



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

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



UNIVERSITE AMAR TELIDJI – LAGHOUAT

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA MATIERE

LABORATOIRE DE PHYSIQUE DES MATERIAUX

Mémoire de Master

Filière : Physique des Matériaux

Option : Physique des Matériaux

Présenté par :

HAMDI FATIMA ZOHRA RABAB

THEME

*Caractérisation d'un matériau ferromagnétique par
technique de fuite de flux magnétique (MFL)*

Devant le jury :

NOUIOUA Ismail	MAA	Univ. de Laghouat	Président
YOUSFI Belkacem	MCA	Univ. de Laghouat	Examinateur
HELIFA Bachir	MCA	Univ. de Laghouat	Encadreur

2020/2021

Dédicaces

*Je dédie ce travail A ma chère mère et
mon cher père A mon chers frères et ma chère sœur :*

*Abdelkader, Ali, Moulai, Mamma
et mes cousines: Zohra et kaouther*

*A ma Chère grande famille paternelle et maternelle,
A tous mes amis, particulièrement : Merizegui Saida, Zaabane Fatima Zohra.
et tout qui m'ont aidé pour réaliser ce travail*

Remerciements

Tout d'abord, je remercie Dieu pour tout ce que j'ai accompli jusqu'à présent.

Ce travail a été rendu possible grâce à l'amour et au soutien de plusieurs personnes.

Au premier rang desquels se trouvent mes parents pour leur soutien et leurs sacrifices durant mes études et tout au long de ma vie.

Les travaux de ce mémoire ont été menés dans le Laboratoire de Physique des Matériaux (LPM) de l'université de Laghouat, j'exprime mes remerciements à Monsieur le Professeur Iben khaldoun Lefkaier directeur du laboratoire LPM pour m'avoir accueilli dans ce laboratoire.

Je tiens également à exprimer ma gratitude et mes sincères remerciements à M. HELIFA Bachir, Maître de conférences-A à l'Université de Laghouat pour sa supervision de cette thèse. Sa patience, ses qualités humaines, sa disponibilité à chaque instant et surtout son aide, m'ont été d'un grand soutien dans la réalisation de ce travail. Je ne le remercierai jamais assez.

J'exprime mon respect et mes sincères remerciements à Monsieur Ismail NOUIOUA, d'avoir accepté de présider le jury de soutenance de ce travail.

J'exprime ma gratitude à M. YOUSFI Belkacem, Maître de conférences-A à l'Université de Laghouat, pour avoir accepté d'examiner ce travail.

La contribution de Monsieur Hocine NEBAIR Hocine dans la réalisation de ce travail m'a été très précieuse et je l'en remercie vivement.

Mes sincères remerciements à mes professeurs de licence et de master en physique du département des sciences de la matière pour leurs efforts visant à assurer une formation de qualité.

Enfin, à tous ceux que je n'ai pas mentionnés dans ce mémoire, qu'ils acceptent mes sincères remerciements pour leur aide dans la réalisation de ce travail.

Table des Matières

Introduction générale	1
Chapitre I- État de L'art.....	4
I-Introduction	5
II-Les pipelines.....	6
III-Différents types de corrosion des pipelines	6
IV-Les jauges d'inspection de pipeline (PIG)	7
V-Fuite de flux magnétique	7
1 -Structure et Principe	7
2- Différents types de capteurs de champ	9
4- Applications	11
VI- Phénomènes physiques et formulation du champ électromagnétique	11
1- Phénomène physique	11
2- Formulation du champ électromagnétique.....	14
VII- Méthodes de résolution	14
1. Méthodes analytiques.....	15
2. Méthodes mixtes (semi-analytiques)	15
3. Méthodes numériques	15
Chapitre II- Modélisation de fuite de flux magnétique.....	17
I- Introduction	18
II- La théorie de la magnétostatique et les équations de Maxwell.....	19
1-Formulation continue du problème magnétostatique dans l'espace tridimensionnel	20
III-Une Introduction à la méthode des éléments finis	20
IV-Étude documentaire sur l'utilisation de la méthode des éléments finis pour la technique du flux de fuite magnétique	20
V-Principe de la méthode des éléments finis	21
VI-Discretisation du domaine	21
1-Eléments à une dimension	21
2-Eléments à deux dimensions	22
3-Eléments à trois dimensions	22
VII-Étapes générales de l'analyse par éléments finis	23
1-Nœuds et éléments.....	23
VIII-Les avantages et les inconvénients de la méthode des éléments finis	24
IX-Contexte FEM en MFL	24

X-Présentation du logiciel FLUX	25
XI-Génération de MFL étudiée sur FLUX 2D/3D.....	26
1-Description géométrique	26
2-Maillage	27
3-Description physique	28
4-Processus de résolution : un solveur rapide et robuste	28
5-Exploitation des résultats	28
I-Introduction.....	30
II-Description géométrique	31
1-Vue 3D du modèle proposé avec un défaut surfacique :	31
III-Maillage du modèle proposé	32
IV-Description physique	33
V-Résultat de simulation du modèle MFL sous FLUX 3D	34
VI-Effet de variation des paramètres du défaut sur les composantes du champ magnétique	35
1- Effet de la longueur du défaut sur les composantes de l'induction magnétique	35
2-Effet de la variation de la largeur du défaut sur l'induction magnétique.....	37
3-Effet de la variation de la profondeur du défaut sur l'induction magnétique	38
4-Effet du Lift-off sur les composantes de l'induction magnétique :	40
VII-Vue 3D du modèle proposé pour un défaut sub-surfacique	41
IX-Résultat de simulation du modèle du capteur MFL avec un défaut sub-surfacique.....	42
X-Effet de la variation de la profondeur du défaut sub-surfacique sur l'induction magnétique : .	43
XI-Effet de variation des positions du défaut sous la surface sur les composantes du champ magnétique	44
Conclusion.....	46

Liste de Figure

Figure I.1-Pipeline	6
Figure I.2-Différents types de corrosion des pipelines	6
Figure I.3-Structure globale du détecteur interne de flux magnétique de pipeline	7
Figure I.4-Module de mesure MFL	8
Figure I.5-Principe du contrôle de flux de fuite magnétique	9
Figure I.6-Bobine d'induction.....	9
Figure I.7-Capteur à effet hall	10
Figure I.8-Évolution de l'aimantation des couches d'une GMR en fonction du champ magnétique appliqué	10
Figure I.9-Interface entre deux milieux	13
Figure II.1-Discrétisation des éléments à une dimension	21
Figure II.2-Discrétisation des éléments triangulaires et carrés	22
Figure II.3-Discrétisation des éléments à trois dimensions.....	22

Figure II.4-Nœuds et éléments	23
Figure II.5-Présentation du logiciel FLUX	25
Figure II.6-Construction d'un projet FLUX (2D/3D)	26
Figure II.7-Illustration de maillage triangulaire d'un domaine comportant un quadrilatère et un trou circulaire adapté à la géométrie	27
Figure III.1- Système MFL en 3D	30
Figure III.2- Géométrie du dispositif (capteur-plaque) à modéliser avec une boîte d'air limitant le domaine d'étude	31
Figure III.3- Maillage du dispositif à étudier	32
Figure III.4- Qualité de maillage	33
Figure III.5- Lignes de contour de champ magnétique du système.....	34
Figure III.6- Densité de flux magnétique	34
Figure III.7- Composante normale du signal MFL en fonction du déplacement du capteur pour plusieurs défauts ayant des longueurs différentes	35
Figure III.8-Composante tangentielle du signal MFL en fonction du déplacement du capteur pour plusieurs défauts ayant des longueurs différentes	36
Figure III.9-Composante normale du signal MFL en fonction du déplacement du capteur pour plusieurs défauts ayant des largeurs différents	37
Figure III.10-Composante tangentielle du signal MFL en fonction du déplacement du capteur pour plusieurs défauts ayant des largeurs différents	37
Figure III.11- Composante tangentielle du signal MFL en fonction du déplacement du capteur pour plusieurs défauts ayant des profondeurs différentes	38
Figure III.12-composante normale du signal MFL en fonction du déplacement du capteur pour plusieurs défauts ayant des profondeurs différentes	39
Figure III.13-Composante normale du signal MFL en fonction du déplacement du capteur pour plusieurs lift off.....	40
Figure III.14-Composante tangentielle du signal MFL en fonction du déplacement du capteur pour plusieurs lift off.....	40
Figure III.15-Géométrie du dispositif (capteur-plaque) à modéliser avec un défaut sous surfacique en 3D	41
Figure III.16-Système de détection de défaut sub-surfacique en 3D.....	42
Figure III.17-Les Lignes de contour de champ magnétique de système	42
Figure III.18-Densité de flux magnétique	43
Figure III.19-Composante normale du signal MFL en fonction du déplacement du capteur pour plusieurs défauts ayant des profondeurs différentes	43
Figure III.20-Composante tangentielle du signal MFL en fonction du déplacement du capteur pour plusieurs défauts ayant des profondeurs différentes	44
Figure III.21-Composante normale du signal MFL en fonction du déplacement du capteur pour plusieurs défauts ayant des positions différentes.....	44
Figure III.22-Composante tangentielle du signal MFL en fonction du déplacement du capteur pour plusieurs défauts ayant des positions différentes.....	45

Liste de Tableaux

Tableau III.1-Caractéristiques géométriques du dispositif à étudier	31
Tableau III.2 - Les caractéristiques physiques des différentes parties du dispositif étudié	33

Introduction générale

Introduction générale

Les techniques utilisées en CND sont diverses (ultrasons, courants de Foucault, MFL, rayons X, radiographie, ressuage, inspections visuelles...). Elles dépendent à la fois de la nature du matériau, de la précision requise et de la géométrie à contrôler.

Le contrôle par flux de fuite est basé sur la circulation d'un champ magnétique à travers l'épaisseur du tube. Etant donné que le tube est ferromagnétique, le champ magnétique est canalisé par le tube. En cas de défaut, le champ magnétique fuit. Le champ magnétique en surface du tube est modifié. Ce changement de champ magnétique peut-être mesuré à l'aide de bobines ou de capteurs à effet Hall. Le principe général du contrôle par flux de fuite est très proche de celui de la magnétoscopie (magnetic particle inspection en anglais (MPI)) qui est très utilisée pour détecter des défauts en peau externe.

La conception, le développement et l'optimisation des procédés de CND sont rendus possibles grâce à la modélisation numérique des systèmes électromagnétiques qui se répand de plus en plus, que ce soit pour la mise au point des procédures de contrôle, la compréhension des phénomènes ou bien la démonstration de performances. Néanmoins, la fiabilité des simulations dépend d'une validation rigoureuse.

