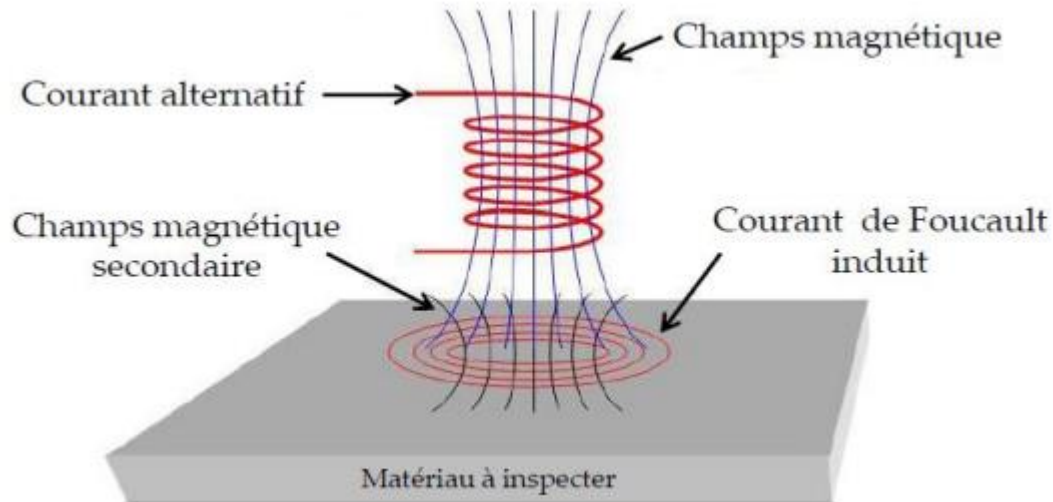


Figure 8:Principe du CND par courant de Foucault [10]

Une bobine du capteur placée à proximité d'une pièce conductrice parcourue par un courant variable, courant alternatif par exemple, génère de tels courants induits dans la pièce. Appelés courants de Foucault.

Ces courants reproduisent à leur tour un flux magnétique opposant au flux d'excitation, modifiant par la même la f.e.m de la bobine. On conçoit dès lors qu'un défaut, constituant une discontinuité électrique venant perturber la circulation des courants de Foucault, puisse engendrer une variation de la f.e.m induite dans la bobine ou de manière équivalente la variation d'impédance décelable au niveau de la bobine d'excitation, [8].

### 5.2 Objectifs du CND-CF

Le contrôle non destructif par courant de Foucault consiste la mise en œuvre de techniques pour la caractérisation de paramètres physiques ou géométriques et la caractérisation électromagnétiques, d'autre parte pour le contrôle de l'état de santé et la détection des défauts. La figure illustre les différents objectifs visés par le CND-CF.

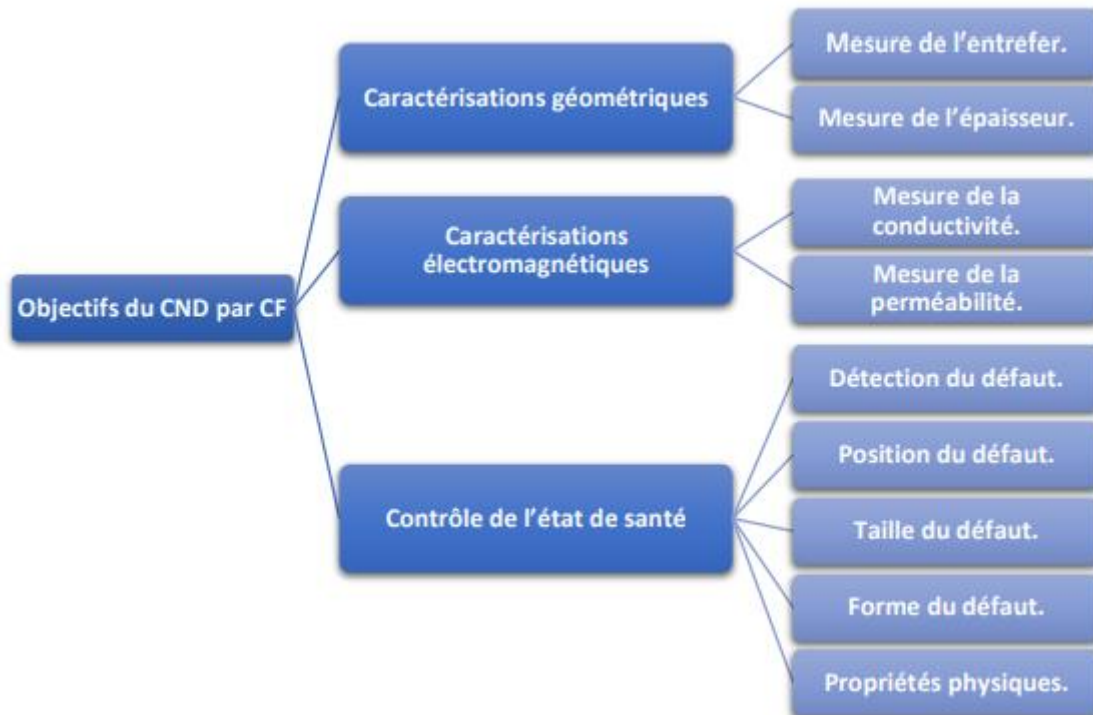


Figure 9: Objectif du CND par CF [10]

### 5.3 Avantages et Inconvénients

Le contrôle par courants de Foucault présente plusieurs avantages tels que :

- Permet la détection des défauts débouchant ou faiblement enfuis (quelques mm) dans tout matériau conducteur.
- Rapidité de balayage et de détection.
- La simplicité de leur mise en œuvre.
- Aucune préparation particulière de la surface contrôlée.
- Ne nécessite pas l'utilisation de produits couplant.
- Aucune nuisance ou pollution.
- Traitement informatique avec stockage des données de modélisation.

### 6 Domaines d'application

Ces méthodes du CND sont très utilisées dans :

- L'industrie automobile (contrôle des blocs moteurs) ;
- L'industrie navale (contrôle des coques)
- L'aéronautique (poutres, ailes d'avion, pièces de moteur, trains d'atterrissage...)
- L'aérospatiale et l'armée (dont la totalité des programmes sont confidentiels)
- L'industrie de l'énergie (réacteurs, chaudières, tuyauterie, turbines, etc.)
- Le ferroviaire en fabrication et en maintenance notamment pour les organes de sécurité (essieux, roues, bogies)

## 7 Méthodologie de développement des systèmes de CND

Indépendamment de la technique de CND utilisée, l'élaboration d'un système peut être décomposée en cinq phases fortement couplées figure (10). Tout d'abord, on se fixe l'objectif du contrôle qui est souvent :

- Caractérisation (électrique, magnétique et géométrique) des matériaux ;
- Recherche des défauts dans la structure des matériaux ;
- Caractérisation des défauts.

La première phase consiste à essayer de comprendre et d'analyser l'interaction entre le champ émis par le capteur et la pièce à contrôler. Ensuite, vient la traduction des phénomènes mis en jeu par des modèles analytiques, semi-analytiques ou numérique. Ces outils de simulation sont à la base de la conception et l'optimisation des capteurs. Ils permettent aussi d'inverser le rapport capteur/pièce, cela permet à partir de signaux recueillis de s'informer des caractéristiques de la pièce (ou du défaut).

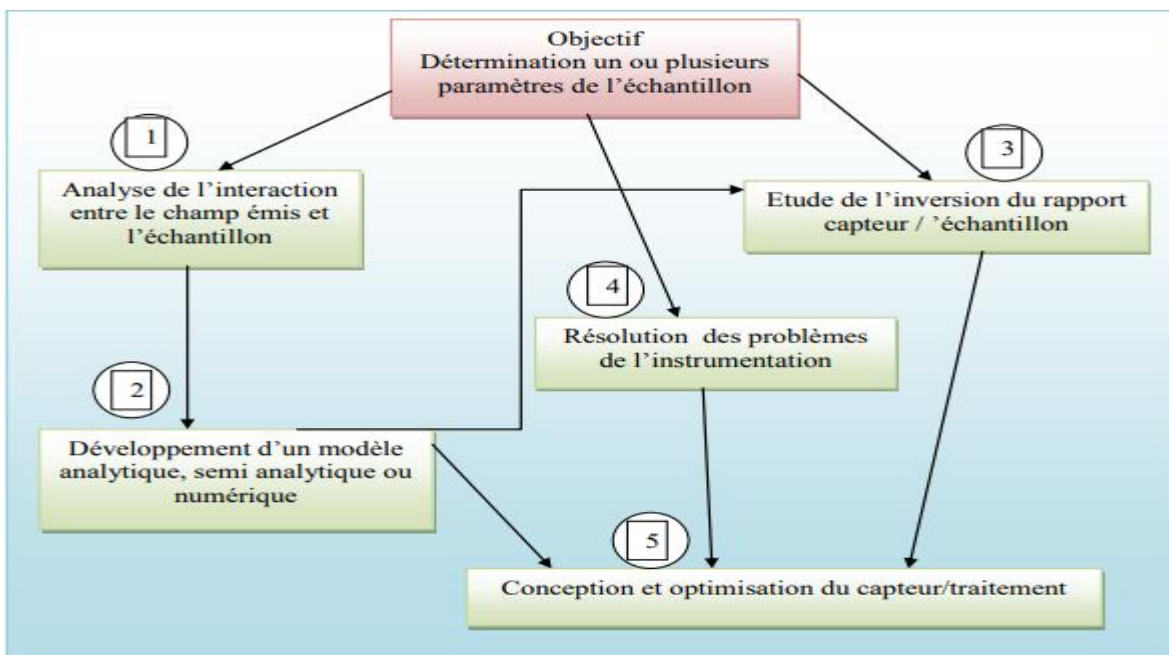


Figure 10: Méthodologie usuelle pour l'étude et développement des systèmes de CND, [15].

Cependant, d'autres problèmes d'instrumentation interviennent. Ils dépendent des paramètres à déterminer (objectif); Par exemple, dans le cas des capteurs inductifs, la détermination des paramètres électriques nécessite un choix de la gamme de fréquences de l'alimentation, [15].

## 8 Principes de détection des défauts

Le défaut, se traduit soit par l'absence de matière (air), ou par une anomalie non conductrice, il peut être situé à la surface de la pièce, au milieu ou à l'intérieur de la pièce, [13,14].

Le principe de la détection d'un défaut consiste à exciter celui-ci et à recueillir sa réponse. Schématiquement, on peut généralement distinguer les étapes suivantes, quelle que soit la méthode employée :

- Mise en œuvre d'un processus physique énergétique ;
- Modulation ou altération de ce processus par les défauts ;
- Détection de ces modifications par un capteur approprié ;
- Traitement des signaux et interprétation de l'information délivrée, [13].

## **9 Classement des défauts détectés en CND**

Le terme défaut est ambigu, relatif et peu précis, mais sa connotation négative évoque bien le rôle que joue le contrôle non destructif dans la recherche de la qualité, En fait, détecter un défaut dans une pièce, c'est physiquement, mettre en évidence une hétérogénéité de matière, une variation locale de propriété physique ou chimique préjudiciable au bon emploi de celle-ci. Brièvement les défauts peuvent être classés en deux grandes catégories liées à leur emplacement les défauts de surface, les défauts internes, [13,14].

### **9.1 Défauts de surface**

Ce sont des défauts accessibles à l'observation directe mais pas toujours visibles à l'œil nu, peuvent se classer en deux catégories distinctes : les défauts ponctuels et les défauts d'aspect.

#### **9.1.1 Défauts ponctuels**

Correspond aux défauts les plus nocifs sur le plan technologique, puisqu'il s'agit des criques, piqûres, fissures, généralement aptes à provoquer à terme la rupture de la pièce, en initiant par exemple des fissures de fatigue. Dans les pièces métalliques, l'épaisseur de ces fissures est souvent infime (quelques  $\mu\text{m}$ ) et elles peuvent être nocives dès que leur profondeur dépasse quelques dixièmes de millimètre, ce qui implique pour leur détection de méthodes non destructives sensibles, telles que le ressuage, la magnétoscopie, les courants de Foucault, les ultrasons.

#### **9.1.2 Défauts internes**

Sont des hétérogénéités de natures, de formes, de dimensions extrêmement variées, localisées dans le volume du corps à contrôler.

Dans les industries des métaux, il s'agira de criques internes, de porosités, de soufflures, d'inclusions diverses susceptibles d'affecter la santé des pièces moulées, forgées, laminées, soudées. Dans d'autres cas, il s'agira simplement de la présence d'un corps étranger dans le produit emballé.

Ici le contrôle visuel est généralement exclu d'office et l'on utilisera donc l'un ou l'autre des grands procédés du CND que sont la radiographie, le sondage ultrasonore, ou encore des techniques mieux adaptées à certains cas comme l'émission acoustique, l'imagerie infrarouge... la majorité des techniques précédemment citées utilisent le capteur comme outil de détection des défauts. Les capteurs sont les premiers éléments rencontrés dans une chaîne de mesure, [13,14].

## 9.2 Limite de détection

La limite de détection est liée à deux facteurs de nature différente : le rapport signal/bruit, le pouvoir séparateur.

### 9.2.1 Le rapport signal/bruit

En sortie d'appareil doit être suffisamment supérieur à 1 pour qu'une conclusion claire soit prise quant à l'absence ou la présence d'un défaut. Ce facteur dépend d'abord de la façon dont le défaut lui-même « émerge » de son environnement que l'on doit chercher à améliorer (nettoyage et meulage des surfaces très rugueuses, affinage des microstructures trop grossières des métaux) à chaque fois que cela est possible (impératifs techniques et de coût). Ensuite, les conditions d'examen (choix d'un éclairage approprié, d'un angle de tir, d'une fréquence d'excitation, etc.), la qualité de l'appareillage (bruit électronique) et la nature du traitement de l'information (imagerie, renforcement des contrastes) devront concourir à accroître le rapport signal/bruit, [13].

### 9.2.2 Le pouvoir séparateur

Correspond à la limite physique de détection ; son fondement théorique est bien établi dans le cas des techniques utilisant une onde vibratoire telles que l'optique ou le contrôle ultrasonore. Les lois de la diffraction impliquent en effet que cette limite soit proportionnelle au rapport  $\lambda/D$ ,  $\lambda$  étant la longueur de l'onde dans le milieu considéré et  $D$  l'ouverture de l'appareil, en fait généralement le diamètre de la sonde. Le paramètre  $1/\lambda$  étant proportionnel à la fréquence de la vibration, on comprend ainsi pour-quoi, en contrôle ultrasonore par exemple, l'utilisation de fréquences élevées est favorable à la détection des défauts les plus fins (microscopie ultrasonore). On comprend d'autre part l'intérêt théorique d'accroître fortement le paramètre  $D$  (technique d'ouverture synthétique en hyperfréquence et ultrasons, holographie), [13].

## 9.3 Principe des capteurs inductifs

Un capteur inductif est constitué d'une bobine enroulée sur un noyau de ferrite. Ce capteur est alimenté par courant électrique variable. L'approche d'une cible conductrice et/ou magnétique du capteur modifie la répartition des lignes de champ et se traduit par une variation de l'impédance du capteur. Cette variation est due à la pénétration des lignes de champ à l'intérieur de la cible, [12].

### 9.3.1 Capteur à courants de Foucault (CCF)

L'effet résultant de l'approche d'une cible peut être mis en évidence, puis analysé en mesurant l'impédance du bobinage d'excitation. Lorsque la cible est purement conductrice, le champ incident induit des courants dénommés courants de Foucault. Ces derniers génèrent un champ magnétique réactif opposant au champ excitateur (loi de Lenz). Une variation de l'impédance ainsi apparaît. On parle dans ce cas de « capteur à courants de Foucault » figure (11).