L'objectif de notre travail est d'aborder la modélisation et la simulation d'un système MFL en 3D constitué d'un capteur (de forme U) formé d'un noyau ferromagnétique, de deux bobines excitatrices (alimentation) et d'un capteur de champ à effet Hall placé au milieu afin d'inspecter la surface d'une tôle d'acier présentant plusieurs types de défauts sous le logiciel FLUX.

Dans le premier chapitre, nous donnerons l'importance d'utiliser MFL pour vérifier les dispositifs de pipelines et un aperçu de cette technique qui en est le principe de fonctionnement et les différents types de capteur à utiliser ainsi que les avantages et les inconvénients de cette méthode. Nous présentons aussi les équations de Maxwell, à partir desquelles tous les phénomènes électromagnétiques peuvent être modélisés. Les équations générales qui régissent les phénomènes électromagnétiques sont décrites par des équations aux dérivées partielles.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons l'étude théorique (prise en main) du logiciel de Flux et la modélisation tridimensionnelle du flux de fuite magnétique MFL, qui repose sur la théorie des équations de la magnétostatique tirées des équations de Maxwell et utilise la méthode des éléments finis pour étudier les Signaux MFL avec différentes formes de défauts.

Dans le troisième chapitre, on procèdera à la simulation d'un système MFL en 3D constitué d'un capteur (de forme U) formé d'un noyau ferromagnétique, de deux bobines et d'un capteur de champ à effet Hall placé au milieu afin d'inspecter la surface d'une tôle d'acier présentant plusieurs types de défauts et après avoir implanté le modèle sous FLUX nous considérerons un défaut surfacique et sub-surfacique et nous étudions l'effet de la variation des paramètres caractéristiques

du défaut à savoir la longueur, la largeur et la profondeur sur les composantes normale et tangentielle de l'induction magnétique.

Chapitre I- État de L'art

I-Introduction

- Dans la plupart des canalisations enterrées, des facteurs externes tels que la contrainte d'usure ou le déplacement peuvent provoquer des défaillances. Ces défauts peuvent entraîner des pertes économiques, une pollution de l'environnement et des accidents mortels s'ils ne sont pas détectés à temps. Il est nécessaire d'inspecter régulièrement les pipelines à l'aide de techniques d'essais non destructifs (NDE), parmi ces techniques, qui présentent des avantages et des inconvénients les uns par rapport aux autres, la méthode de fuite de flux magnétique (MFL) qui est utilisée dans l'examen des matériaux magnétiques, et se concentre sur la détection de défauts dans l'échantillon magnétique. En détectant les anomalies magnétiques dans les lignes de flux magnétique à l'aide de capteurs magnétiques, il existe de nombreux types de capteurs magnétiques (bobines d'inductance, capteurs à effet Hall, magnétorésistance géante (GMR)...etc) [1].
- Dans ce chapitre, nous donnerons l'importance d'utiliser MFL pour vérifier ces dispositifs de transmission et un aperçu de cette technique qui en est le principe de fonctionnement et les différents types de capteur utiliser ainsi que les avantages et inconvénients de cette méthode. Et présenter les équations de Maxwell, à partir desquelles tous les phénomènes électromagnétiques peuvent être modélisés. Les équations générales qui régissent les phénomènes électromagnétiques sont décrites par des équations aux dérivées partielles.

II- Les pipelines

Un pipeline est une canalisation enterrée ou aérienne transportant les hydrocarbures depuis les sources originale jusqu'aux usines de traitement des liquides (filtration, raffinage, liquéfaction, ...), qu'ils soient sous forme liquide ou gazeuse. Les pipelines sont le plus souvent construits à partir de tubes d'acier soudés bout à bout, revêtus extérieurement voire intérieurement et généralement enfouis dans le sol [2].



Figure I.1-Pipeline

III-Différents types de corrosion des pipelines

Les pipelines sont largement utilisés pour le transport de fluides et de gaz car c'est actuellement le mode de livraison le plus économique. L'augmentation de leur diamètre et la pression de service augmentent le risque de rupture initiée par des défauts. La présence d'un défaut dans une canalisation associé à l'effet de la pression interne peut provoquer une rupture localisée conduisant à une fuite et éventuellement à une explosion.

Généralement, pour les canalisations, on distingue les défauts suivants : les cratères de corrosion, les fissures, les empreintes, les rayures et le défaut dit combiné (empreinte + rayures) [3] .

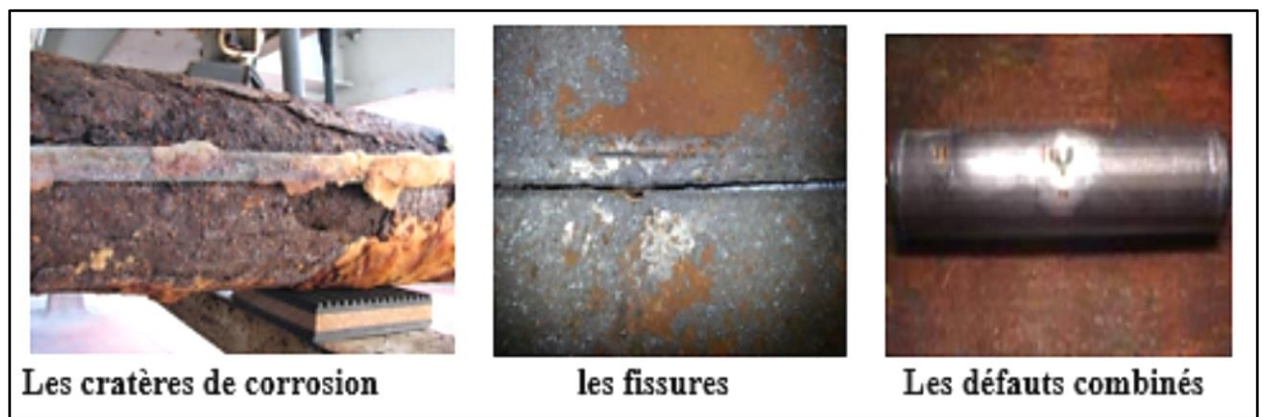


Figure I.2-Différents types de corrosion des pipelines

IV-Les jauges d'inspection de pipeline (PIG)

Les jauges d'inspection de pipeline (PIG) est un appareil électronique de forme cylindrique doté de capacités de surveillance de l'état. Les PIGs équipés de systèmes de surveillance de l'état sont également appelés PIGs intelligents ou outils d'inspection en ligne. Les Smart PIGs sont l'outil le plus couramment utilisé dans l'industrie des pipelines [4].

Les jauges d'inspection de pipeline (PIG) effectuent une inspection automatique des pipelines avec des technologies de contrôle non destructifs (CND) telles que les ultrasons, les fuites de flux magnétique et les courants de Foucault [5].

V-Fuite de flux magnétique

1 -Structure et Principe

a-Structure

- Parmi les techniques non destructives rapide adaptée au contrôle de tube, de pipelines [6], la méthode de fuite de flux magnétique (MFL) a été considérablement utilisée dans la conception de PIG ces dernières années [1]. Cette technique permet la détection de défauts internes et les pertes d'épaisseur en analysant les composantes des champs de fuite interceptée par le capteur de champ [6].
- Le détecteur est composé de Batteries, Module de mesure, Ordinateur de bord [7] .

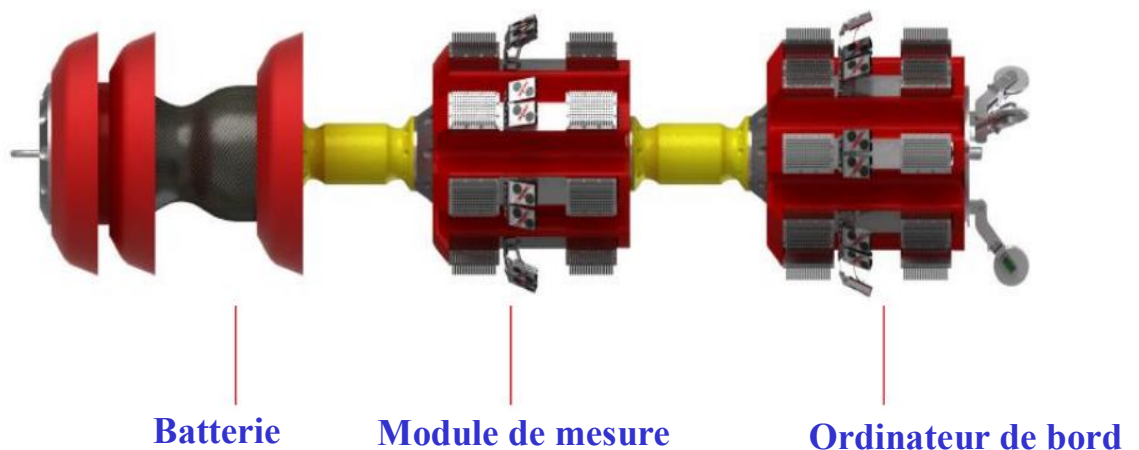


Figure I.3-Structure globale du détecteur interne de flux magnétique de pipeline

Géométrie du module de mesure

- Les modules de mesure MFL sont constitués d'un détecteur placé entre les pôles d'un aimant, qui peut détecter les pertes de flux. Le circuit magnétique forme avec la pièce à étudier un circuit magnétique fermé. Le champ magnétique induit dans la pièce permet une saturation localisée du matériau afin qu'il ne puisse absorber aucun flux. Ainsi, le champ déborde et fuit hors du tube.
- Les modules de mesure MFL sont rendus possibles grâce à l'utilisation d'un puissant aimant permanent permettant la magnétisation du matériau à contrôler, généralement de matériau ferromagnétique (à base de fer ou acier) [8].

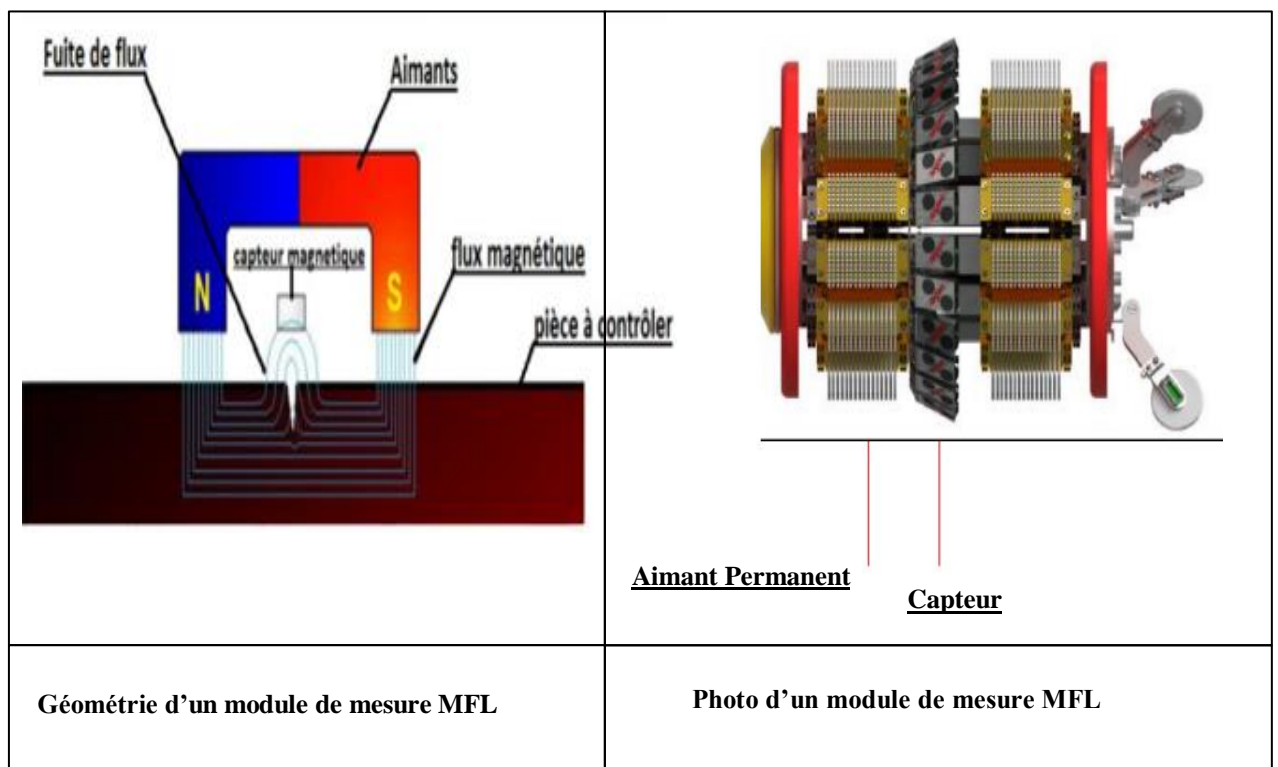


Figure I.4-Module de mesure MFL

b-Principe

- Le dispositif de test MFL obtient l'ampleur des défauts en mesurant la densité de flux magnétique qui s'échappe de la surface du matériau ferromagnétique.
- Si les composants à mesurer ne sont pas défectueux, tout le flux magnétique passera à travers les composants.
- La présence d'un défaut dans un matériau ferromagnétique magnétisé entraîne une redistribution du champ magnétique au voisinage du défaut, provoquant la "fuite" d'une partie du champ magnétique dans le milieu environnant [9].

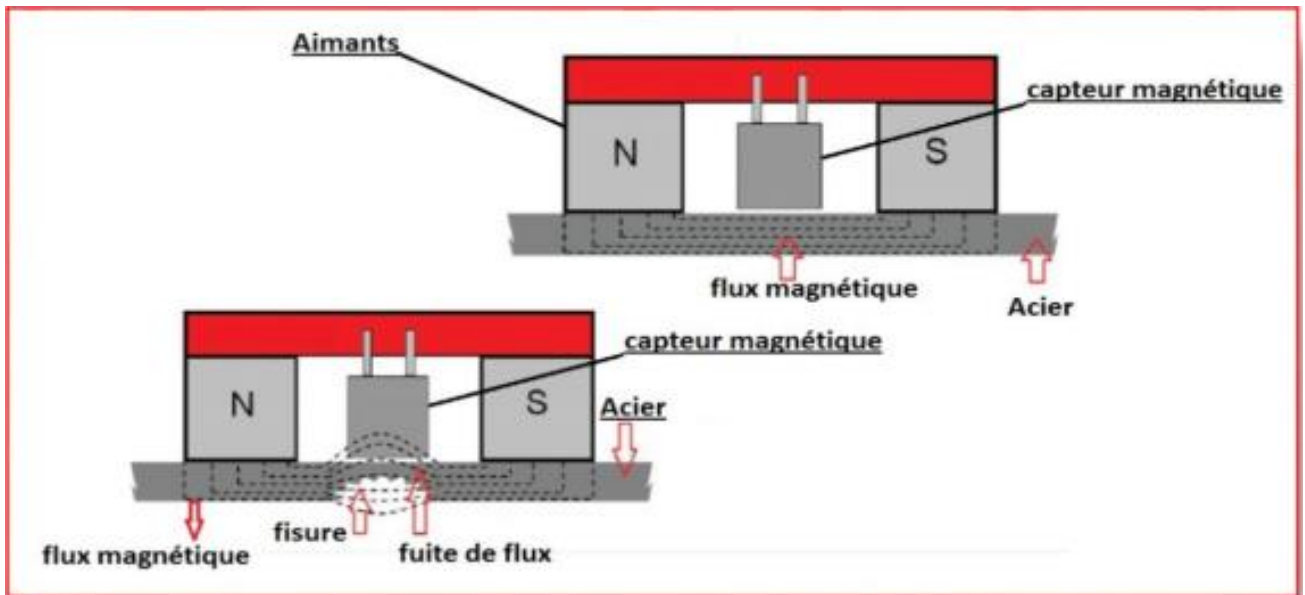


Figure I.5-Principe du contrôle de flux de fuite magnétique

2- Différents types de capteurs de champ

- Le capteur magnétique est un dispositif qui transforme les signaux magnétiques en signaux électriques. Il existe de nombreux types de capteurs magnétiques, y compris les bobines d'induction, les composants Hall, les magnétorésistances géantes (GMR) , etc [10].

a-Bobines d'induction

Lorsque les bobines se déplacent sur la surface du pipe, le champ provoqué par un défaut peut provoquer un changement du flux magnétique à travers la bobine. La force électromotrice induite générée par le champ de fuite magnétique peut être exprimée par la formule suivante :

$$U = N \frac{d\varphi}{dt} = N \frac{d(B.S)}{dt}$$

N : nombre de spires ;

φ : flux d'induction magnétique ;

B : intensité d'induction magnétique ;

S : section transversale des bobines

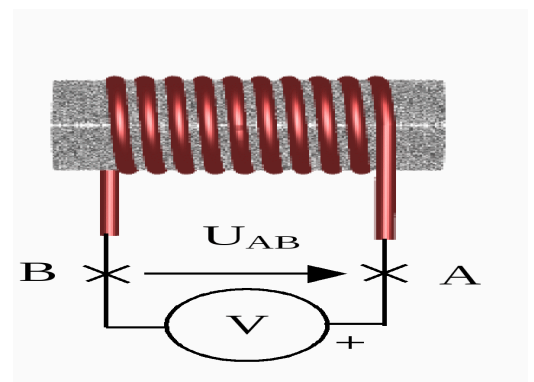


Figure I.6-Bobine d'induction

b- Les capteurs à effet Hall

- Lorsque la direction du mouvement du courant est perpendiculaire à la direction de l'intensité de l'induction magnétique, les composants Hall des deux côtés produisent une force électromotrice. Elle peut s'exprimer par la formule suivante [6] :

$$U_H = K_H \times I \times B \times \cos\alpha$$

U_H : la force électromotrice de Hall ;

K_H : Coefficient de Hall ;

B : Intensité d'induction magnétique ;

$\cos\alpha$: l'angle normal entre l'intensité d'induction magnétique et les composants de Hall.

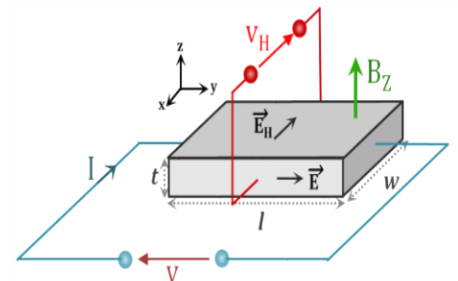


Figure I.7-Capteur à effet hall

- Le terme U_H n'a rien à voir avec la vitesse du moteur, il n'est donc pas affecté par la non-uniformité de l'inspection du pipeline.

c- Magnétorésistance géante (GMR)

- Une GMR est composée de couches ferromagnétiques séparées par des couches de matériau conducteur. Lors de l'application d'un champ magnétique sa résistance transverse varie proportionnellement à l'intensité du champ magnétique.
- En l'absence de champ magnétique, les aimantations des couches minces s'orientent naturellement dans des directions opposées et dans ce cas, la résistance associée est maximale. Mais lorsqu'un champ magnétique est appliqué, la situation s'inverse. Les moments magnétiques des deux couches s'alignent parallèlement par couplage ferromagnétique indirect et par conséquent la résistance de la jonction devient très faible [11].

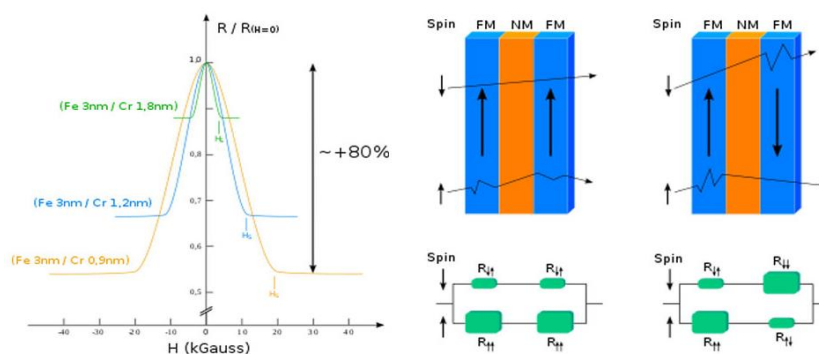


Figure I.8-Évolution de l'aimantation des couches d'une GMR en fonction du champ magnétique appliqué

3- Les Avantages et Les Inconvénients

a- Avantage

- ✚ Cette technique est particulièrement efficace pour les très petits défauts de surface [12].
- ✚ Simple, peu coûteux et rapide [6] .

b- Inconvénient

- ✚ Applicable seulement aux matériaux ferromagnétiques ;
- ✚ La sensibilité de détection des défauts dépend en effet de la nature, de la direction et de l'intensité de la magnétisation de la pièce [6].