L'amortissement des courants de Foucault 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 alors l'épaisseur de peau par :

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$$

**f** : La fréquence d'excitation ;

**$\sigma$**  : La conductivité électrique de la cible.

**$\mu$**  : La perméabilité magnétique ;

Dans le cas général, cette formule n'est pas rigoureuse. Néanmoins elle renseigne sur la profondeur au-delà de laquelle les courants induits sont trop faibles pour être influents, [10].

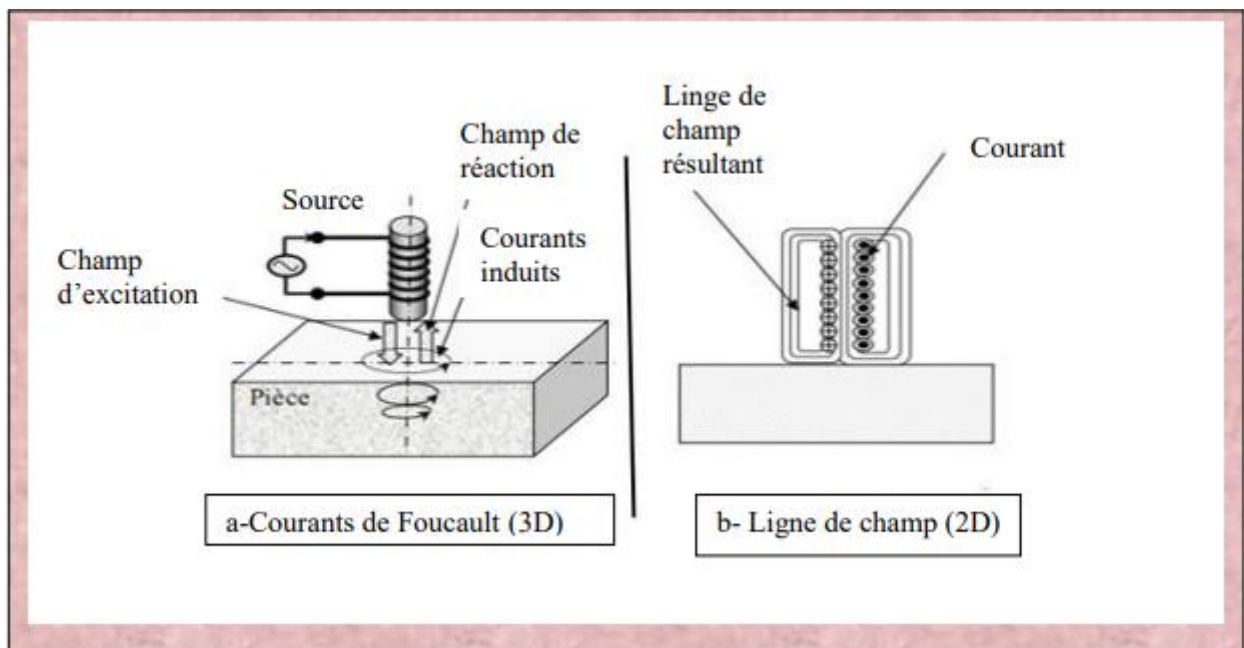


Figure 11: Capteur à courants de Foucault, [12].

### 9.3.2 Inspection des pièces magnétiques (CCF et CM)

Dans le cas général où la cible présente à la fois de bonnes propriétés conductrice et magnétique, seule la gamme de fréquence de l'alimentation du capteur distingue les deux technologies CCF et CM. A fréquence élevée, le champ développé ne pénètre quasiment pas dans la cible. Le dispositif fonctionne en CCF. Par contre si la fréquence est faible le capteur fonctionne en CM. Pour des fréquences intermédiaires et à une certaine distance de mesure, les deux phénomènes d'attraction et de répulsion du champ s'équilibrent et le dispositif peut être qualifié à la fois de CCF et CM. Cependant, un fonctionnement à champ continu (cas extrême des CM) a été évité car toutes pièces métalliques situées à proximité du capteur risquent alors de s'y coller. D'autre part, si le capteur fonctionne à faible fréquence, l'environnement électromagnétique ne serait pas favorable (fréquence de hachage des courants de traction, tapis piloté automatique). Ces remarques, ont conduit à privilégier un

fonctionnement en CCF, [12].

- **Critères de choix de la méthode de contrôle**

- Nature du défaut recherché (son origine, sa forme et dimensions) et sa localisation dans la pièce.
- Le matériau de la pièce à contrôler.
- Nombre de pièces à contrôler.
- Cout du contrôle et cout de la pièce.
- Moyens et instruments de contrôle disponibles
- Sécurité de l'opérateur et de l'appareillage ou la machine qui comporte la structure à contrôler.

## **10 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons décrit les principes, les avantages et les inconvénients ainsi que les domaines d'application des principales techniques de contrôle non destructif les plus utilisées dans le secteur industriel à savoir : l'examen visuel, le ressuage, la magnétoscopie, la radiographie, la thermographie, les ultrasons et enfin la technique des courants de Foucault.

Ensuite en c'est focaliser sur le CND par courant de Foucault ou on a éclairci son principe, son objectif, ses avantages et inconvénients.

Enfin on a parlé de la classification des capteurs en CND-CF et de différents défauts. Nous avons constaté qu'il n'y a pas de technique de CND qui soit valable pour tous les matériaux et tous les défauts mais qu'ils sont complémentaires, car le choix d'une technique dépend de plusieurs facteurs parmi eux : le but du contrôle, la nature du matériau à contrôler (conducteur ou isolant), les dimensions et l'état de surface de ce dernier.

# Chapitre 2

## 1 Introduction

Le principe du CND par courants de Foucault qui consiste à placer la zone à examiner dans un champ électromagnétique et à recueillir en surface une perturbation de celui-ci liée à la présence d'un objet ou d'un défaut. Le système est donc constitué d'une source électromagnétique, d'un capteur et d'un organe de traitement de l'information recueillie dont le rôle est de caractériser l'intrus.

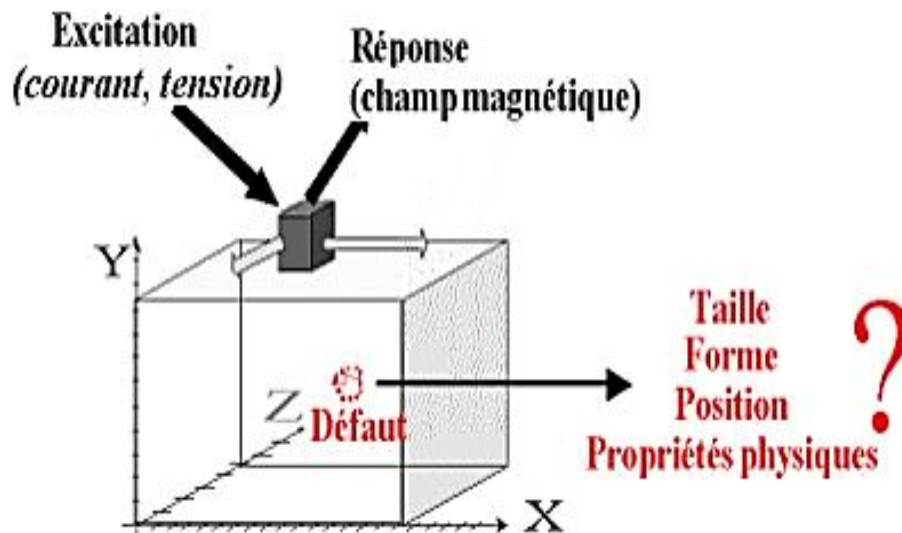


Figure 12: Principe du CND par Courants de Foucault

Le contrôle non destructif par courant de Foucault est une technique largement utilisée dans de nombreux domaines industriels pour détecter et caractériser les défauts de surface dans les matériaux conducteurs. Cette méthode exploite les principes de l'induction électromagnétique pour évaluer les variations de conductivité ou d'épaisseur des matériaux, permettant ainsi la détection de défauts tels que des fissures, des décollements, des porosités ou des inclusions.

Cette technique présente de nombreux avantages par rapport à d'autres méthodes de contrôle non destructif. Elle permet des inspections rapides et fiables sans endommager les pièces, réduisant ainsi les coûts de maintenance et de production. De plus, le contrôle par courant de Foucault peut être utilisé sur une grande variété de matériaux conducteurs, tels que les métaux, les alliages, les composites conducteurs et les matériaux ferromagnétiques.

## 2 LE PRINCIPE DU CONTRÔLE PAR COURANTS DE FOUCAULT

Le contrôle par courants de Foucault est basé sur les lois de l'induction magnétique (découverte par Faraday). On appelle courant de Foucault, les courants induits dans un matériau conducteur par une variation de flux d'induction magnétique. D'après la loi de Lenz, ces courants se développent de manière à s'opposer au phénomène qui leur a donné naissance.

Il en découle, dans le matériau, une induction résultante variant en module est en phase, en fonction de l'épaisseur traversée par cette dernière.

L'intensité de la répartition de l'induction et donc des courants de Foucault dépendent principalement de :

- La conductivité
- La perméabilité
- La fréquence du courant d'excitation
- La géométrie du conducteur (siège des courants induits)
- La géométrie de l'inducteur
- La présence éventuelle de défaut
- De l'entrefer inducteur matériau sous contrôle

L'amplitude des courants induits diminue rapidement lorsqu'on s'éloigne de la source d'excitation : c'est le phénomène d'effet de peau, et de même pour l'induction. De plus, l'intensité de ceux-ci est liée à l'importance des variations de flux. En effet, plus la variation de flux est élevée, plus l'intensité des courants est importante à proximité de l'inducteur, et plus cette intensité décroît rapidement avec la profondeur.

On peut de cette manière injecter de l'énergie électromagnétique dans la pièce à contrôler sans qu'il y ait de contact. Par l'intermédiaire de mesure adaptée, l'évolution de cette énergie va donner accès à certaines informations concernant la pièce métallique (conductivité, perméabilité, présence de défauts,.).

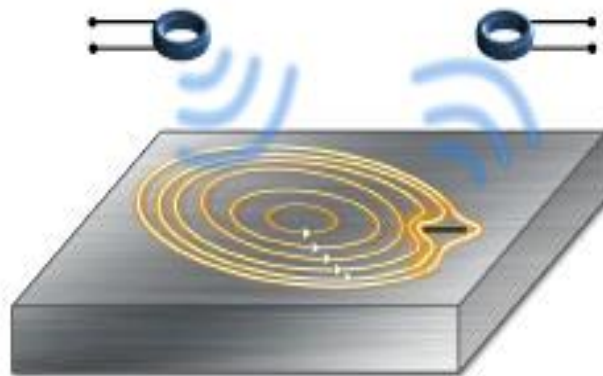


Figure 13: Principe de fonctionnement du contrôle non destructif par courants de Foucault.

On se place en régime harmonique et on considère une bobine caractérisée par  $N$  spires, parcourues par un courant d'excitation (la pulsation et  $f$  la fréquence), L'impédance de la bobine dans l'air, en -, peut être définie :

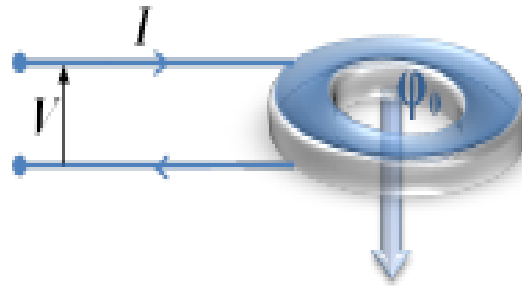


Figure 14: Bobine parcourue par un courant I et flux magnétique  $\varphi_0$  généré par ce courant

$$Z_{bob} = Z_0 = R_0 + jX_0$$

Avec  $X_0 = \omega L_0 \times R_0$ ,  $X_0$  et  $L_0$  sont respectivement la résistance (en -), la réactance (en -) et l'inductance (en H) de la bobine . A proximité d'une pièce conductrice, un champ de réaction s'oppose au champ d'excitation de la bobine, ' $\varphi_0$ ' sur la figure 14, modifiant ainsi la valeur de l'impédance :

$$Z_{piece} = Z_{peice} = R_{piece} + jX_{piece}$$

En présence d'un défaut dans la pièce, une variation supplémentaire due à la modification du champ causée par la déviation des courants de Foucault affecte l'impédance de la bobine qui devient :

$$Z_{bob} = Z_{piece} + (\Delta R_{\text{defaut}} + \Delta jX_{\text{defaut}})$$

Nous pouvons considérer le plan d'impédance afin de mettre en évidence l'effet du défaut sur l'impédance du bobinage, figure 15. Le point 1 correspond à la valeur  $Z_{bob}$  dans l'air, le point 2 à la valeur  $Z_{piece}$  et le point 3 à la valeur  $Z_{piece}$ . L'écart entre les points 2 et 3 représente la signature du défaut et c'est cette variation qui est exploitée pour détecter sa présence.

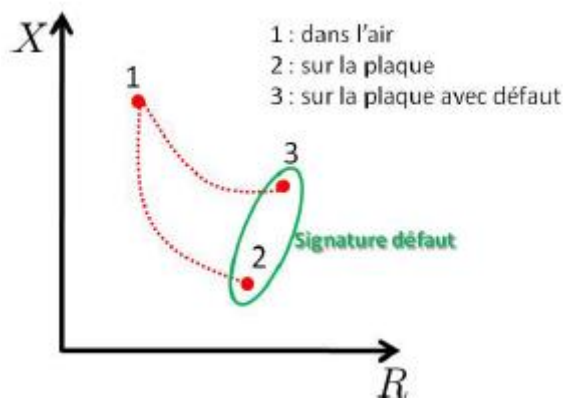


Figure 15: Effet du défaut sur la valeur de l'impédance de la bobine.

Cette technique est surtout utilisée pour détecter des défauts superficiels dans la mesure où les courants de Foucault se développent principalement à la surface des corps conducteurs, cet aspect est détaillé dans le paragraphe suivant dédié à l'effet de peau.

## 2.1 L'effet de peau

L'intensité des courants de Foucault dans une cible constituée d'un matériau conducteur caractérisé par une conductivité électrique  $\sigma$  (en  $sm^{-1}$ ) et une perméabilité magnétique  $\mu$  (en  $hm^{-1}$ ), diminue avec la profondeur. Cet effet est décrit par la profondeur de pénétration conventionnelle  $\delta$  (en m), souvent nommée épaisseur de peau. En pratique, on peut détecter des défauts jusque'à une profondeur de quelques  $\delta$ . L'épaisseur de peau est définie :

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}$$

Si on considère une pièce plane infini en épaisseur et en (x,y), excitée par un courant extérieur, de fréquence  $f$  (en Hz), 63% des courants circulent dans l'épaisseur de peau. Le module de la densité de courants dans la pièce est donné par la relation :

$$J(z) = J_s e^{-\frac{z}{\delta}}$$

Avec  $z$  la profondeur considérée à l'intérieur de la pièce,  $J(z)$  le module de la densité de courant à la profondeur  $z$  et  $J_s$  le module de la densité de courant à la surface de la pièce  $Z=0$ . Nous pouvons constater que la densité de courant décroît de manière exponentielle dans la pièce, comme montré dans la figure 16.

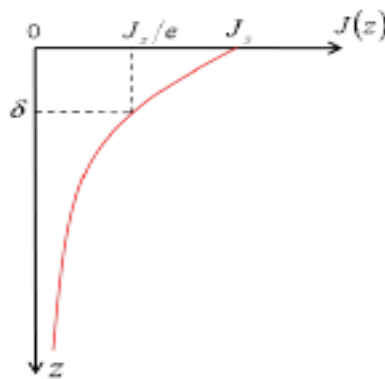


Figure 16: Répartition des courants de Foucault dans une pièce en fonction de la profondeur  $z$ .