4- Applications

- ✚ Les méthodes d'essai MFL sont utilisées pour la détection des discontinuités de surface extérieure, de surface intérieure et souterraine dans les produits tubulaires en acier magnétique de section transversale uniforme, tels que les tubes sans soudure et soudés.
- ✚ La technologie de fuite de flux peut également être utilisée pour inspecter les pièces ferreuses et les produits tels que les câbles métalliques, les tiges de ventouse et les pièces d'accouplement.
- ✚ Lorsqu'il est correctement appliqué, MFL peut détecter la présence et l'emplacement de discontinuités importantes orientées longitudinalement ou transversalement telles que des piqûres, des croûtes, des éclats, des entailles, des enroulements, des chevauchements, des coutures, des fissures, des trous et des soudures inappropriées [13] .

VI- Phénomènes physiques et formulation du champ électromagnétique

1- Phénomène physique

- La méthode de flux de fuite magnétique (MFL) est une méthode électromagnétique puisque son principe repose sur le phénomène de l'induction électromagnétique.
- La compréhension de ce phénomène est l'étape principale pour l'élaboration des modèles mathématiques destinés pour la conception des capteurs efficaces, et répondre aux problèmes rencontrés lors du contrôle des systèmes [14].

1-1-1 Lois d'électromagnétisme

La modélisation des interactions électromagnétiques qui se produisent entre deux pistes d'un circuit imprimé passe par l'élaboration d'un modèle physico-mathématique qui est basé sur les équations de Maxwell, les relations constitutives du milieu et les conditions aux limites du domaine d'étude.

a- Equations de Maxwell

- Tous les phénomènes électromagnétiques sont régis par les quatre équations de Maxwell et les lois de comportement des milieux.

- Pour calculer le champ électromagnétique dans un dispositif électrotechnique, on utilise les quatre équations fondamentales aux dérivées partielles de Maxwell qui s'écrivent sous leurs formes la plus générale comme suit :

- ✓ Équation de Maxwell-Ampère :

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

\vec{H} : Champ magnétique (A/m)

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$: Densité de courant de déplacement

\vec{j}_s : Densité du courant de conduction (A/m²)

- ✓ Équation de Maxwell- Faraday :

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

- ✓ Équation de conservation de l'induction magnétique :

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

- ✓ Équation de Maxwell-Gauss :

$$\text{div} \vec{D} = \rho$$

\vec{B} : Induction magnétique (T)

\vec{D} : Induction électrique (C/m²)

ρ : Densité de charge volumique (C/ m³)

\vec{E} : Champ électrique (V/m)

b- Relations des milieux

- Pour modéliser le comportement des milieux, des relations entre les grandeurs électromagnétiques sont rajoutées. Sans ces relations, le système formé par les équations électromagnétiques est indéterminé. Le champ électrique \vec{E} est lié à la densité de courant j par :

La loi d'Ohm :

$$j = \sigma \vec{E}$$

σ : conductivité électrique [S/m]

- En ce qui concerne le comportement magnétique des matériaux amagnétiques, la relation entre B et H est linéaire et de la forme :

Relation magnétique :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}r$$

Relation diélectrique :

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

ϵ : permittivité électrique [F/m]

μ : perméabilité magnétique [H/m]

$\vec{B}r$: Induction rémanente de l'aimant permanent [T]

c- Condition de passage

- Dans les problèmes de la compatibilité électromagnétique on rencontre des structures qui comportent différents milieux avec des propriétés physiques différentes, les conditions de passage aux interfaces sont obtenues à partir des équations de Maxwell

✓ **Conservation de la composante tangentielle du champ électrique \vec{E} :**

$$(\vec{E}_1 - \vec{E}_2) \wedge \vec{n} = 0$$

✓ **Conservation de la composante normale de l'induction magnétique \vec{B} :**

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

\vec{n} : Le vecteur normal à la surface.

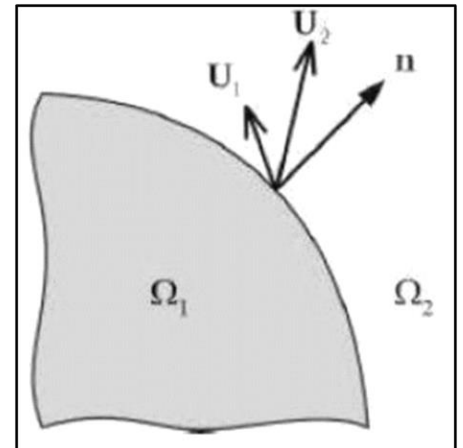


Figure I.9-Interface entre deux milieux

✓ **Discontinuité de la composante tangentielle du champ magnétique \vec{H} :**

$$(\vec{H}_1 - \vec{H}_2) \wedge \vec{n} = Js$$

✓ **Discontinuité de la composante normale de l'induction électrique \vec{D} :**

$$(\vec{D}_1 - \vec{D}_2) \cdot \vec{n} = \rho s$$

Js : La densité surfacique de courant libre à l'interface.

ρs : La densité surfacique de charge libre à l'interface.

2- Formulation du champ électromagnétique

Les équations de Maxwell constituent un système différentiel du premier ordre qui, dans le cas général, ne permet pas d'explicitier séparément les champs E et B . En introduisant une variable d'état appropriée à la géométrie des dispositifs étudiés, nous pouvons réduire les équations de Maxwell à une équation aux dérivées partielles facile à résoudre [12].

a- Formulations magnétostatique

- Les phénomènes magnétostatiques sont régis par les équations de Maxwell suivante :

Equation de Maxwell-Ampère :

$$\overrightarrow{rot} \vec{H} = \vec{J}_s$$

Equation de conservation du flux :

$$div \vec{B} = 0$$

- Ces deux équations sont complétées par la relation constitutive des matériaux linéaires et isotropes écrite sous la forme :

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

b- Formulation en potentiel vecteur magnétique

- L'élimination de \vec{B} et \vec{H} dans les relations donne la formulation magnétostatique en potentiel vecteur magnétique qui permet de simplifier ces équations.
- Du fait que le champ magnétique est à flux conservatif, sa divergence est nulle. Il existe alors un champ appelé potentiel vecteur magnétique tel que :

$$\vec{B} = \overrightarrow{rot} \vec{A}$$

- En utilisant le théorème d'Ampère et la loi constitutive des matériaux, nous avons :

$$\overrightarrow{rot} \left(\frac{1}{\mu} \overrightarrow{rot} \vec{A} \right) = \vec{J}_s$$

- L'équation précédente ne définit pas le champ de potentiel vecteur de manière unique. Pour se faire, nous ajoutons une jauge et nous prenons généralement la jauge de Coulomb :

$$div \vec{A} = 0$$

VII- Méthodes de résolution

- La résolution des formulations électromagnétiques revient à résoudre des équations aux dérivées partielles (EDP). Cette résolution joue un rôle très important pour la modélisation des dispositifs électromagnétique.

- Il existe plusieurs méthodes pour la résolution des EDP :
 1. Méthodes analytiques
 2. Méthodes mixtes (semi-analytiques)
 3. Méthodes numériques

1. Méthodes analytiques

Méthode de séparation des variables :

- C'est la méthode la plus utilisée pour la résolution des équations aux dérivées partielles, le principe de cette méthode consiste à mettre l'inconnue sous forme d'un produit des fonctions, dont chacune ne dépend que d'une seule variable.

2. Méthodes mixtes (semi-analytiques)

a. Méthodes des intégrales des frontières :

Cette méthode est basée sur la discrétisation des frontières du domaine, en utilisant pour cela le théorème de GREEN, Elle est limitée à la résolution des systèmes linéaire.

b. Méthode des circuits couplés :

La méthode des circuits couplés permet de fournir la solution d'une EDP par une expression intégrale de type BIOT ET SAVART, et elle est peut-être couplée à une méthode numérique de discrétisation.

3. Méthodes numériques

- Pour trouver des solutions aux équations les plus difficile du maxwell on doit utiliser la méthode numérique qui nous permettent d'obtenir une solution Proche que la solution exacte du problème étudié.
- Les méthodes numériques les plus utilisées :
 - **Méthode des différences finies**
 - **Méthode des volumes finis**
 - **Méthode des éléments finis**

a- Méthode des différences finies

- Une méthode basée sur le théorème de Taylor où l'on remplace l'opérateur différentiel par l'opérateur aux différences finies. Le domaine d'étude 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 écrite pour chaque nœud du maillage, pour cela on aura un système algébrique possédant un nombre d'équations égal au nombre des nœuds. La MDF est une méthode simple à programmer, nécessite un maillage régulier qui s'adapte mal aux géométries complexes. Elle est plutôt réservée aux domaines à géométrie simple et aux frontières régulières tels que les carrés et les rectangles [15].

b- Méthode des volumes finis :

- En analyse numérique, la méthode des volumes finis est utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles, comme la méthode des différences finies et celle des éléments finis.
- La méthode des volumes finis se base directement sur la forme dite forte de l'équation à résoudre, alors que la méthode des éléments finis se fonde sur une formulation variationnelle de l'équation (pour formulation faible)

c- Méthode des éléments finis :

- Cette méthode est très couramment employée lors de l'étude des systèmes électromagnétiques complexes. Elle permet d'obtenir des résultats de calcul avec une bonne précision et d'étudier de façon précise la répartition interne du flux magnétique. Elle consiste à discrétiser tout le domaine d'étude en des éléments finis (tétraèdres, prismes...). La MEF repose sur la transformation des EDP à un système d'équations algébriques (système matriciel)

Chapitre II- Modélisation de fuite de flux magnétique

I- Introduction

- Les outils de simulation d'aujourd'hui sont devenus très performants grâce, d'une part, aux avancées technologiques des ordinateurs (vitesse d'exécution, mémoire allouée), et d'autre part, aux développements de modèles numériques de plus en plus adaptés aux problèmes rencontrés. Les méthodes numériques les plus connues sont la méthode des intégrales de frontières, la méthode des différences finis, et la méthode des éléments finis et la méthode des volumes finis. Parmi toutes ces approches [16] , la méthode des éléments finis (FEM) est considérée comme la plus adaptée pour la modélisation des phénomènes électromagnétiques et un outil pratique pour modéliser le processus de détection de la corrosion au moyen de la méthode de fuite de flux magnétique fondamentalement décrits par les équations de Maxwell [17].
- Ce chapitre est destiné à présenter l'étude théorique (prise en main) de Flux et la modélisation tridimensionnelle 3D de flux de fuite magnétique MFL en utilisant la méthode des éléments finis, cette méthode a été utilisé pour étudier les signaux MFL sous différentes formes de défauts.

II- La théorie de la magnétostatique et les équations de Maxwell

La magnétostatique est la branche de l'électromagnétique qui étudie les champs magnétiques produits par des courants invariants en temps. Un courant d'aimantation, comme dans les aimants permanents, est produit par des charges mobiles qui subissent un mouvement de translation si les dipôles magnétiques ne sont pas répartis uniformément. Lorsqu'un grand nombre de charges existent en flux continu, les courants sont considérés comme stables (courant continu, DC). Par conséquent, dans ce cas les charges se déplaçant à une vitesse constante, un champ magnétique statique (ou magnétostatique) est produit.

D'un point de vue mathématique, les équations de Maxwell, qui sont des équations différentielles partielles avec des conditions aux limites données, délimitent les phénomènes physiques de nature magnétique. En l'absence de courant libre, le problème magnétostatique est régi par les équations de Maxwell [18].

La loi du circuit magnétique selon les états du théorème d'Ampère :

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_S \quad (II.1)$$

Où \mathbf{H} est le vecteur d'intensité du champ magnétique.

La loi sur le flux magnétique, qui révèle l'inexistence de monopoles magnétiques et la continuité du flux magnétique est donnée par :

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (II.2)$$

Où \mathbf{B} est le vecteur de densité de flux magnétique.

En plus des équations précédentes, nous présentons la relation constitutive à l'intérieur des matériaux ferromagnétiques (y compris les aimants permanents) :

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (II.3)$$

Ici, μ_0 désigne la perméabilité magnétique de l'espace libre (qui est égale à $4\pi 10^{-7}$) et \mathbf{M} , qui dépend de \mathbf{B} , est le vecteur d'aimantation du matériau ferromagnétique. Dans l'espace libre, $\mathbf{M} = \mathbf{0}$ et la relation se simplifie à :

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \quad (II.4)$$

Nous introduisons maintenant la notion de potentiel vectoriel magnétique, qui est un champ vectoriel qui ne peut pas vraiment être interprété physiquement. Néanmoins, la relation (II.2) pourrait être satisfaite si le vecteur de densité de flux magnétique \mathbf{B} est exprimé en termes de vecteur auxiliaire \mathbf{A} , appelé vecteur de potentiel magnétique, de telle sorte que :

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (II.5)$$

Ainsi, le théorème d'Ampère (II.1) et la relation (II.3) donnent des résultats :

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J}_S + \nabla \times \mathbf{M} \quad (II.6)$$

1-Formulation continue du problème magnétostatique dans l'espace tridimensionnel

L'objectif de l'analyse des problèmes liés aux champs magnétiques est de déterminer la valeur de certaines fonctions inconnues pour le champ considéré, comme l'intensité du champ magnétique, la densité de flux magnétique, le potentiel scalaire magnétique et le potentiel vectoriel magnétique.

Afin de résoudre l'équation numériquement, nous introduisons un domaine délimité $\Omega \subset \mathbf{R}^3$ ainsi qu'une frontière artificielle $\Gamma := \partial\Omega$ suffisamment éloignée de la région d'intérêt. Par conséquent, le problème de la valeur de la limite elliptique pour le vecteur potentiel magnétique \mathbf{A} peut-être formulé comme suit :

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J}_S + \nabla \times \mathbf{M} \quad \text{dans } \Omega$$

$$\mathbf{A} \times \mathbf{n} = \mathbf{0} \text{ sur } \Gamma \quad (\text{II.7})$$

Où \mathbf{n} représente le vecteur unitaire sortant de Γ .

III- Une Introduction à la méthode des éléments finis

- Les phénomènes qui décrivent le comportement des dispositifs électromagnétiques sont représentés par des EDP. En général, la résolution de ces équations se fait à l'aide des méthodes analytiques ou des méthodes numériques. Pour des géométries plus complexes, on a recouru à des méthodes numériques qui font appel à des techniques de discrétisation. En effet, elles transforment les EDP du champ en un système d'équations algébriques compte tenu des conditions aux limites. La solution fournie une approximation de l'inconnue en différents points situés aux nœuds du réseau géométrique correspondant à la discrétisation. Les principales méthodes numériques sont : La méthode des différences finies (MDF), la méthode des volumes finis (MVF), la méthode des intégrales de frontières (MIF) et la méthode des éléments finis (MEF) [19].

IV- Étude documentaire sur l'utilisation de la méthode des éléments finis pour la technique du flux de fuite magnétique

En 1975, Lord et Hwang ont introduit pour la première fois la méthode des éléments finis dans le calcul du champ magnétique de fuite magnétique, ce qui a fait considérablement progresser la recherche théorique. Grâce à l'étude des influences de différentes formes, angles, profondeurs et largeurs de défauts sur les fuites de champ magnétique, ils ont souligné que pour résoudre le problème de la forme complexe des fuites de flux magnétique, le calcul numérique est la seule méthode réalisable. Atherton et Bruder ont beaucoup travaillé sur le calcul numérique des champs magnétiques de fuite. Les défauts des parois intérieures et extérieures des tubes ont été calculés, un modèle bidimensionnel de fuite de distribution de champ magnétique a été établi, et les résultats calculés et les résultats expérimentaux ont été comparés et se sont avérés assez cohérents ; Ils ont également appliqué la méthode des éléments finis à l'analyse et à l'optimisation de l'aimantation de la paroi et ont utilisé les résultats calculés comme choix de base de la méthode d'aimantation.

Yan et d'autres ont également appliqué la méthode des éléments finis pour les modèles de fuite de champ magnétique défectueux. À l'aide d'une méthode d'itération par rétroaction, ils ont analysé les erreurs du modèle, puis ont effectué une simulation des défauts d'apparence des pipelines de transport de gaz naturel. Ils ont également pris en compte certains facteurs d'influence des signaux de fuite de champ magnétique et de fuite de flux magnétique, tels que la vitesse de déplacement du pôle magnétique dans le tuyau, la magnétisation du pipeline, le matériau du tuyau, etc [20].

V-Principe de la méthode des éléments finis

Sans doute ce sont les éléments finis qui occupent une grande place dans la modélisation 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 discrétiser tout le domaine d'étude en des éléments finis (tétraèdres, prismes...). L'avantage de s'adapter aux géométries complexes et la prise en considération des non linéarités ont fait que la MEF 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 [19].

VI-Discretisation du domaine

Pour un domaine unidimensionnel qui est en fait une ligne droite ou curviligne, les éléments sont souvent de petits segments interconnectés entre eux pour former tout le domaine. Pour un domaine bidimensionnel, les éléments sont constitués des triangles ou rectangles. Dans le cas de problèmes tridimensionnels, le domaine peut être subdivisé en éléments tétraédriques, prismatiques, hexaédriques. Ces éléments nécessitent une description complète de leurs nœuds.

Nous présentons dans ce qui suit quelques éléments :

1-Eléments à une dimension : Les éléments à une dimension sont utilisés pour les structures en squelette planes ou spatiales. On trouve dans cette catégorie les éléments de barre où seulement l'effort axial est considéré et les éléments de poutre où le phénomène de flexion est présent. Ces structures peuvent être modélisée par des éléments 1D [21].

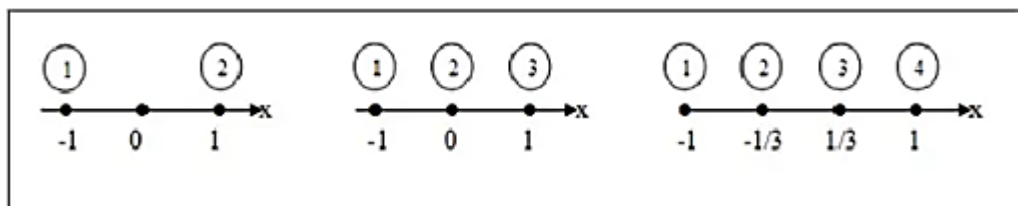


Figure II.10-Discretisation des éléments à une dimension

2-Eléments à deux dimensions : Les éléments à deux dimensions sont les plus utilisés car ils permettent la modélisation d'un grand nombre de systèmes. Ils sont aussi un intérêt pédagogique, car il est plus facile d'expliquer les formulations sur un plan que dans l'espace 1D.

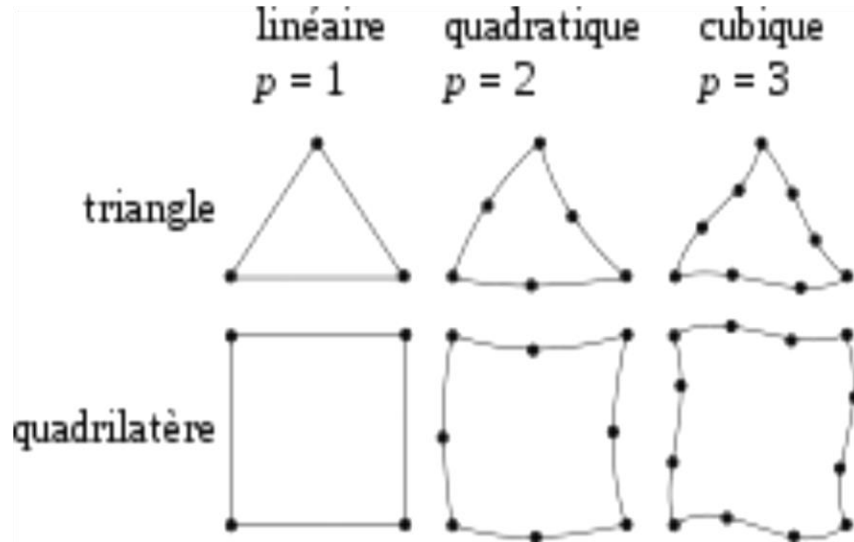


Figure II.11-Discretisation des éléments triangulaires et carrés

3-Eléments à trois dimensions : C'est le cas des structures massives où les dimensions des pièces sont comparables dans toutes les directions. Les éléments 3D sont donc utilisés pour les solides massifs et les plaques et coques épaisses.