Dans le tableau de la figure 17, les valeurs théoriques de la conductivité *et* de la perméabilité de certains matériaux sont données. La figure 18 montre l'évolution de la profondeur de peau en fonction de la fréquence pour les matériaux cités ci-dessus. On peut remarquer qu'aux basses fréquences l'épaisseur de peau est plus élevée, et dans le cas ferromagnétique (le nickel et le fer), elle est beaucoup plus faible que dans les cas non magnétiques à cause des valeurs élevées de  $\mu_r$ .

Pour les matériaux ferromagnétiques, la perméabilité magnétique est un paramètre difficile à estimer, qui nécessite de mesures expérimentales effectuées sur l'échantillon que l'on souhaite caractériser. Après une recherche bibliographique, nous avons choisi un échantillon de matériau composé d'un alliage de fer et nickel, connu sous le nom de radiometal 36 (36% de nickel). Ce matériau présente l'avantage d'être caractérisé par des faibles valeurs du champ.

Matériau	$\sigma [MSm^{-1}]$	$\mu_r$
Alliage Titane	0.74	1
Inconel 600	1.02	1.009
Acier inoxydable 304 L	1.39	1.04
Alliage Aluminium	18	1
Aluminium	35.4	1
Nickel	14.3	110
Fer	10	10000

Figure 17: Conductivité électrique et perméabilité magnétique théoriques de matériaux à contrôler dans l'industrie.

La plage générale d'utilisation des CF se situe entre 10Hz et 10MHz. En effet, pour une fréquence trop basse, l'amplitude des CF sera faible. Une fréquence trop élevée fait apparaître des phénomènes capacitifs parasites engendrés par les capacités inter-spires de la sonde. Celles-ci provoquent des résonances et tendent à court-circuiter le circuit inductif.

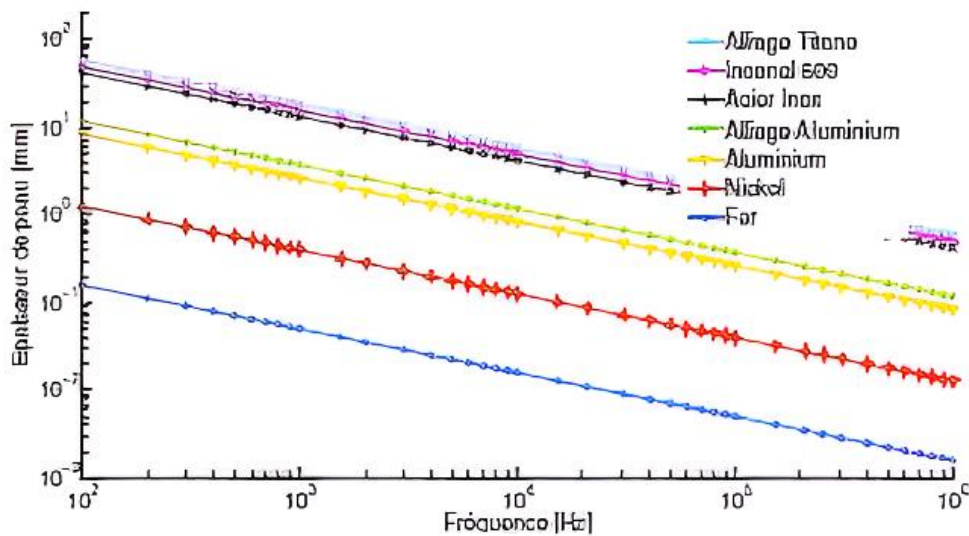


Figure 18: Évolution de l'épaisseur de peau en fonction de la fréquence dans les matériaux

## 2.2 Exemple de pièces contrôlées en CND par courants de Foucault

Le CND par courants de Foucault est utilisé pour vérifier l'intégrité des structures dans différents domaines industriels, par exemple l'aéronautique, le nucléaire, la métallurgie et le transport ferroviaire. Il existe trois types de contrôle : en fabrication, de qualité et de maintenance.

La fabrication de composants dans la métallurgie ; demande des contrôles en cours de fabrication afin de détecter les éventuels défauts connus et de séparer les pièces défectueuses

dans le meilleur délai possible. Le groupe Vallourec, un des leaders mondiaux de la fabrication de tubes métalliques, utilise des dispositifs de contrôle automatique en fabrication, dont plusieurs sont basés sur la technique des courants de Foucault. Le contrôle de qualité a pour objectif de déterminer la conformité des pièces aux spécifications techniques demandées après leur fabrication.

Enfin, le contrôle en maintenance permet la détection de défauts dans une pièce critique, par exemple une pièce soumise à des fortes contraintes, qu'elles soient d'origine mécanique (vibrations) ou dues à la Variation de température et de pression, ou encore à la corrosion causée par des produits chimiques. Dans l'aéronautique, un des grands enjeux est de contrôler les lignes de rivets pour détecter d'éventuels phénomènes de fissuration qui peuvent se créer en pied de rivet et se propager.



Figure 19: Production de tubes en acier du groupe Vallourec



(a) Airbus A380 (*Airbus*).



(b) Lignes de rivetages sur un fuselage d'A400

Les plateformes pétrolières nécessitent aussi des contrôles périodiques des tubes permettant le transport du pétrole vers la terre, et dans le domaine ferroviaire, le contrôle des rails doit pouvoir assurer l'intégrité de la voie ferrée.

Les parties critiques d'une centrale nucléaire, telles que la cuve du réacteur, les tubes générateurs de vapeur et les tuyauteries de refroidissement, demandent des contrôles périodiques, au cours d'un arrêt du réacteur, très fiables et précis.

### 3 Modélisation du dispositif de CND par CF

Le dispositif de contrôle non destructif par courants de Foucault peut être modélisé par le système. Un matériau, constituant la pièce critique et contenant la fissure, est soumis à l'action d'un champ électromagnétique produit par une bobine représentant un capteur CF où une densité de courant variable dans le temps est imposée (Figure 20) ,[16],[17],[4],[2] .

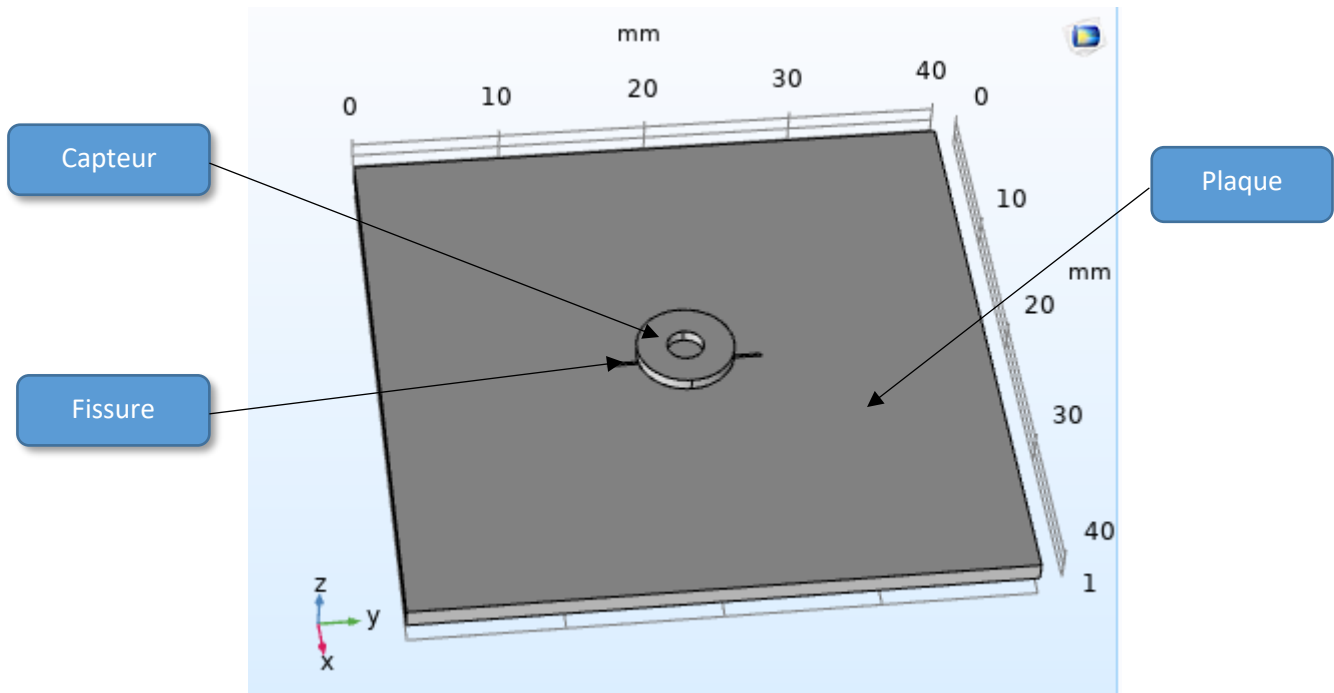


Figure 20 : Système capteur-fissure.

L'objectif est d'évaluer les courants de Foucault dans la pièce défectueuse ainsi que la variation d'impédance de la bobine. Les dispositifs de CND que nous envisageons de modéliser se placent dans le cadre de la magnétodynamique basse fréquence en régime quasi-stationnaire. Il s'agit des dispositifs constitués d'inducteurs filaires, de régions conductrices, non conductrices magnétiques ou amagnétiques et de sources de courant. La modélisation de ces dispositifs peut être ramenée, dans le cas général, à un problème magnétodynamique type. [6],[17],[4],[2]

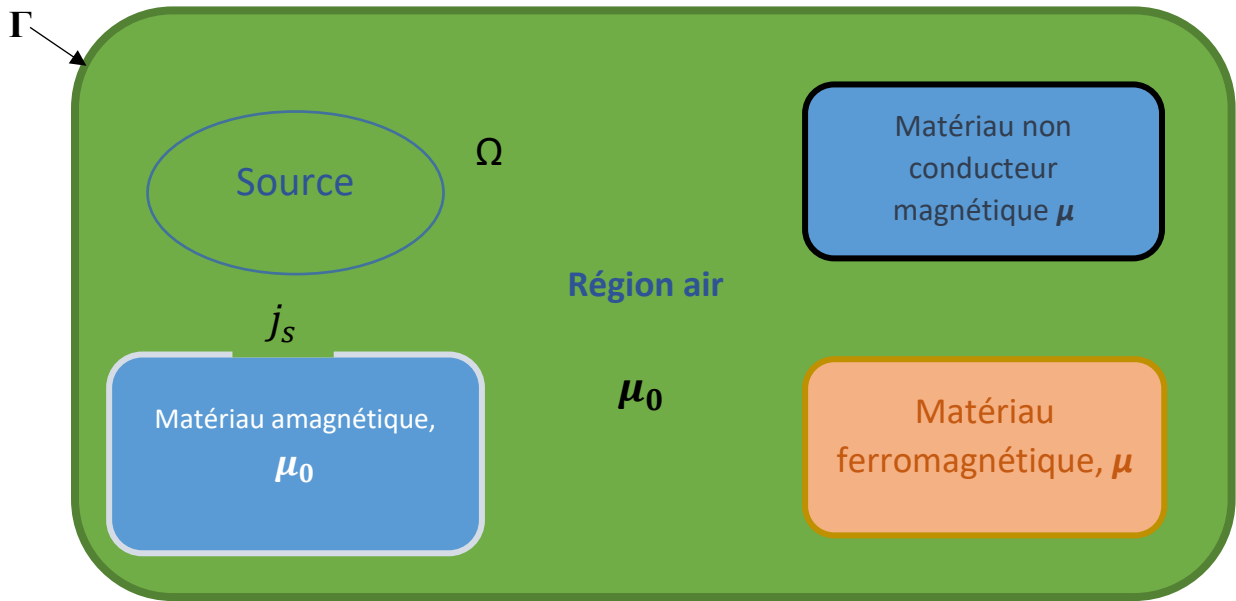


Figure 21: Cas général, d'un problème magnétodynamique, [6].

#### 4 Mise en équations

##### 4.1 Equations de Maxwell

Les équations de Maxwell sont l'expression la plus généralisée des lois de l'électromagnétisme classique. Elles constituent le modèle général de description du comportement et des interactions des champs électriques et magnétiques, et les équations s'écrivent, [16],[17],[4],[2],[25],[26]

La Loi de Faraday :

$$\text{rot } \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \tag{2.1}$$

Théorème de d'ampère-maxwell :

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{j}_s + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \tag{2.2}$$

Loi de conservation du flux :

$$\text{div } \vec{B} = 0 \tag{2.3}$$

Théorème de Gauss :

$$\text{div } (\vec{D}) = \rho \tag{2.4}$$

$\vec{E}$  : Champ électrique [V/m].

$\vec{H}$  : Champ magnétique [A/m].

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

$\vec{B}$  : Induction magnétique [T].

$\vec{D}$  : Induction électrique [ $C/m^2$ ].

$\vec{j}_s$  : Densité de courant [ $A/m^2$ ].

#### 4.2 Lois constitutives du milieu :

Les équations précédentes sont associées aux relations constitutives (lois de comportement) des matériaux.

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (2.5)$$

$$\vec{B} = \mu \times \vec{H} + \vec{B}_r \quad (2.6)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (2.7)$$

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

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

$\varepsilon$  : Permittivité électrique [F/m].

$\vec{B}_r$  : Induction magnétique rémanente [T]

#### 4.3 Conditions aux limites

Les conditions aux limites (spatiales) s'énoncent de façon générale pour un domaine  $\Omega$  de frontière  $\Gamma$  avec  $\vec{n}$  un vecteur normal (unitaire) à  $\Gamma$  pour la variable  $u$ .

- Conditions de Dirichlet homogènes :  $\mu \times \vec{n} = \mathbf{0}$
- Conditions de Neumann homogènes :  $\frac{\partial u}{\partial n} = \mathbf{0}$

#### 4.4 Conditions de continuité

Lors du passage d'un milieu 1 à un milieu 2 figure 22, les grandeurs de champs subissent des discontinuités aux interfaces et, ne sont pas différentiables, [16],[17],[4],[26].

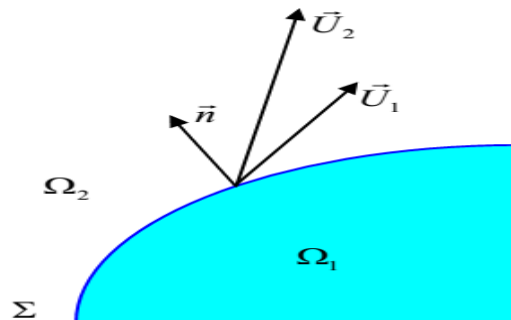


Figure 22: Interface entre deux milieux, [5].