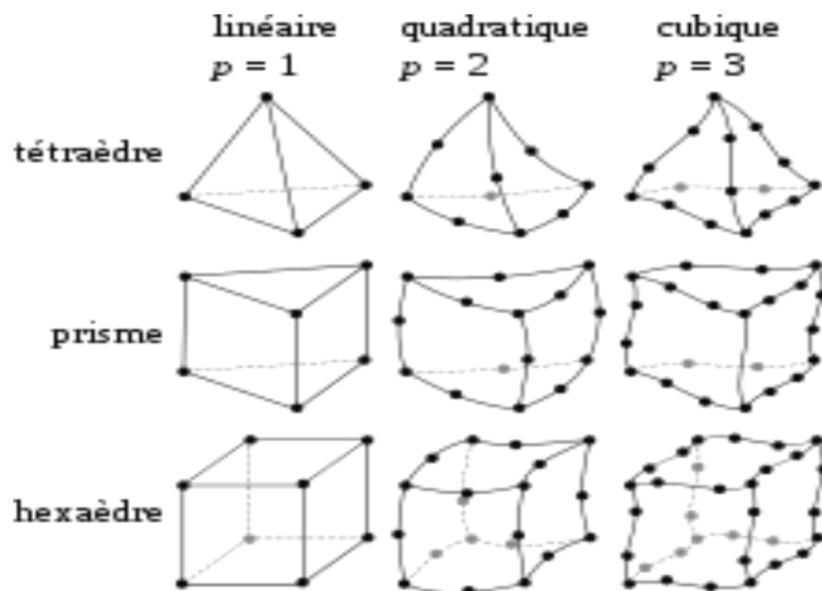


Figure II.12-Discretisation des éléments à trois dimensions

VII-Étapes générales de l'analyse par éléments finis

La MEF est réalisée en suivant les principales étapes ci-dessous [10] :

- Discrétiser le domaine en un nombre fini d'éléments.
- Sélectionnez les fonctions d'interpolation.
- Déterminer les matrices d'éléments individuels.
- Construire la matrice globale, correspondant à l'ensemble du modèle, en assemblant des matrices d'éléments visuels.
- Définir les contraintes de limites.
- Résoudre le système global d'équations.
- Faites les calculs supplémentaires si nécessaire.

1-Nœuds et éléments

Après le maillage du domaine d'intérêt, des nœuds sont créés pour définir les coordonnées Emplacements dans le plan ou l'espace 3-D, dans lequel existent les degrés de liberté et les actions du problème physique. Les degrés de liberté d'un élément représentent les inconnues nodales primaires attribuées à cet élément et qui doivent être déterminées par l'analyse. La continuité des variables nodales, ou les degrés de liberté des éléments, est assurée par les nœuds communs entre les éléments [18].

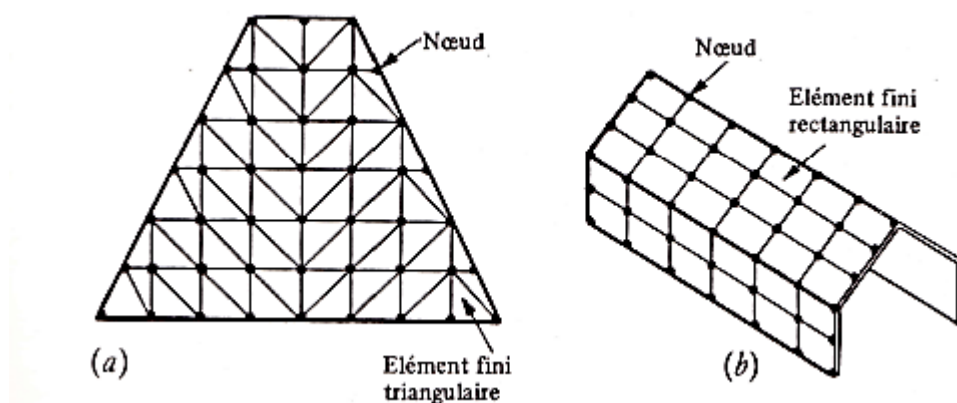


Figure II.13-Nœuds et éléments

VIII-Les avantages et les inconvénients de la méthode des éléments finis

❖ **Avantages :**

- Adaptation aux géométries complexes.
- Prise en compte des non linéarités accrues.

❖ **Inconvénients :**

- Mise en œuvre relativement difficile.
- Prise en considération de domaines infinis.
- Présence de singularités dans le domaine d'étude.
- Temps de calcul relativement important.

IX-Contexte FEM en MFL

La méthode FEM 2D est une méthode efficace utilisée pour étudier le signal MFL sous différents matériaux, différentes formes de défauts, situation de magnétisation, etc. Cependant, dans les défauts FEM 2D, les défauts sont en outre traités comme un profil 2D plutôt que comme une géométrie 3D réelle, et le signal MFL résultant est le canal unique alors que les signaux réels sont multicanaux. Les applications de la FEM 3D consistent à analyser et à généraliser une formulation potentielle au champ magnétique dans MFL et elle est également modélisée avec précision et une comparaison détaillée est effectuée pour le modèle avec et sans défaut. Grâce à la FEM, les caractéristiques de l'intensité du champ magnétique et du champ de distribution peuvent être examinées. De plus, le FEM peut analyser et quantifier la distribution de MFL et l'altération de l'intensité causée par l'ajout de plusieurs circuits magnétiques afin d'identifier et d'analyser le défaut généré, la méthode des éléments finis magnétiques (FEMM) est utilisée pour modéliser différents types de fissures. Afin de simuler la sortie dans une petite section du pipeline, de nouvelles propriétés ont été entrées dans le logiciel en introduisant plusieurs fissures. Un petit déplacement dans le champ entraîne un état réel du pipeline à la suite d'une perturbation du champ magnétique [22].

- Aujourd'hui, il existe un nombre important de logiciels commerciaux et académiques qui utilisent la méthode des éléments finis comme outil de simulation dans un large spectre de domaines (mécanique, thermique, électromagnétisme...). Parmi les logiciels les plus populaires dans les milieux scientifiques dans le domaine de l'électromagnétisme nous citons : Maxwell, flux, Ansys, Matlab, Comsol multiphysique,...etc [12].

X-Présentation du logiciel FLUX

- Flux 2D /3D est un logiciel de conception assisté par ordinateur utilisant la méthode des éléments finis, il permet le calcul des états magnétiques, électriques ou thermiques des dispositifs en régimes permanents, transitoires et harmoniques, avec des fonctionnalités d'analyse multiparamétrique étendues, les couplages circuit et cinétique. Ceci nécessite la résolution d'équations diverses : équations de Maxwell, de la chaleur, loi de comportement des matériaux [23].

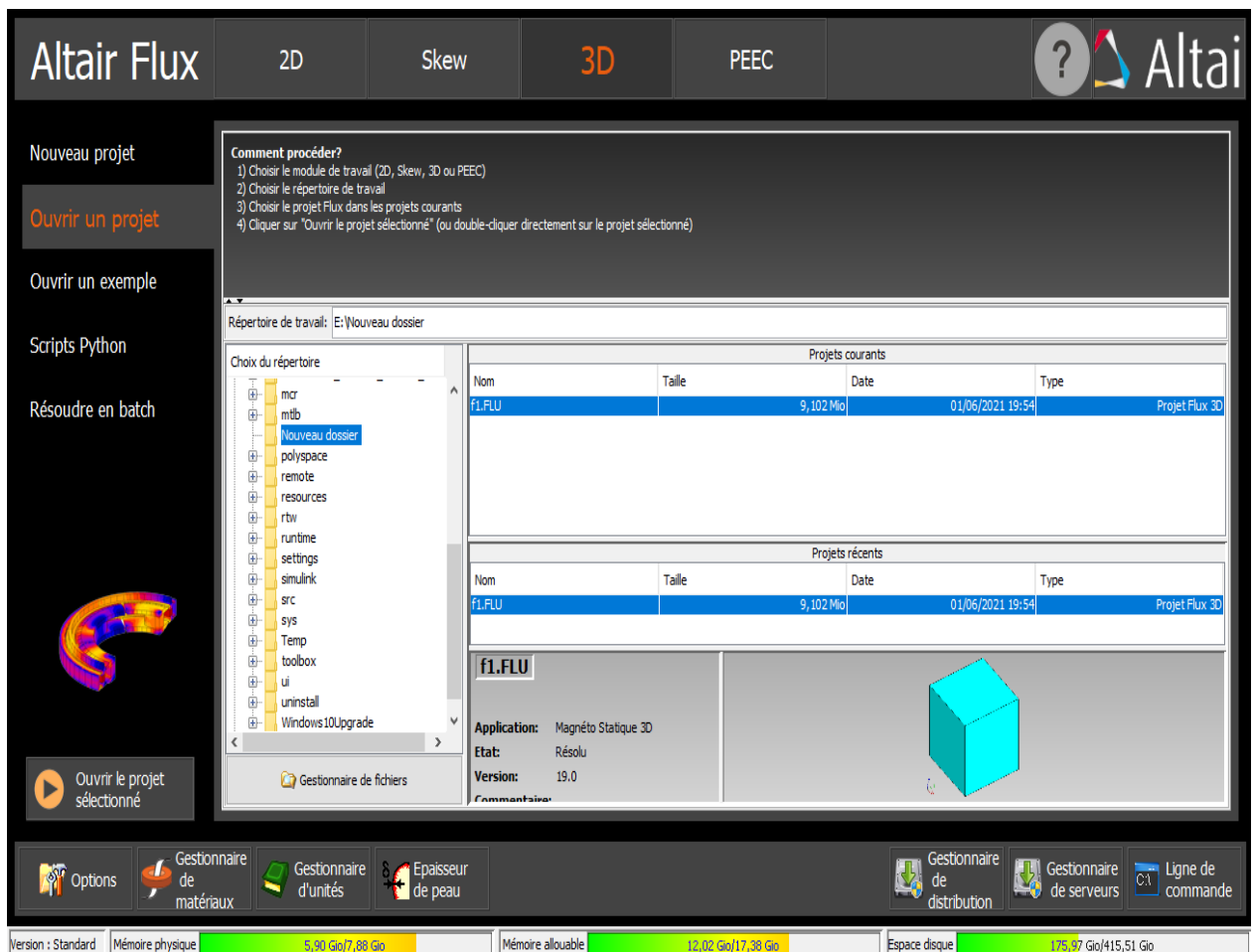


Figure II.14-Présentation du logiciel FLUX

XI-Génération de MFL étudiée sur FLUX 2D/3D

En général la modélisation d'un dispositif dans Flux 2D/3D passe par 5 étapes essentielles est :

- Construction géométrique
- Génération du maillage
- Propriétés physique
- Résolution
- Exploitation des résultats