Les relations entre les grandeurs électromagnétiques à l'interface, dites relations de transmission, s'écrivent alors, [16],[17],[19],[2]:

$$(\vec{D}_2 - \vec{D}_1) \cdot \vec{n} = \rho_{sur} \quad (2.8)$$

$$(\vec{B}_2 - \vec{B}_1) \cdot \vec{n} = 0 \quad (2.9)$$

$$(\vec{H}_2 - \vec{H}_1) \cdot \vec{n} = \vec{j}_{sur} \quad (2.10)$$

$$(\vec{E}_2 - \vec{E}_1) \cdot \vec{n} = \vec{0} \quad (2.11)$$

Ou :

$\rho_{sur}$  Est la densité surfacique de charge,  $\vec{j}_{sur}$  la densité surfacique de courant et  $\vec{n}$  le vecteur

#### 4.5 Conditions de Jauge

Dans les équations de Maxwell, les champs s'expriment soit à un gradient près (champ rotationnel), soit au rotationnel près (champ à divergence) ce qui justifie l'utilisation des jauges dans certaines formulations pour assurer l'unicité de la solution. Soient  $\vec{U}$  et  $\vec{W}$  deux champs de vecteurs, les conditions de jauge s'écrivent de façon générale par, [16],[17],[4],[26] :

$$\text{div} \vec{U} = 0 \text{ Jauge de Coulombs} \quad (2.12)$$

$$\text{div} \vec{U} + K \frac{\partial \vec{U}}{\partial t} = 0 \text{ Jauge de Lorentz} \quad (2.13)$$

$$\vec{U} \cdot \vec{W} = 0 \text{ Jauge adapté pour les éléments d'arêtes} \quad (2.14)$$

Par exemple, lorsqu'on utilise une formulation en potentiel vecteur, la solution est obtenue à un gradient près. La jauge de Coulomb s'écrit donc :  $\text{div} \vec{A} = 0$  normal à la surface de séparation des deux milieux  $\Omega_1$  et  $\Omega_2$  et dirigé vers l'extérieur.

#### 4.6 Hypothèses simplificatrices

La plupart des travaux accomplis jusqu'à présent dans le domaine de calcul des champs et des courants de Foucault pour les systèmes électromagnétiques, sont fondés sur les hypothèses suivantes, [16],[17],[4],[26].

Les applications de CND par CF que nous envisageons de modéliser se placent dans le cadre de la magnétodynamique basse fréquence en régime quasi-stationnaire, et en conséquence le courant de déplacement est négligeable  $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{0}$  (Approximation des Régimes Quasi Stationnaires (ARQS)).

Le courant d'alimentation est souvent supposé produit par un générateur de courant parfait et sa valeur doit être connue. Ainsi la quantité  $\sigma \vec{E}$  peut-être décomposée en une partie imposée  $\vec{j}_s$  (densité de courant source) et une partie due au champ électrique induit, pour laquelle on gardera la notation  $\sigma \vec{E}$  qui exprimera uniquement la densité des courants de Foucault :

$$\vec{J} = \vec{j}_s + \sigma \vec{E} \quad (2.15)$$

La densité volumique de charge est considérée comme nulle. Généralement, Le courant n'existe qu'en volume ( $\vec{j}_{sur} = \vec{0}$ ) , c'est-à-dire que la conductivité est finie et que la fréquence

d'excitation n'excède pas quelques MHz (basses fréquences). Par conséquent, la continuité de la composante tangentielle du champ magnétique aux interfaces où la perméabilité subit une discontinuité est assurée :

$$(\vec{H}_2 - \vec{H}_1) \cdot \vec{n} = \vec{0} \quad (2.16)$$

L'induction magnétique rémanente, peut être considérée comme nulle ( $\vec{B}_r = \vec{0}$ ) dans le cas où le système ne contient pas d'aimant permanent.

Avec ces hypothèses, les équations à résoudre sont :

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (2.17)$$

$$\text{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.18)$$

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} \quad (2.19)$$

Avec les relations constitutives qui deviennent :

$$\vec{J} = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} \quad (2.20)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.21)$$

#### 4.7 Champs et potentiels

Les champs de vecteurs  $\vec{E}, \vec{B}, \vec{H}, \vec{J}$  peuvent eux-mêmes s'écrire en fonction de potentiels vecteurs ou scalaires, [16], [17],[4],[2]:

$$\vec{H} = \vec{T} - \text{grad} \varphi \quad (2.22)$$

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A} \quad (2.23)$$

$$\vec{E} = - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \text{grad} v \quad (2.24)$$

$$\vec{J} = \text{rot} \vec{T} \quad (2.25)$$

$\vec{T}$ : Potentiel vecteur électrique [A/m],

$\vec{A}$ : Potentiel vecteur magnétique [Wb/m],

$v$ : Potentiel scalaire électrique [V],

$\varphi$ : Potentiel scalaire magnétique [A].

#### 5 Méthodes de résolution

Différentes méthodes peuvent être utilisées pour la résolution des équations aux dérivées partielles, décrites précédemment.

### 5.1 Méthodes analytiques

Les premiers travaux se sont basés sur des méthodes de résolution analytiques des équations issues des modèles à une seule dimension. Pour les modèles bidimensionnels, la solution analytique peut s'avérer très complexe même si pour des géométries simples, on peut trouver des solutions exactes à partir de la méthode de séparation des variables. Dans des cas particuliers, ces méthodes sont des références de validation pour le reste des autres méthodes,[11],[21],[22],[23].

### 5.2 Méthodes semi analytiques

Ce sont des méthodes mixtes, qui sont une combinaison de méthodes analytiques couplées à des méthodes numériques. Ces méthodes ne sont appliquées que pour résoudre certains types de problèmes. Cette approche nous permet d'obtenir des expressions analytiques faciles à résoudre et de réduire le temps de simulation tout en ayant des résultats assez proches de la réalité.

### 5.3 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,[4],[19],[20]:

#### 5.3.1 Méthode des différences finis (MDF)

La méthode des différences finies est relativement simple de mise en œuvre, mais présente l'inconvénient d'avoir une faible qualité d'approximation des variables et l'incapacité de modéliser des géométries de forme complexe. Par ailleurs, elle exige un schéma de maillage très fin, qui peut ainsi se traduire par un coût de calcul prohibitif. La méthode est basée sur le théorème de Taylor où l'on remplace l'opérateur différentiel par un opérateur aux différences. Le domaine d'études est découpé au moyen d'une grille carrée dans le cas bidimensionnel et une grille cubique dans le cas tridimensionnel, l'équation à résoudre est écrit pour chaque nœud du maillage. La méthode est difficilement applicable aux domaines à géométrie complexe, elle est plutôt réservée aux domaines à géométrie simple et aux frontières régulières tels que les carrés et les rectangles. Modélisation du problème électromagnétique, [4], [19], [20]

#### 5.3.2 Méthode des éléments finis (MEF)

Sans doute ce sont les éléments finis qui occupent une grande place dans la modélisation. Contrairement à la MDF, les éléments finis s'adaptent bien aux géométries complexes, ils permettent d'améliorer considérablement la précision de calcul par la prise en compte de différents types de fonctions d'interpolations des variables. La méthode consiste à mailler l'espace en régions élémentaires dans lesquelles on représente la grandeur recherchée par une approximation polynomiale. Le maillage peut être constitué de triangles ou de rectangles aux sommets desquels on recherche les valeurs de l'inconnue en supposant que, dans ce domaine, l'inconnue varie linéairement en fonction des coordonnées. La méthode conduit à des systèmes algébriques de grande taille, et par conséquent nécessite une mémoire importante des calculateurs. L'avantage de s'adapter aux géométries complexes et la prise en considération des non linéarités ont fait que la méthode des éléments finis soit très utilisée en électromagnétisme bien qu'elle soit quelque peu difficile à mettre en œuvre puisqu'elle requiert une grande capacité de mémoire et un temps de calcul important,[4],[19],[20].

### 5.3.3 Méthode des intégrales de frontières (MIF)

Lorsqu' on utilise la MDF ou la MEF, on calcule les variables inconnues dans tout le domaine. La MIF permet de ramener le maillage à la frontière du domaine, elle ne nécessite pas un maillage volumique ni des matériaux ni de l'espace. Ainsi, le calcul des valeurs de l'inconnue sur les frontières du domaine suffit pour obtenir la solution en tout point du domaine. Pour ramener le problème sur les frontières, la MIF utilise le théorème d'Ostrogradski-Green. Cette méthode peut être intéressante pour l'étude des structures tridimensionnelles ou lorsque l'air ou les milieux passifs occupent une grande partie du domaine d'étude. Cependant, cette méthode a l'inconvénient de conduire à un système algébrique à matrice pleine sans termes nuls. Ceci augmente le temps utilisateur, donc le coût de calcul, [4],[19],[20].

### 5.3.4 Méthode des volumes finis (MVF)

La méthode des volumes finis est une méthode de discrétisation utilisée en particulier en mécanique des fluides. La méthode des volumes finis a connu un essor considérable non seulement pour la modélisation en mécanique des fluides, mais aussi pour la modélisation d'autres branches de l'ingénierie : transfert thermique, électromagnétisme ...etc. La méthode consiste à subdiviser le domaine d'étude  $\Omega$  en volumes élémentaires (tétraèdres, hexaèdres, prismes...etc.) de telle manière que chaque volume entoure un nœud. L'équation EDP du problème est intégrée sur un volume élémentaire. Afin de calculer l'intégrale sur ce volume élémentaire, la fonction inconnue est représentée à l'aide d'une fonction d'approximation (linéaire, parabolique, exponentielle, ...etc.) entre deux nœuds consécutifs. Ensuite, la forme intégrale est discrétisée dans le domaine d'étude. Par rapport aux éléments finis,[4],[19],[20].

## 1 Conclusion

Les équations de Maxwell et les lois de comportement des milieux permettent avec un judicieux raisonnement d'aboutir à une modélisation des phénomènes électromagnétiques sous forme d'équations aux dérivées partielles. Ces équations peuvent être résolues de diverses manières. Dans ce chapitre, la modélisation des problèmes électromagnétiques liés aux équations de Maxwell dans le domaine CND-CF a été présentée, les différentes formulations en champ électrique et magnétique ont

# Chapitre 3

## 1 Présentation du logiciel COMSOL Multi-physiques :



Le logiciel COMSOL a été créé en 1986 par des étudiants de Germond Dahlquis, destiné à la simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis et qui permet de simuler de nombreux phénomènes physiques et applications en ingénierie. C'est un programme polyvalent en termes de :

- 1- Multi physiques, c'est-à-dire : touchant plusieurs domaines d'utilisation tels que Médecine, électromagnétisme, mécanique des structures, électronique...etc.
- 2- Multiplateforme, c'est-à-dire : compatible avec plusieurs systèmes d'exploitation (mac. Unix...).

Il existe plusieurs versions de ce logiciel, on cite :

- COMSOL 5.3
- COMSOL 5.4
- COMSOL 5.5
- COMSOL 4.3

Dans notre étude, nous avons utilisé la version 5.4 qui apporte un assez bon niveau de clarté à notre simulation

### 1.1 Les avantages :

- Touche plusieurs domaines (électronique, électrotechnique, Médecine...).
- Étude 0D, 1D, 2D, 3D.
- Programmation directe.
- Utilise une interface graphique .

### 1.2 Les inconvénients :

- Il manque de certaines fonctions utiles comme le dérivé...etc.

- Nécessité de disposer d'un ordinateur puissant et performant (carte graphique, espace RAM...).

## 2 Description de l'interface COMSOL :

Le Bureau COMSOL aide à organiser notre simulation en présentant un clair aperçu au modèle à tout moment. Il utilise la forme fonctionnelle, la structure et l'esthétique comme le moyen d'atteindre la simplicité pour la modélisation des réalités complexes.

Par exemple, des outils spécifiques à la tâche apparaissent sur le bureau à droite quand nous en avons besoin, montrant seulement ce qui est actuellement possible, ce qui élimine l'incertitude de la construction de modèles et apporte un certain ordre à nos simulations.

Le bureau est composé de plusieurs fenêtres, ce qui peut ou ne peut pas être affiché en fonction des besoins. Ces fenêtres comprennent le constructeur du modèle, Paramètres, graphiques, messages, Progrès, Aide et d'autres.

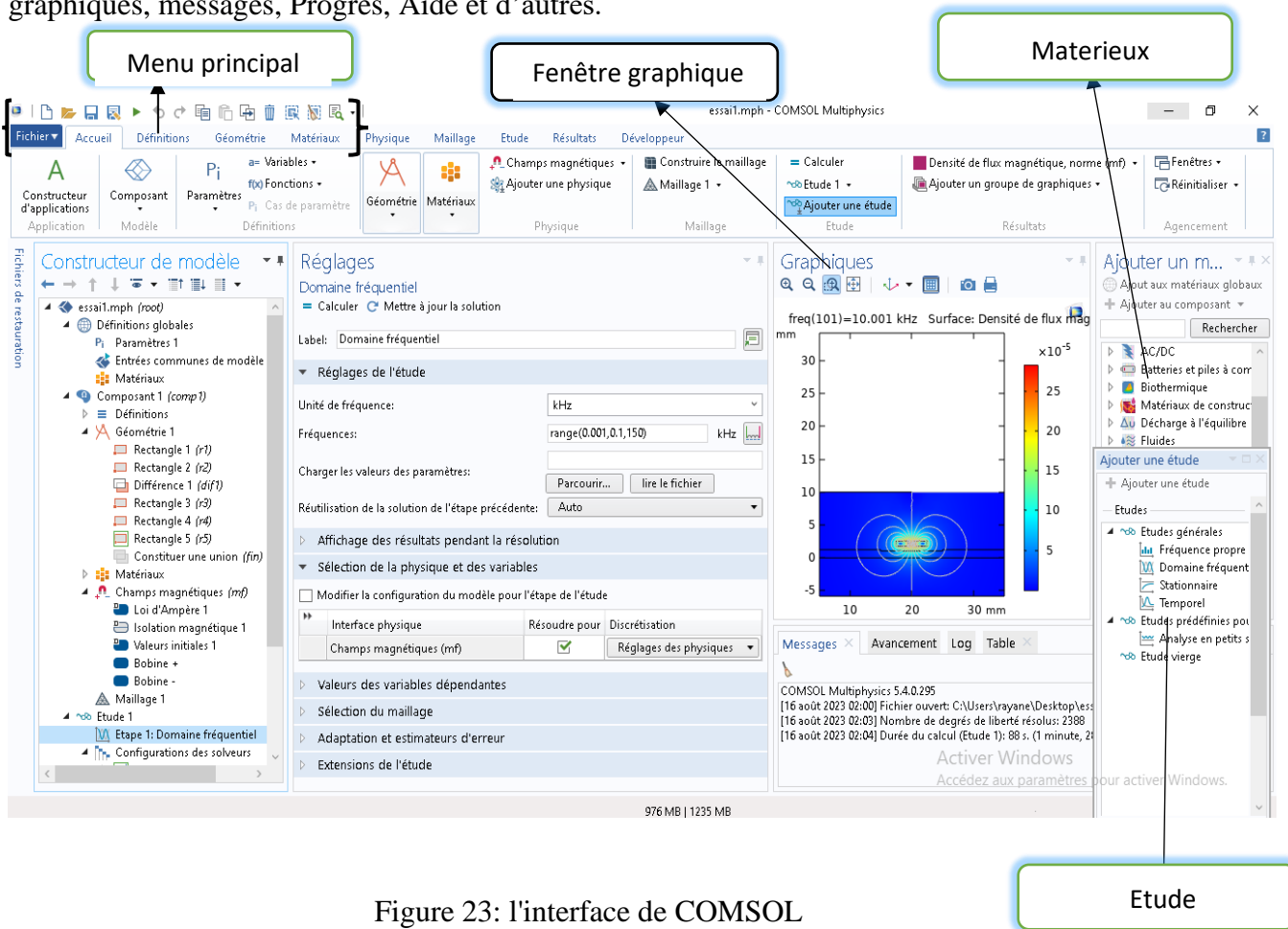


Figure 23: l'interface de COMSOL

### 3 Description des différentes étapes de simulation

Au début de simulation, nous ouvrons COMSOL en double-cliquant sur son icône dans le bureau. Nous pouvons passer pendant notre modélisation dans le constructeur du modèle en sélectionnant les branches dans l'ordre suggéré par leur position par défaut, à partir du haut vers le bas, ou en sélectionnant et en définissant chaque branche au besoin.

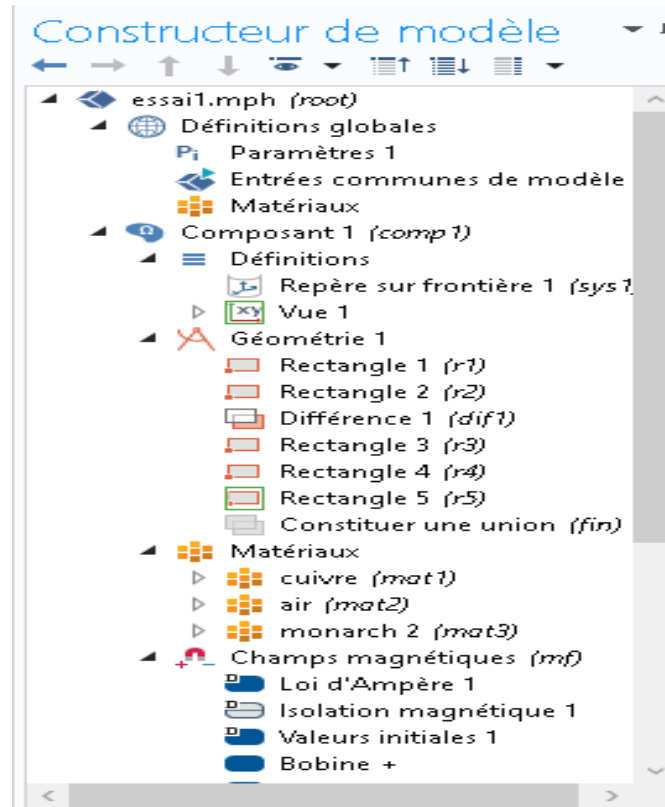


Figure 24:Fenêtre Description des différentes étapes de simulation

#### 3.1 Dimension 1D, 2D, 3D

Au début de la simulation, nous choisissons la dimension d'espace (1D, 2D, 3D), dans notre travail nous appliquons la dimension (2D) puis on clique sur suivant :

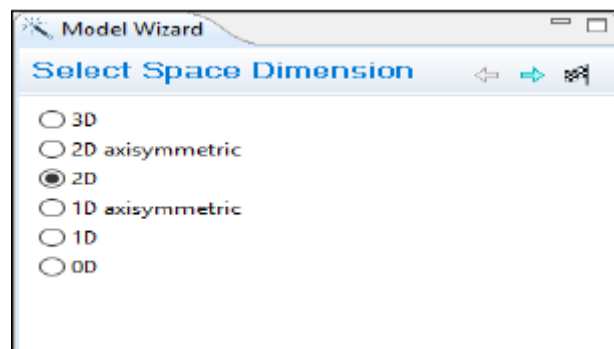


Figure 25: Fenêtre Description des dimensions

### 3.2 La fenêtre « Ajouter des physiques »

Cette fenêtre nous permet de choisir le domaine physique étudié en défilant le menu « Ajouter une physique » :

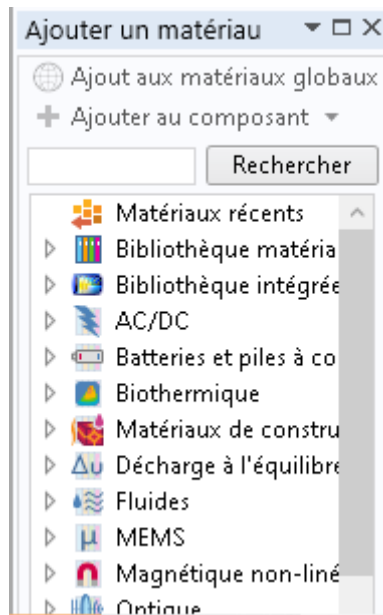


Figure 26: Fenêtre ajouter un matériau

### 3.3 La fenêtre « Etude »

Ce menu nous permet de choisir le type de l'étude menée en régime stationnaire ou En régime variable (stationnaire dans notre cas) :

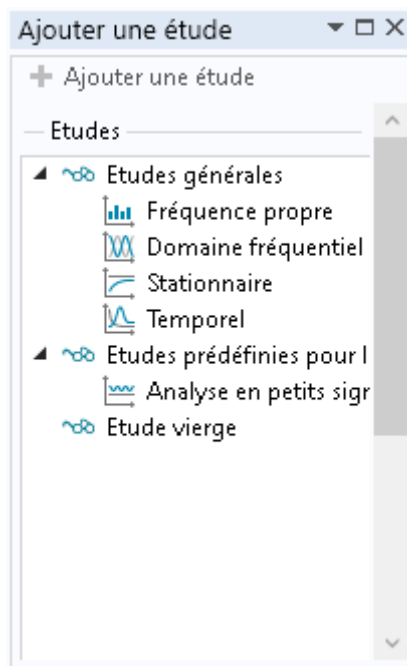


Figure 27: Fenêtre de type de régime

### 3.4 La fenêtre « Définitions globales »

En cliquant avec le bouton droit sur « Définitions globales », on sélectionne « Paramètres » :



Figure 28: Fenêtre de définitions générale

Les paramètres sont utiles dans le contexte suivant :

- Comme paramètres des dimensions pour la géométrie élémentaire ou d'autres opérations de géométrie.
- En tant que paramètres pour les générateurs de mailles.
- Comme paramètres pour contrôler certains aspects du processus de solution.
- Pour évaluer rapidement une expression mathématique, y compris la conversion de l'unité.
- Dans les expressions lors de l'évaluation des résultats.

### 3.5 La fenêtre « Géométrie »

Cette fenêtre permet de tracer la structure étudiée en se basant sur ses dimensions déclarées. Avec un clic droit pour ajouter une fonctionnalité nous permettant de choisir des formes différentes (Le rectangle dans notre cas).

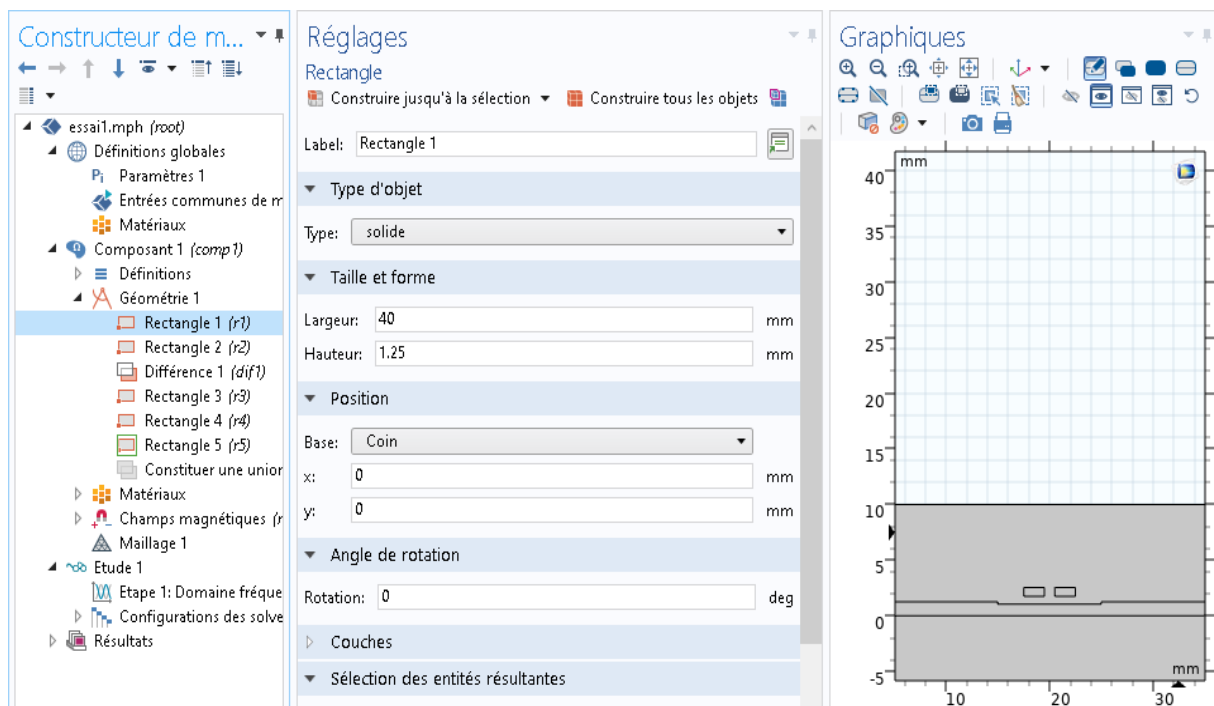


Figure 29: la Fenêtre graphique

La fenêtre graphique présente une vue graphique de la géométrie, maillage, et les résultats du modèle. Elle a des outils utiles pour changer la vue et la sélection de plusieurs objets lors de la création de la géométrie ainsi que des domaines, des limites, des arêtes et des points pour la

définition de la physique ou de la sélection des entités géométriques pour affiner le maillage ou l'évaluation des quantités en une certaine partie du modèle.

La barre d'outils graphique en haut de la fenêtre Graphique contient un ensemble d'outils pour changer la visualisation (par exemple, pour faire un zoom avant ou arrière ou pour ajouter de la transparence et faire des sélections.....).

### 3.6 La fenêtre « Matériel »

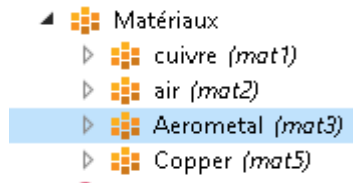


Figure 30: Fenêtre de type matériaux

Ce menu nous permet de choisir le matériau voulu et l'introduire dans les différentes régions de la structure. Le logiciel est muni d'une bibliothèque des matériaux existants déjà et il nous donne la possibilité de rajouter d'autres matériaux de notre choix.

### 3.7 La fenêtre « Maillage »

La fenêtre de maillage possède toutes les caractéristiques qui définissent une séquence de maillage. Faites un clic droit pour ajouter une fonctionnalité ou pour construire maille des éléments que vous utilisez pour réaliser le maillage .

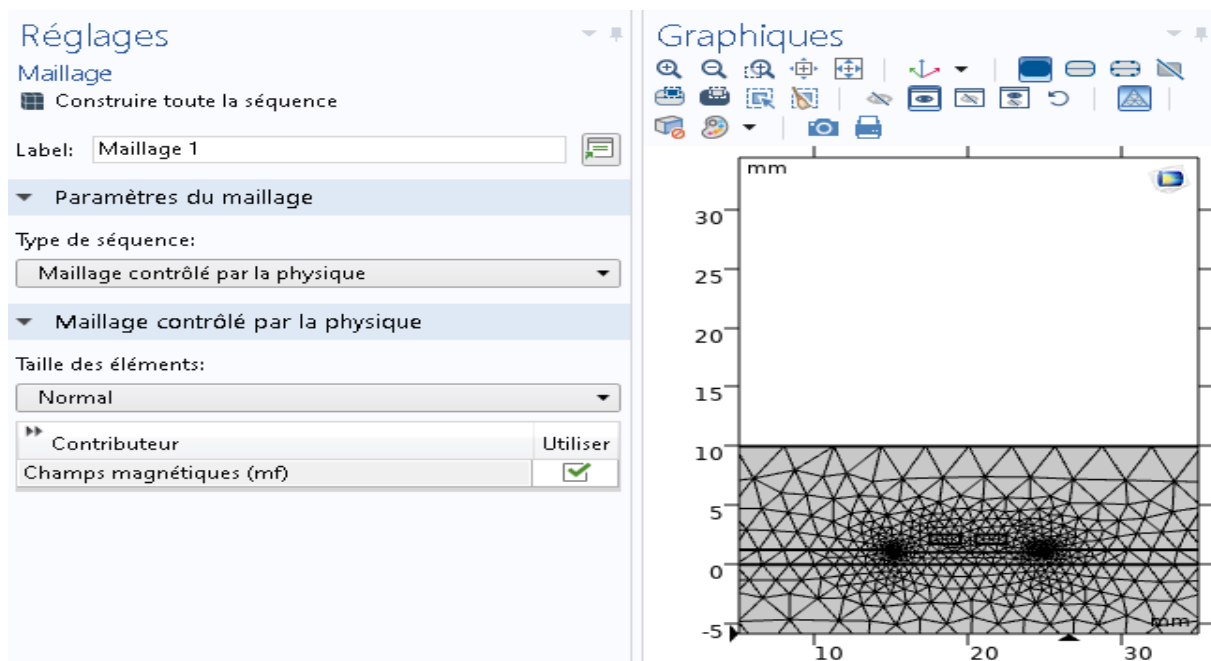


Figure 31: Fenêtre de réalisation maillage

### 3.8 La fenêtre « étude »

Avec un clic droit sur ce menu, la fonctionnalité « Comput » s'affiche et nous permet de lancer la simulation qui consiste à résoudre les équations propres au modèle : Poisson et continuité des porteurs dans notre cas.

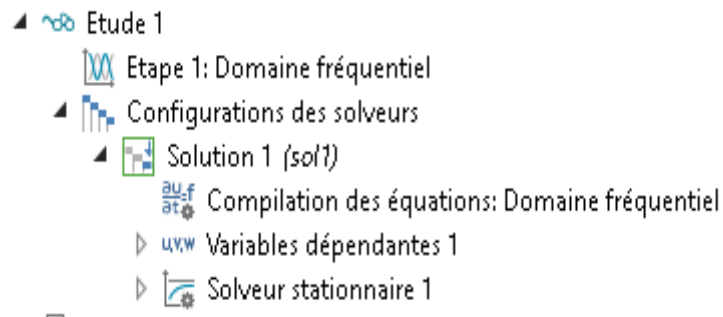


Figure 32: Fenêtre de type d'étude

### 3.9 La fenêtre « Résultats »

Sous ce menu, on trouve les résultats de simulation nous pouvons par la suite exploiter ces résultats pour tracer toutes les grandeurs voulues.



Figure 33: Fenêtre des résultats

### 3.10 Solution 1

C'est l'ensemble des solutions mises à disposition pour la visualisation et l'analyse des résultats. Les séquences du solveur créent automatiquement des ensembles des données de solution.

## 4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit de façon globale, le logiciel COMSOL, puis expliqué en détails les fonctions de chaque volet depuis le choix de l'étude, jusqu'au lancement de la simulation de la structure étudiée.