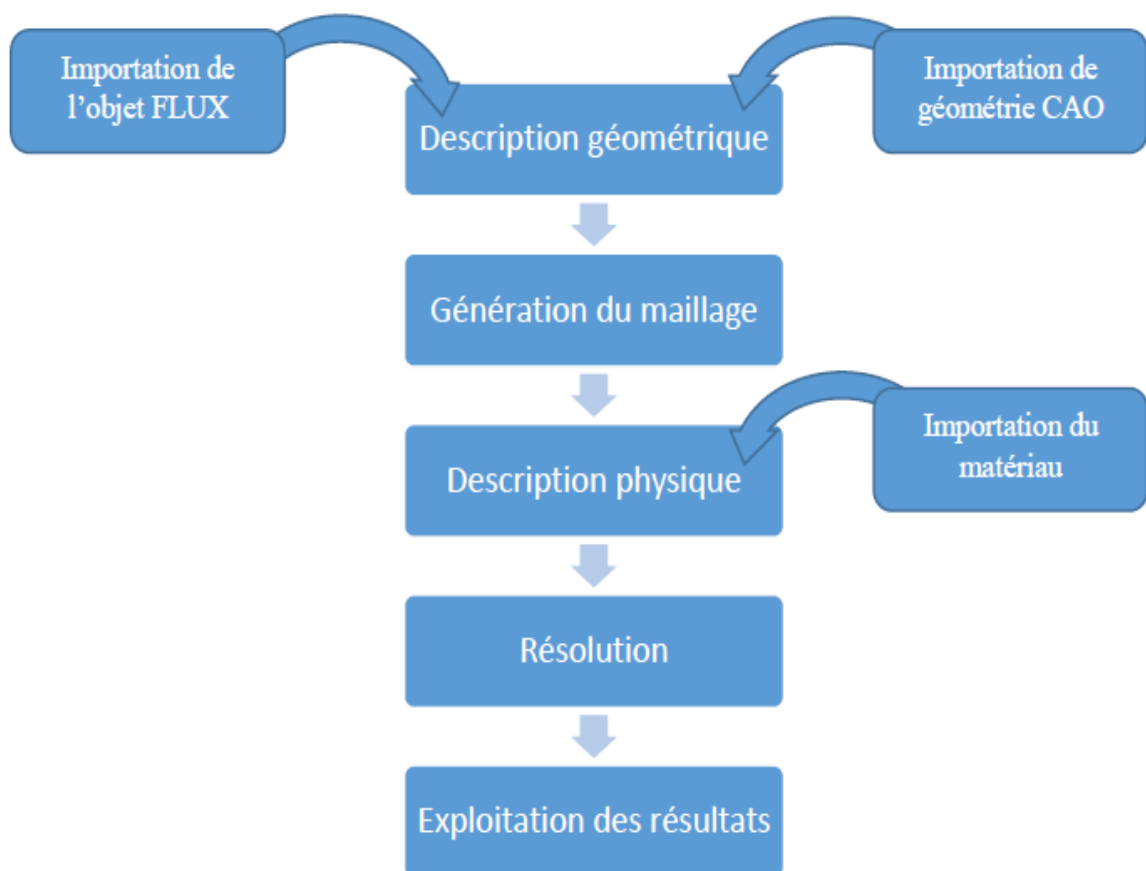


Figure II.15-Construction d'un projet FLUX (2D/3D)

1-Description géométrique

La première étape consiste à créer le dispositif dans Flux 2D/3D. Pour cela nous créons les paramètres géométriques qui seront utilisés pour la création des points, lignes, faces et volumes. Pour un gain de temps de calcul, on utilise également les périodicités et les symétries, ce qui permet de ne représenter qu'une portion du dispositif (1/2, 1/4...) [24].

2-Maillage

a-Introduction du maillage pour MEF

Le maillage est essentiel pour la méthode des éléments finis car il est capable de paver un domaine irrégulier et complexe. Il y a plusieurs formes d'éléments : triangle, quadrilatère, tétraèdre, hexaèdre, prisme .1 mais la forme utilisée pour un meilleur automatique est généralement le triangle en 2D et le tétraèdre en 3D [25].

b-Conditions de validité des maillages pour la MEF

La méthode des éléments finis demande quelques prérequis aux maillages :

- le maillage ne doit pas contenir de trou ni de chevauchement entre éléments. En outre, dans le cas des éléments triangulaires en 2D, aucun élément ne peut partager deux ou plus de deux arêtes avec un autre élément. De façon similaire en 3D, aucun élément tétraédrique ne peut partager deux ou plus de deux facettes avec un autre élément.
- le maillage doit se conformer à la géométrie, c'est-à-dire respecter le bord de la géométrie.
- la densité du maillage doit être contrôlable par une fonction de taille, qui varie de manière souple et continue sur le domaine. Soit cette fonction de taille est attachée à un estimateur d'erreur locale, soit elle est définie par l'utilisateur.
- la forme des éléments doit satisfaire quelques conditions pour atteindre un bon niveau de qualité : un maillage de bonne qualité possède un maximum d'éléments équilatéraux (triangles équilatéraux ou tétraèdres équilatéraux) [25].

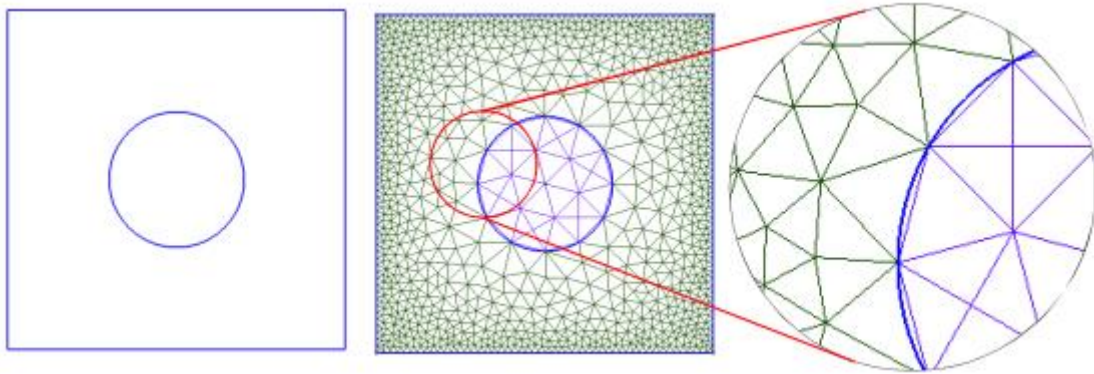


Figure II.16-Illustration de maillage triangulaire d'un domaine comportant un quadrilatère et un trou circulaire adapté à la géométrie

c-Maillage dans FLUX

Flux fournit différentes technologies de maillage qui peuvent être combinées dans des situations 2D et 3D pour aider l'utilisateur à obtenir rapidement un maillage précis [26] :

- Maillage automatique intelligent et contrôle manuel pointu de la taille et de la distribution du maillage.
- Maillage lié entre entités géométriques identiques.
- Amélioration du maillage auto-adaptatif lors de la résolution en 2D et 3D.

3-Description physique

Cette étape est consacrée à la définition des caractéristiques de chaque région, en affectant à chaque sous-domaine ses propriétés physiques [12].

4-Processus de résolution : un solveur rapide et robuste

Solveur entièrement paramétrique permettant des balayages de paramètres géométriques ou physiques [26]

- Plusieurs solveurs linéaires itératifs ou directs
- Informatique parallèle utilisant des multiprocesseurs de mémoire multi filière et distribuée.
- Solveurs non linéaires robustes.
- Études paramétriques distribuées sur plusieurs cœurs ou machines

5-Exploitation des résultats

Les calculs demandés dans le cahier des charges ont le plus souvent pour objectif de valider ou de vérifier le dimensionnement d'une structure. Les résultats obtenus et les conclusions relatives aux phénomènes à étudier devront être présentés de façon synthétique : tableaux, courbes, visualisation.

Chapitre III- Résultats et Interprétation

I-Introduction

Dans ce chapitre, on procèdera à la simulation d'un système MFL en 3D constitué d'un capteur (de forme U) formé d'un noyau ferromagnétique, de deux bobines et d'un capteur de champ à effet Hall placé au milieu afin d'inspecter la surface d'une tôle d'acier à faible carbone présentant plusieurs types de défauts. Après avoir implanté le modèle sous FLUX nous considérerons un défaut surfacique et nous étudions l'effet de la variation des paramètres caractéristiques du défaut à savoir la longueur, la largeur et la profondeur sur les composantes normale et tangentielle de l'induction magnétique.