# Chapitre 4

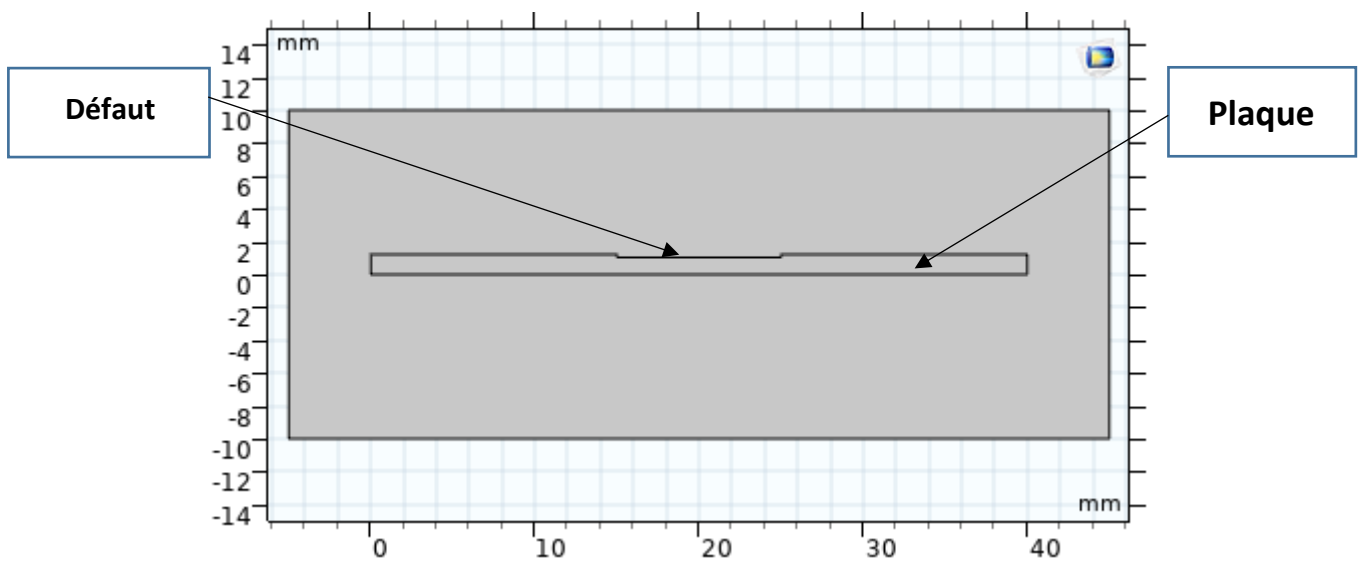
## 1 Introduction

L'étude de la tension en utilisant le contrôle non destructif par courant de Foucault est une méthode essentielle dans l'inspection et la maintenance de composants et de structures. Cette technique repose sur les principes de l'électromagnétisme pour détecter des anomalies potentielles telles que des fissures, des inclusions ou des variations de tension dans des matériaux conducteurs.

Dans le cadre de cette simulation, notre objectif principal consistera à observer l'évolution de la tension en fonction de la fréquence. Pour ce faire, nous avons choisi de conférer à ce matériau nommé (**Aerometal**) une conductivité électrique, laquelle sera fixée à une valeur de  $50\,000\text{sm}^{-1}$ , exprimée en unités appropriées. Cette caractéristique de conductivité électrique est essentielle car elle déterminera la manière dont le matériau réagira aux phénomènes électriques, ce qui peut avoir un impact significatif sur ses performances dans diverses applications.

## 2 Description du dispositif à étudier

Comme l'illustre clairement la Figure 34, notre objet d'étude principal sera cette plaque comportant un défaut notable sous forme d'une fissure.



## 3 Dimensionnement de notre dispositif

Notre dispositif est défini par une série de paramètres essentiels qui déterminent sa configuration et son fonctionnement spécifiques. Ces paramètres, soigneusement sélectionnés, sont cruciaux pour la précision et la performance de notre système. En examinant de plus près cette configuration, nous pouvons identifier les éléments clés qui la composent et comprendre comment ils interagissent pour atteindre nos objectifs.

	Capteur	Default	Plaque	Domaine
<b>Largeur [mm]</b>		10	40	50
<b>Hauteur [mm]</b>		0.2	1.25	20
<b>Conductivité électrique [S/m]</b>	$5.99 \cdot 10^7$	$10^{-16}$	$5 \cdot 10^4$	$10^{-16}$
<b>Perméabilité relatif</b>	1	1	1	1
<b>Diamètre intérieure [mm]</b>	1.2			
<b>Diamètre extérieur [mm]</b>	3.2			
<b>Lift-off [mm]</b>	0.5			

Tableau 1: tableau représentatif de la géométrie.

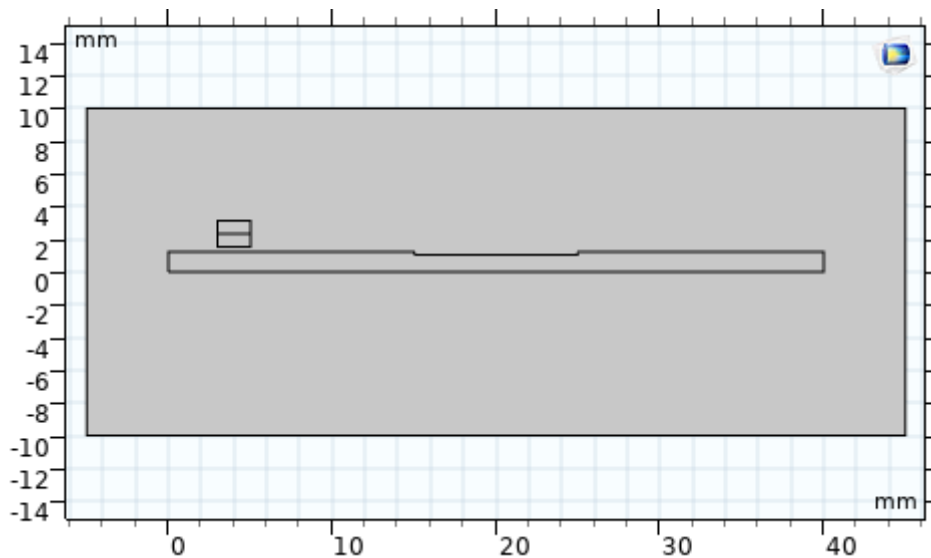


Figure 35 : représentation de notre simulation

#### 4 Paramétrage du dispositif étudié

Dans le but de mener à bien l'étude de notre système, nous allons prendre en compte et intégrer plusieurs paramètres essentiels dans le logiciel COMSOL Multiphysics. Cette étape revêt une importance capitale, car elle permettra de modéliser avec précision le comportement du système dans des conditions spécifiques et de recueillir des données pertinentes pour notre analyse.

Les paramètres que nous allons introduire dans COMSOL Multiphysics englobent une gamme variée d'informations et de caractéristiques. Ils incluent les des données suivantes :

- **La création d'un modèle en deux dimensions (2D)** : nous permettra de simplifier notre système tout en conservant l'essentiel de sa complexité.

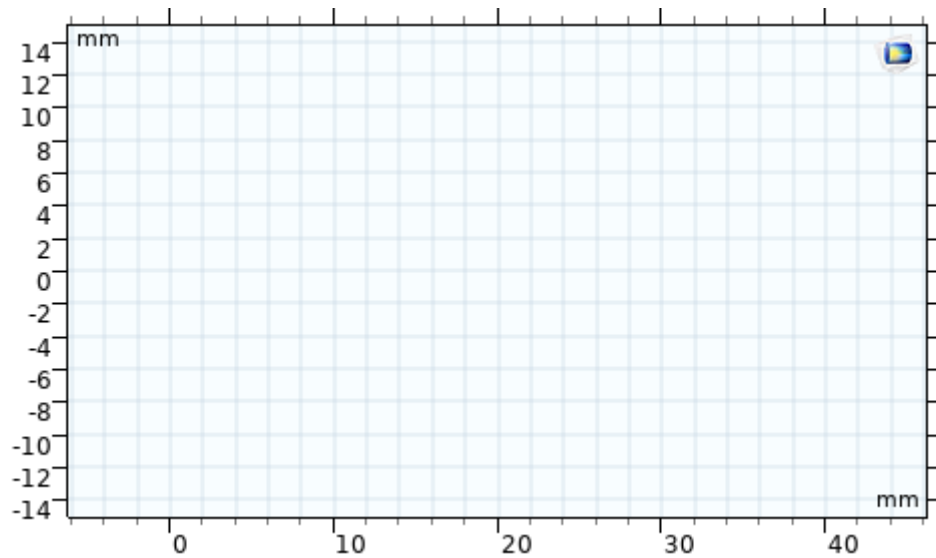


Figure 36 : model 2D pure

- **La configuration de notre géométrie** : en prenant soigneusement en compte les dimensions, revêt une importance cruciale dans notre processus de modélisation. Cette étape implique la définition précise de la taille, de la forme et des proportions des composants de notre système ou de notre objet d'étude.

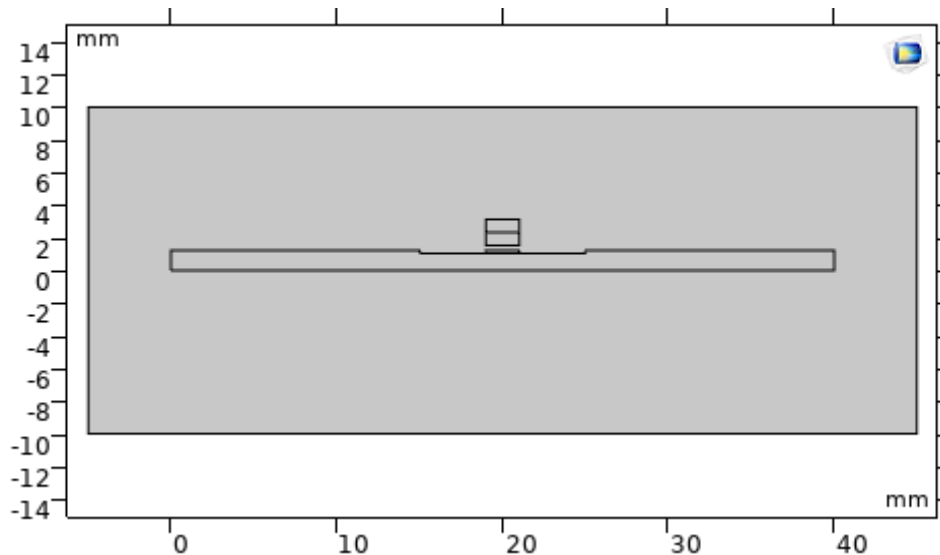


Figure 37 : construction du model

- **L'ajout des matériaux** : constitue une étape cruciale dans le processus de modélisation et de simulation. Cette phase consiste à attribuer à chaque composant de notre modèle numérique les propriétés matérielles appropriées qui correspondent à celles de la réalité physique.

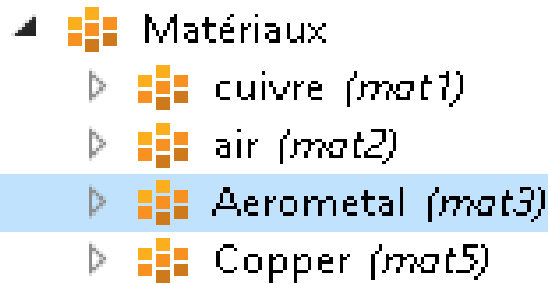


Figure 38 : Attribution des matériaux à la géométrie

- **La configuration de la physique** : est une étape essentielle dans la création d'un modèle de simulation. Elle implique la définition minutieuse des lois physiques, des équations mathématiques, et des conditions initiales et aux limites qui régissent le comportement du système que nous cherchons à étudier ou à simuler.

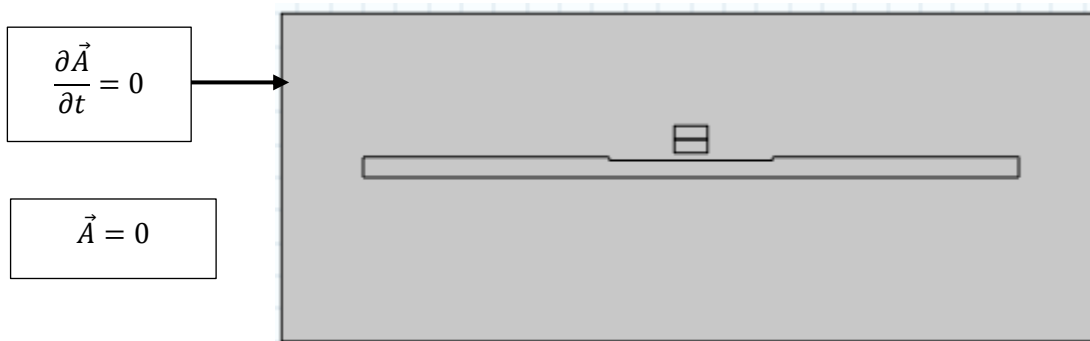


Figure 39 : Choix de l'isolant magnétique

- **La configuration de la bobine** : est une étape cruciale dans notre processus de modélisation et de simulation. Cette phase consiste à définir en détail les caractéristiques de la bobine que nous utilisons dans notre système.

Réglages

Bobine

Courant

Courant de la bobine:

$I_{\text{coil}}$  0.08[A] A

Conducteur multispikes homogénéisé

Nombre de spires:

$N$  140

Conductivité des spires de la bobine:

$\sigma_{\text{coil}}$  6\*1e7[S/m] S/m

Aire de la section d'une spire de la bobine:

Défini par l'utilisateur

$a_{\text{coil}}$  3.14\*1e-6[m^2] m<sup>2</sup>

Champ magnétique

Relation constitutive:

Perméabilité relative

$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}$

Perméabilité relative:

$\mu_r$  A partir du matériau

Champ électrique

$\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E}$

Figure 40 : paramétrage de la bobine

- **Sélection d'un domaine d'étude :** Nous devons opter pour une analyse dans le domaine fréquentiel, ce qui nous permettra de manipuler la fréquence. Nous allons configurer une plage de fréquences allant de 60 Hz à 150 000 Hz.

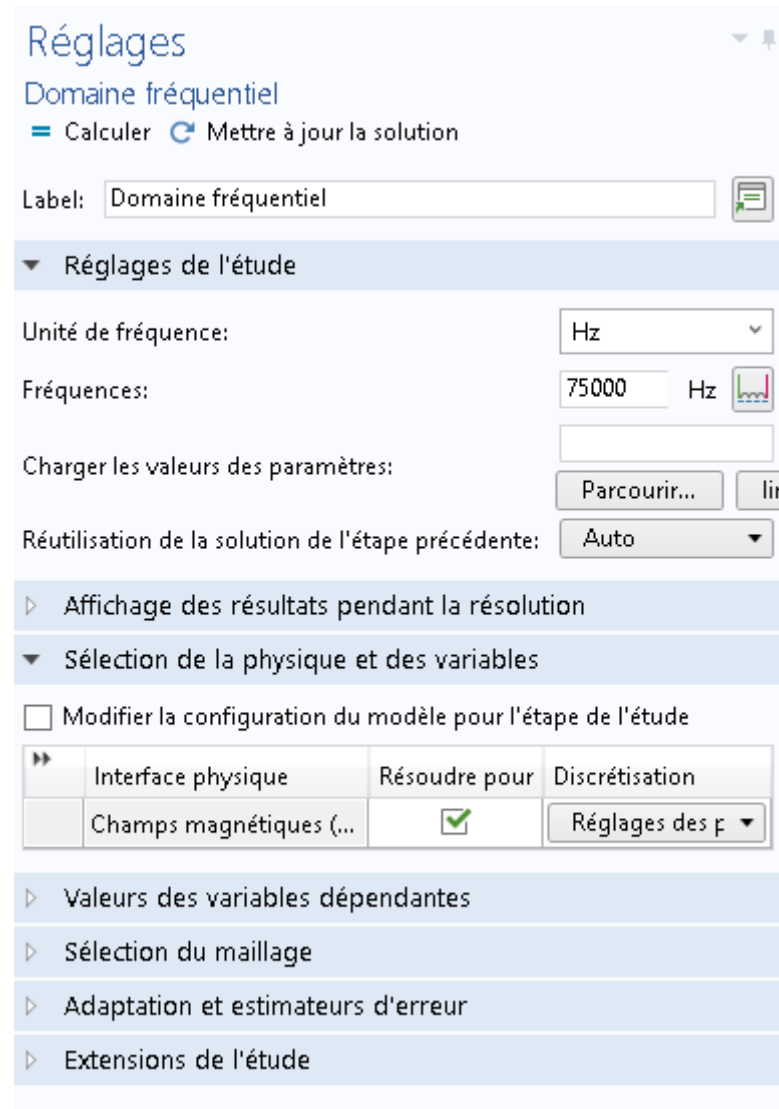


Figure 41 : domaine fréquentielle

## 5 Simulation

Une fois que nous aurons soigneusement défini tous les paramètres et construit notre modèle avec précision, nous passerons à l'étape suivante en illustrant notre démarche par le biais d'un exemple concret. Dans ce cas, nous choisirons une fréquence de 75 000 Hz. Cette fréquence spécifique servira d'exemple clé pour démontrer comment notre modèle réagit et génère des résultats significatifs. Cette approche pratique nous permettra de mieux comprendre la dynamique du système à cette fréquence particulière, tout en nous donnant l'occasion d'analyser et d'interpréter les données pour en tirer des conclusions pertinentes.

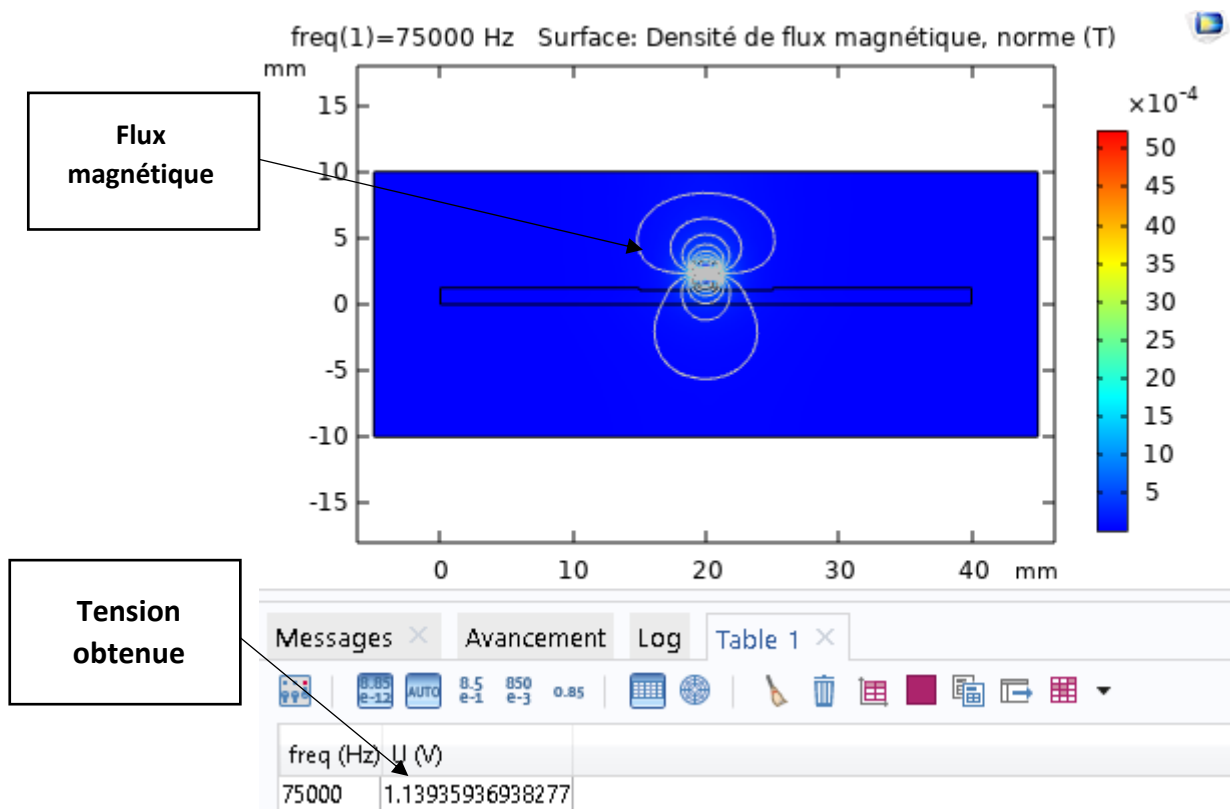


Figure 42 : densité de flux magnétique et tension obtenu

## 6 Interprétation des résultats

Suite à la simulation exhaustive de notre dispositif à l'aide de COMSOL Multiphysics 5.4, incluant les différentes configurations de plaque, à la fois avec et sans défaut, ainsi qu'à l'introduction des valeurs de tension dans MATLAB, notre analyse a généré des résultats d'une grande importance. Ces résultats, soigneusement obtenus et évalués, offrent un aperçu significatif du comportement de la tension dans diverses plages de fréquences et constitueront la base de notre analyse approfondie.

- **Tension pour la plaque sans défaut**

En ce qui concerne cette plaque, nous avons effectué des mesures de tension  $U$  à différentes fréquences [60 ;75000 ;150000] Hz, ce qui nous a permis d'obtenir une série de résultats significatifs. Ces résultats couvrent un éventail de fréquences et offrent un aperçu détaillé du comportement de la tension  $U$  dans différentes conditions fréquentielles.

- Pour 60Hz :

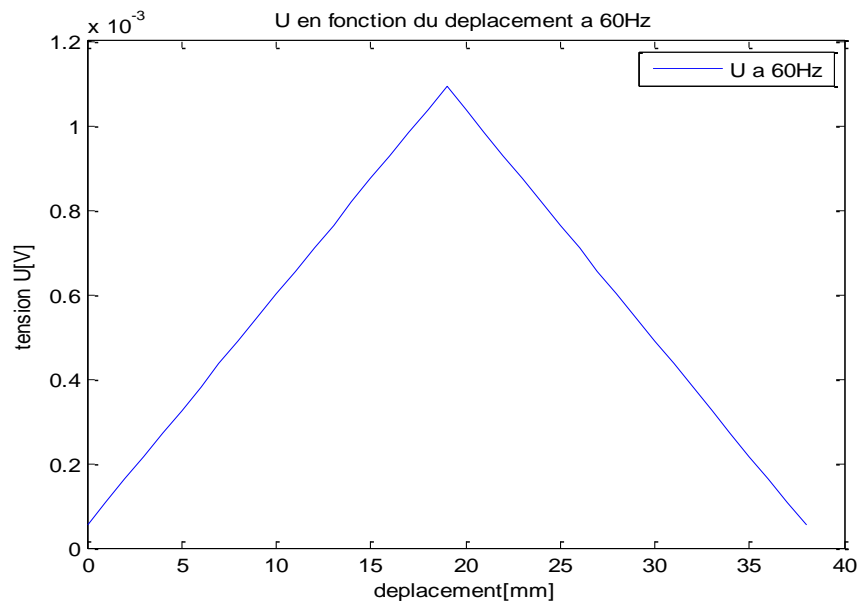


Figure 43 : évolution de la tension U en fonction du déplacement à 60Hz

- Pour 75000Hz :

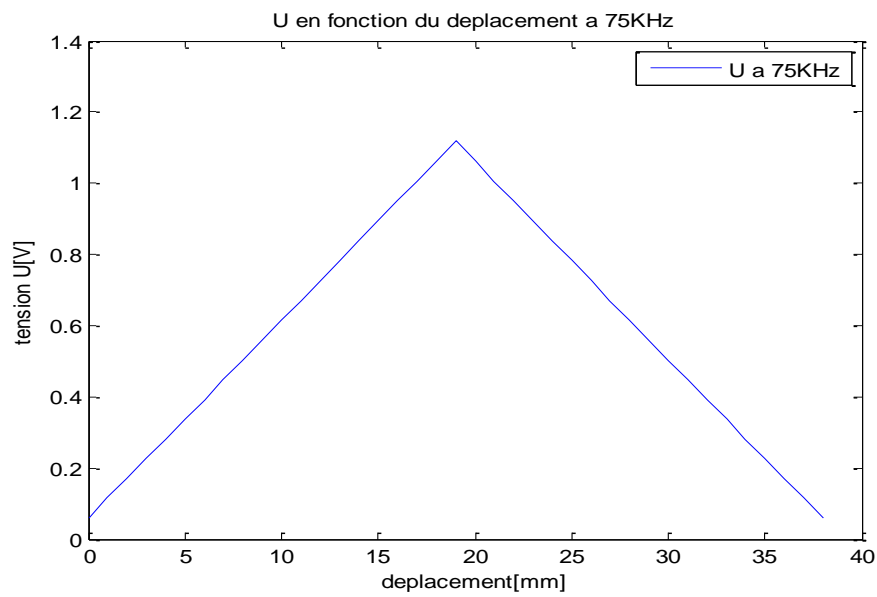


Figure 44 : évolution de la tension U en fonction du déplacement à 75000Hz

- Pour 150000Hz :

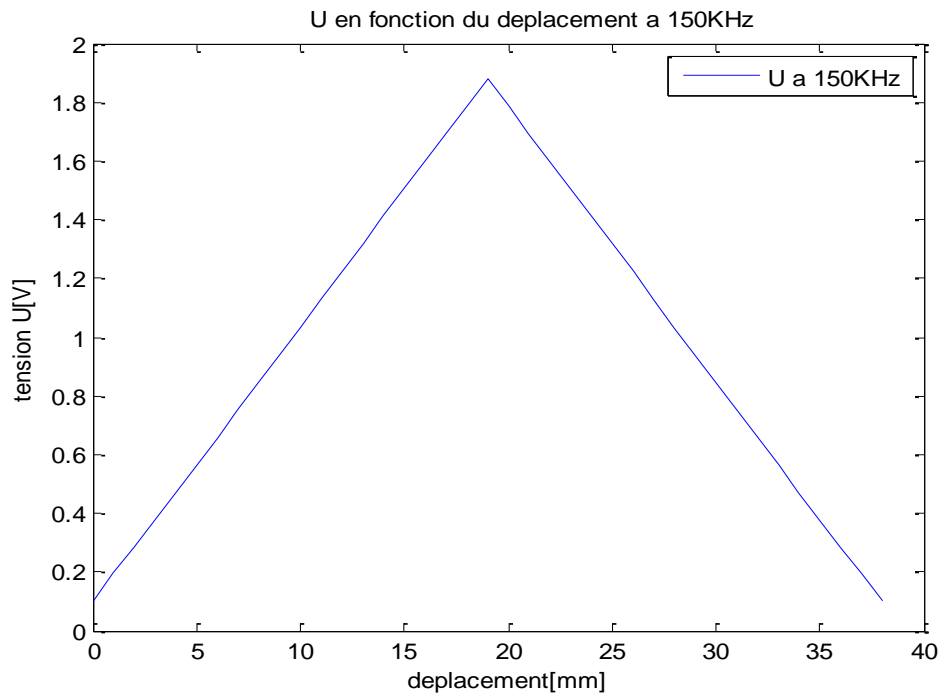


Figure 45 : évolution de la tension U en fonction du déplacement à 150000Hz

- **Interprétation :**

Il est clairement observable que la tension U suit une évolution similaire sur les trois graphiques, même si la fréquence varie. Visuellement, on peut constater qu'elle démarre presque à zéro, atteint un pic, puis se stabilise jusqu'à la moitié de la plaque où se situe le défaut. Ensuite, elle suit le même schéma pour l'autre moitié, mais de manière inverse. La seule différence notable entre eux réside dans les valeurs de la tension U. On peut remarquer que plus la fréquence augmente, plus ces valeurs augmentent proportionnellement.

- **Tension pour la plaque avec défaut**

Les résultats de la tension U à différentes fréquences ont été obtenus sur cette plaque.

- Pour 60Hz :

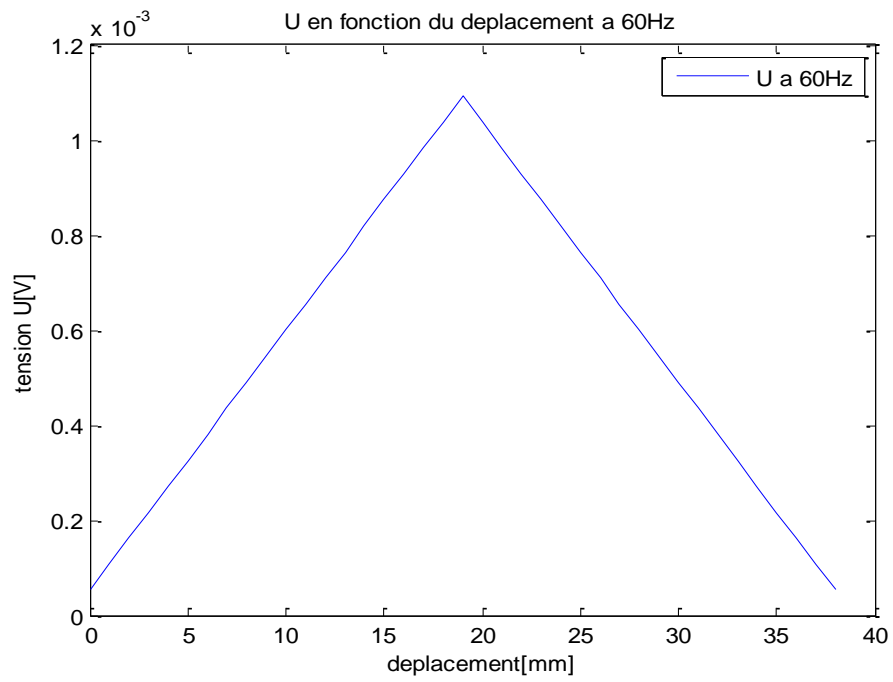


Figure 46 : évolution de U en fonction du déplacement à 60Hz

- Pour 75000Hz :

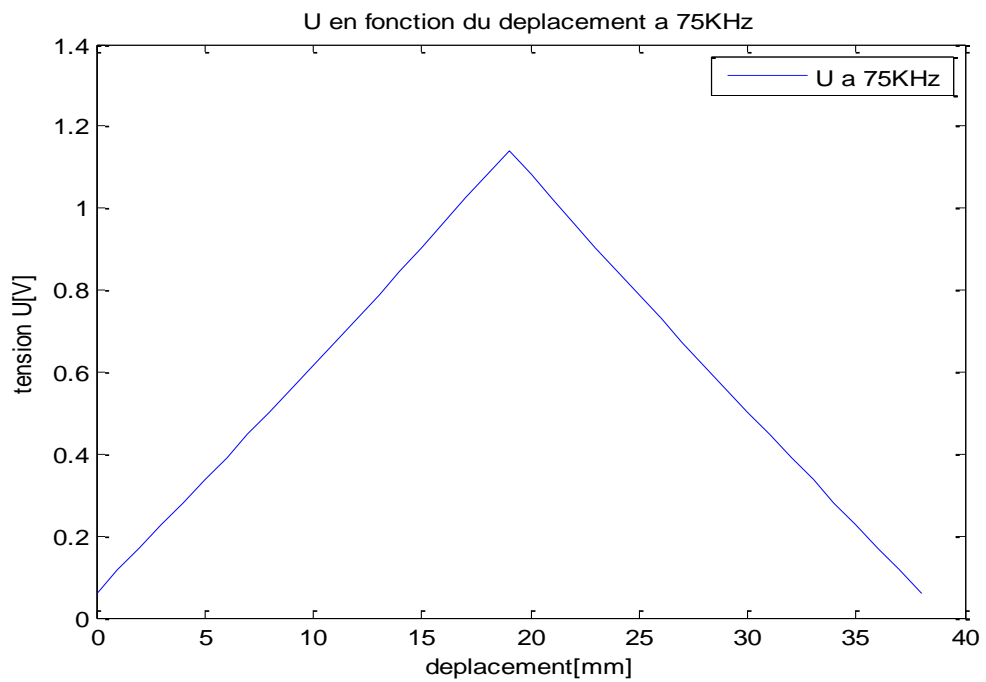


Figure 47 : évolution de U en fonction du déplacement à 75000Hz

- Pour 150000Hz :

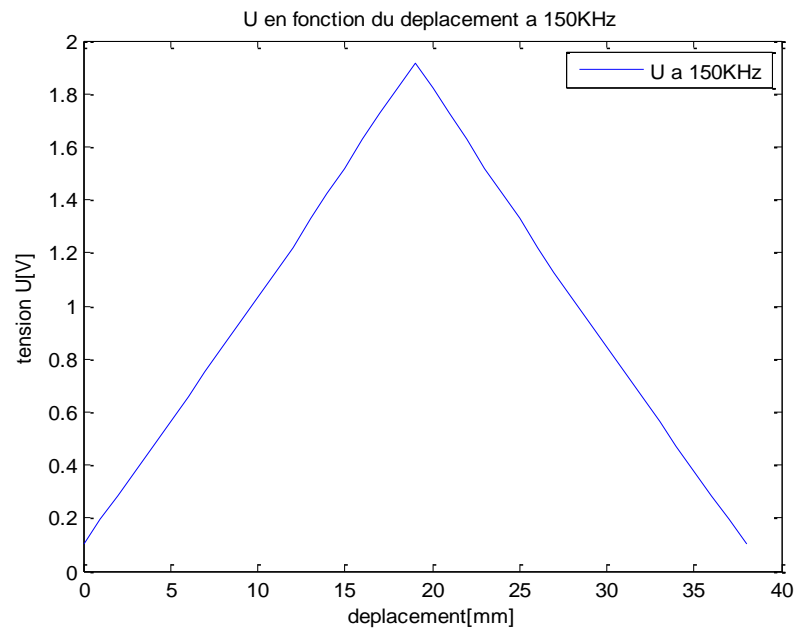


Figure 48: évolution de U en fonction du déplacement à 150000Hz

- **Interprétation**

De même, pour la plaque présentant un défaut, l'évolution de la tension demeure constante sur tous les graphiques, et on observe que la valeur de celle-ci augmente de manière proportionnelle à l'élévation de la fréquence

- **Déterminer  $\Delta U$**

Avec les résultats obtenus lors de la simulation, nous sommes maintenant en mesure de calculer la variation  $\Delta U(x)$ . Cette mesure permettra de mieux comprendre les changements dans la tension en fonction de la position  $x$ .

Nous avons :

$$\Delta U(x) = U_{\text{defaut}}(x) - U(x)$$

$U_{\text{defaut}}(x)$  : tension de la plaque avec défaut en fonction du déplacement.

$U(x)$  : tension de la plaque sans défaut en fonction du déplacement.

➤ **Résultat obtenue :**

- Pour 60HZ

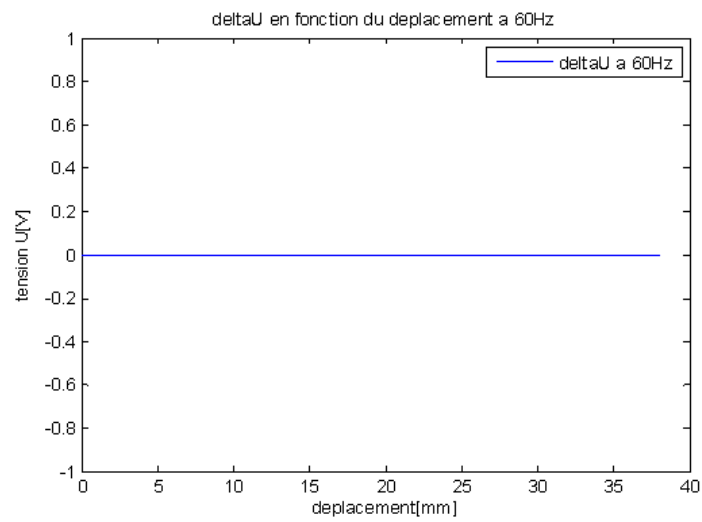


Figure 49: évolution de  $\Delta U$  en fonction du déplacement à 60HZ

- Pour 75000Hz :

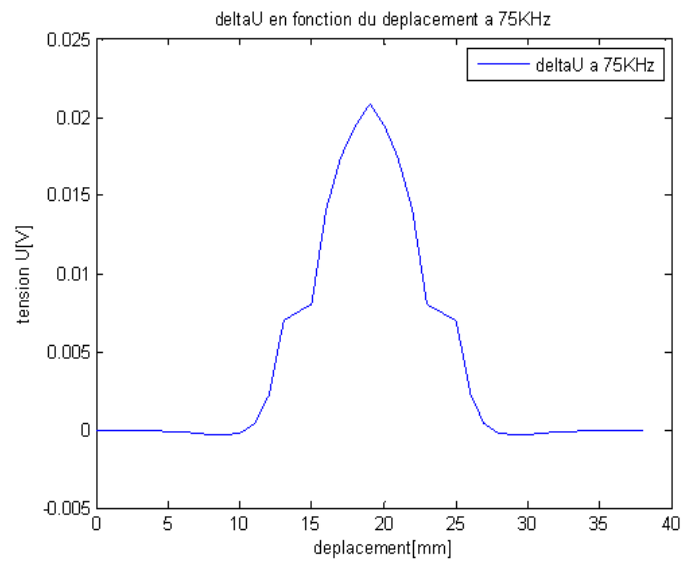


Figure 50: évolution de  $\Delta U$  en fonction du déplacement à 75000HZ

- Pour 150000Hz :

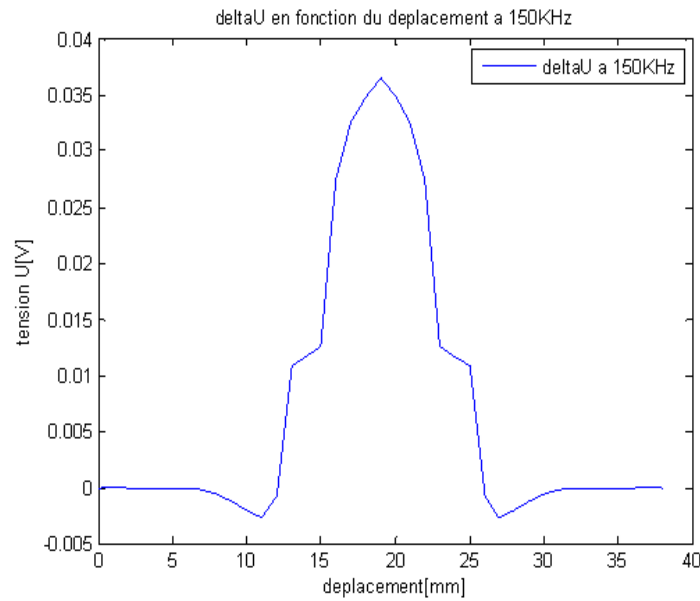


Figure 51: évolution de  $\Delta U$  en fonction du déplacement à 150000HZ

- **Interprétation**
  - **Pour 60Hz**

À cette fréquence, il est manifeste que le  $\Delta U$  reste constant, ce qui nous conduit à la conclusion qu'une méthode de contrôle non destructif par courant de Foucault n'est pas efficace à basse fréquence.

- **Pour 75000Hz**

Dans cette situation précise, une observation approfondie révèle une variation significative entre les positions 10 et 25. Cette observation suggère clairement que nous avons réussi à détecter un défaut sur la plaque, localisé spécifiquement dans cette zone. La détection de cette variation est cruciale pour l'identification précise de l'anomalie et sa localisation sur la surface de la plaque.

- **Pour 15000Hz**

Pour ce cas particulier, il est évident qu'une variation significative est perceptible entre la position 11 et la position 27, ce qui indique la détection d'une anomalie au sein de cette zone de la plaque.

## 7 Conclusion

Incontestablement, le contrôle non destructif s'affirme comme une méthode hautement efficace pour repérer des anomalies, comme en témoignent clairement les simulations et les résultats obtenus dans cette recherche grâce à COMSOL Multiphysics 5.4. Une découverte cruciale qui émerge est l'importance capitale de la fréquence d'excitation. En effet, il est frappant de noter qu'à des fréquences basses, la détection devient quasiment impossible, ce qui nous conduit à affirmer que le contrôle non destructif par courants de Foucault n'est effectif qu'à des fréquences élevées.

De surcroît, la manipulation de la valeur de cette fréquence permet de peaufiner la zone de détection, augmentant ainsi la sensibilité de notre contrôle. Cette observation découle d'une logique simple : à mesure que la fréquence augmente, la précision de la détection augmente également de manière concomitante. En résumé, la modification de la fréquence se révèle être une stratégie judicieuse pour adapter notre méthode de contrôle aux particularités de la situation, ce qui renforce la fiabilité et la pertinence de la détection des défauts.

# **Conclusion générale**

- **Conclusion générale**

En conclusion, l'utilisation de la méthode du contrôle non destructif par courants de Foucault s'est avérée être une approche efficace et précieuse pour la détection des défauts de surface dans diverses applications industrielles. Les avantages de cette méthode résident dans sa fiabilité, sa rapidité d'exécution et son coût relativement bas, ce qui en fait une technique très attractive. Cependant, notre étude a également souligné l'importance cruciale de la fréquence d'excitation dans le processus de détection. Il est essentiel de choisir la fréquence appropriée en fonction de la géométrie de l'objet à inspecter et de la taille prévue des défauts. À basse fréquence, la détection devient souvent inefficace, tandis qu'à haute fréquence, la précision de la détection s'améliore considérablement.

L'avantage majeur de cette méthode réside dans sa capacité à fournir des informations précises sur l'intégrité des matériaux sans nécessiter de destruction ni de démontage. Elle offre une fiabilité élevée, une grande sensibilité, et elle peut être adaptée à diverses configurations géométriques. De plus, COMSOL Multiphysics a facilité la modélisation et la simulation de ces processus complexes, permettant une compréhension approfondie des interactions électromagnétiques et de leurs répercussions sur la détection des défauts. Cependant, il est important de noter que le succès de cette méthode dépend largement de la sélection judicieuse des paramètres tels que la fréquence d'excitation, la géométrie de l'objet, et la taille prévue des défauts. Une mauvaise combinaison de ces paramètres peut entraîner une réduction de la sensibilité ou de la précision de la détection.

En fin de compte, le contrôle non destructif par courant de Foucault assisté par COMSOL Multiphysics demeure un atout majeur pour l'industrie, permettant d'assurer la qualité et la durabilité des produits tout en réduisant les coûts associés aux inspections destructives. Son potentiel en termes de développement futur et d'amélioration des techniques de détection en fait une méthode incontournable pour l'industrie moderne.

# Bibliographie

- [1] R. HAMIA, «Performances et apports des capteurs magnétiques à très haute sensibilité aux systèmes de contrôle non destructif par courants de Foucault,» université de Caen/ basse normandie , Caen, 2011.
- [2] B. Oussama, «Contrôle non destructif par courants de Foucault par capteur différentiel,» Université de M'sila, M'sila, 2012.
- [3] A. Nacereddine, «contrôle non destructif (CND) par courants de Foucault (CF), utilisation des capteurs magnétiques à très haute sensibilité,» Université de M'sila, M'sila, 2015.
- [4] A.-E. Lakhdari, «Etude et modélisation de capteurs en CND par courants de Foucault : application à la détection des fissures,» Electricité industrielle A, 2011.
- [5] Dumont-Fillon, *Contrôle non destructif (CND)*, Techniques de l'Ingénieur, R1400. , 2016.
- [6] ZORNI, « Contrôle non destructif par courants de Foucault de milieux ferromagnétiques : de l'expérience au modèle d'interaction,» université Paris-Sud11, Paris, 2012.
- [7] E. A. MOKHTAR, « Cours Technique Détection des Défaillances,» université A/MIRA de Béjaia , Béjaia, 2019.
- [8] B. RAMADANE, « Contribution à la modélisation tridimensionnelle de la technique thermo-inductive de contrôle non destructif : Développement d'un outil de conception, d'analyse et d'aide à la décision,» Université de Nantes, Nantes, 2009.
- [9] C. Yahya, « Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configuration de contrôle non destructif par courants de Foucault,» Université Paris-Sud 11, PARIS , 2010.
- [10] B. Tarek, « Développement de Méthodes Rapides pour la Résolution des Problèmes Directes dans les systèmes de CND par Courants de Foucault,» Université Hadj Lakhdar de Batna, batna, 2013.
- [11] H. ZAIDI, «Méthodologies pour la modélisation des couches fines et du déplacement en contrôle non destructif par courants de Foucault : application aux capteurs souples,» Université Paris Sud - Paris XI, Paris, 2012.
- [12] P. Séverine, « développement d'un modèle pour le contrôle non destructif par courants de Foucault de structures en aéronautique,» université Paris-sud 11, Paris, 2007.
- [13] B. Benjamin, « Développement de capteurs flexibles à courants de Foucault : application à la caractérisation des propriétés électromagnétiques des matériaux et la détection de défauts par imagerie statique », université PARIS-SACLAY, Paris, 2013.
- [14] L. BAKAI, « contrôle Non Destructif par Courants de Foucault. (Application aux Pièces Cylindriques et Plaques Muni d'un Alésage),» Université Mohamed Boudiaf-M'sila, M'sila, 2018.
- [15] P. c. e. E. Bartmann, «le grand livre d'Arduino,» ERYLLES, 2014.
- [16] S. O. Adib, « Etude et Modélisation de Capteur à courants de Foucault pour le Contrôle Non Destructif (CND),» UNIVERSITE DE M'SILA, M'SILA , 2014.

- [17] T. M. M. e. G. Elhachmi, «Modélisation semi-analytique d'un système de CND-CF pour la caractérisation d'un défaut dans la structure d'un matériau conducteur,» université kasdi merbah – ouargla, ouargla, 2012/2013.
- [18] R. e. N. B. Maouche, «Modélisation Semi-Analytique du Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault à capteur Absolu,» chez *3rd conference on Electrical Engineering*, octobre 2004.
- [19] Y. Belkhiri, «Modélisation des phénomènes électromagnétiques et mécaniques couplés par la méthode des volumes finis (CVM),» Université de Batna, Batna, 2003.
- [20] M. L. KHENE, « Modélisation des phénomènes électromagnétiques dans les structures a géométries complexes par adaptation de la méthode des volumes finis,» Université de Batna, batna, 2006.
- [21] W. C.V.Dodd, «Analytical solution to Eddy-current Prob e-Coil Problems,» *Journal of Applied Physics*, vol. 39, n° %16, p. 13, 1968.
- [22] J. H. Gie, Sarmant Electromagnétisme 2, Paris : Lavoisier Paris , 1982.
- [23] R. P. M. Ivanov, Eléments de génie électrique - Connaissances de bases et machines statiques, Paris: Edition Hermès, 1994.
- [24] B. Maouche, «Elaboration de modèles couplés basés sur la méthode des moments pour la modélisation de structures électromagnétiques- application à l'étude du contrôle non destructif par induction,» université de Setif, Setif, 2007.
- [25] J. J. M. Bertin, «Electromagnétisme 4, milieu diélectriques et aimantés,» 1984.
- [26] D. Cordier, «Electromagnétisme 1, électrostatique et magnétostatique,» 2004.

## **abstract**

L'utilisation du logiciel COMSOL Multiphysics pour la détection de défauts surfaciques par courant de Foucault traduit une approche innovante dans le domaine du contrôle non destructif. Grâce à sa capacité à modéliser les champs électromagnétiques et à intégrer les propriétés matérielles, COMSOL permet de simuler différents scénarios d'inspection. L'outil facilite l'analyse et l'interprétation des signaux générés par les courants de Foucault, permettant ainsi d'identifier des défauts comme des fissures ou des inclusions.

The use of COMSOL Multiphysics software for eddy current detection of surface defects represents an innovative approach to non-destructive testing. Thanks to its ability to model electromagnetic fields and integrate material properties, COMSOL can be used to simulate different inspection scenarios. The tool facilitates the analysis and interpretation of signals generated by eddy currents, enabling defects such as cracks or inclusions to be identified.