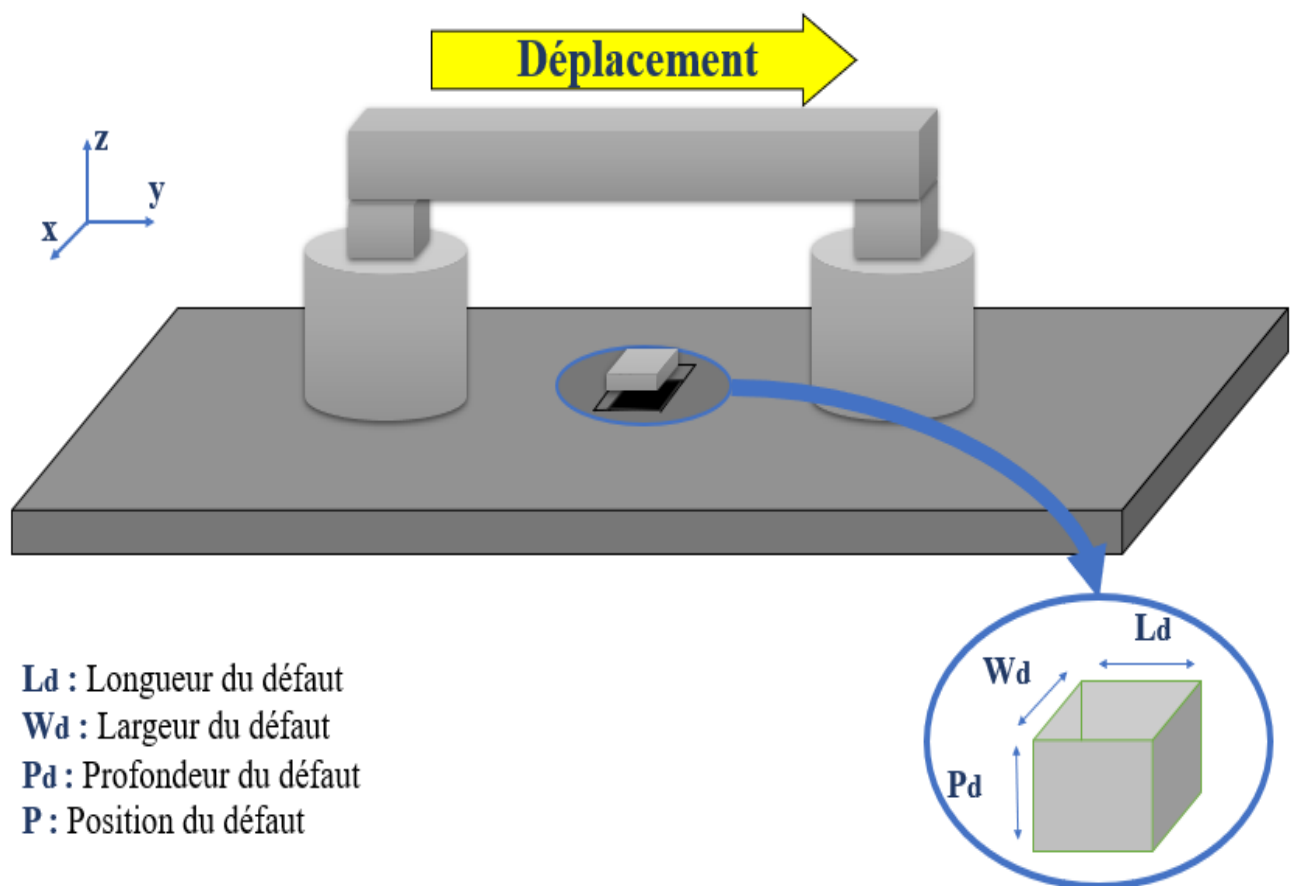


Figure III.17- Système MFL en 3D

II-Description géométrique

Nous faisons la géométrie du système MFL qui est constituée d'un capteur MFL et d'une plaque en acier (cible) dans le logiciel FLUX. Une boîte d'air est définie de telle façon d'avoir un bon compromis entre temps de calcul et précision de la solution. La connexion est faite en connectant entre les points et les lignes pour obtenir les faces puis nous connectons les faces pour créer les volumes. Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques géométriques du capteur, de la plaque et du défaut :

Tableau III.1-Caractéristiques géométriques du dispositif à étudier

<i>Géométrie</i>			
Longueur de la plaque	78mm	Lift-off	0,2mm
Largeur de la plaque	30mm	Longueur de la bobine	4mm
Profondeur de la plaque	1mm	Largeur de la bobine	1mm
Longueur de défaut	4mm	Longueur de capteur	1,98mm
Largeur de défaut	3mm	Largeur de capteur	2mm
Profondeur de défaut	0,5mm	Profondeur de capteur	0,14mm
La forme du noyau magnétique		en U	

1-Vue 3D du modèle proposé avec un défaut surfacique :

- La représentation du système de contrôle par MFL sous FLUX 2D/3D est proposée la figure suivante :

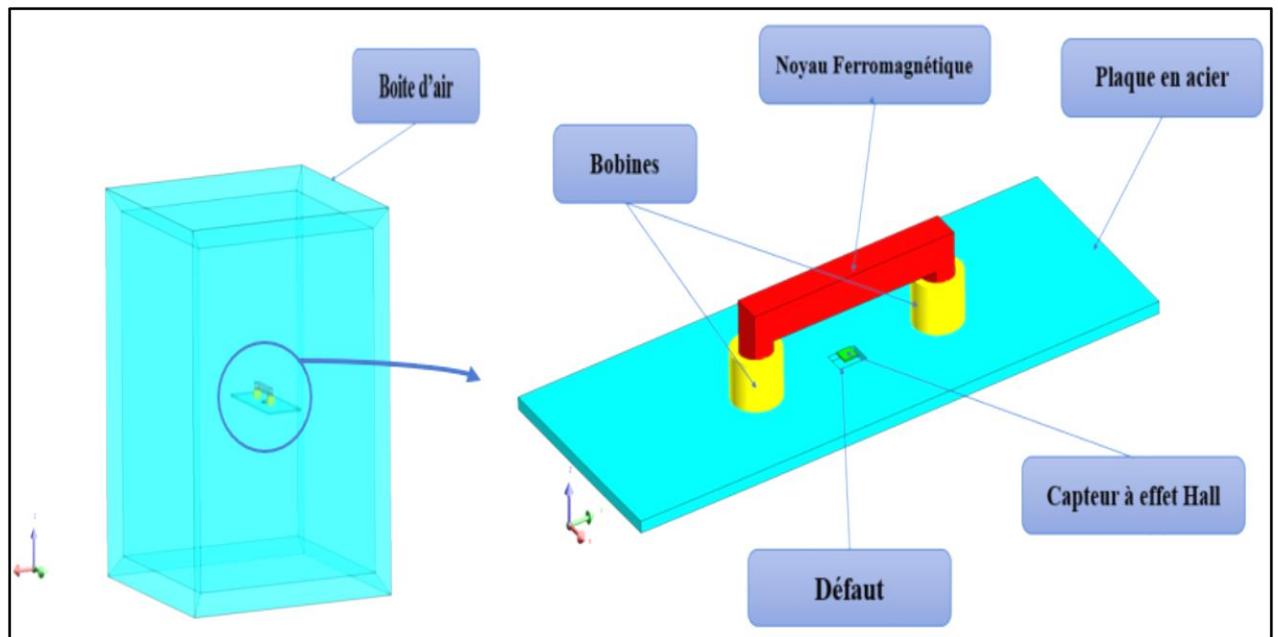


Figure III.18- Géométrie du dispositif (capteur-plaque) à modéliser avec une boîte d'air limitant le domaine d'étude

III-Maillage du modèle proposé

Dans une simulation par éléments finis, le système est modélisé par un maillage, c'est-à-dire un ensemble de nœuds et d'éléments. Le choix du maillage détermine notamment les fonctions de base qui représentent les champs de déplacement, et a donc une influence considérable sur les résultats. Dans notre cas, le maillage choisi pour capteur de MFL est un maillage automatique qui utilise des éléments tétraédriques car son avantage est d'être simple et robuste et adopter un maillage du premier ordre par discrétisation ponctuelle ce qui nécessite d'affecter manuellement à chaque point du domaine d'étude une valeur de discrétisation.

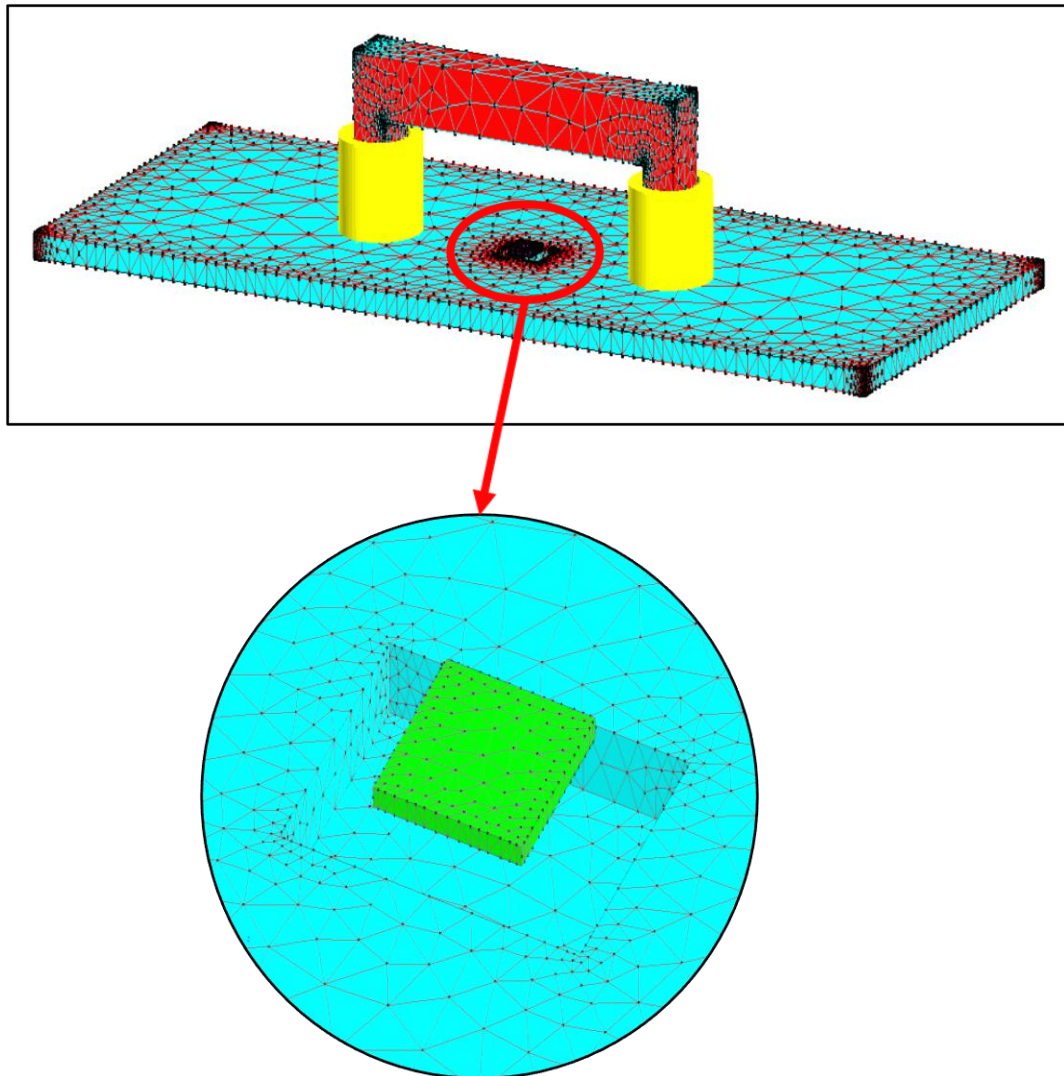


Figure III.19- Maillage du dispositif à étudier

- La qualité de maillage est déterminée par le nombre d'éléments excellents, bons, moyens et médiocres. Le maillage utilisé est un maillage de premier ordre, les résultats sont présentés dans la figure suivante [27]:

```

Elements volumiques :
  Nombre d'elements non evalues      : 0 %
  Nombre d'elements d'excellente qualite : 53.27 %
  Nombre d'elements de bonne qualite   : 40.81 %
  Nombre d'elements de qualite moyenne  : 5.24 %
  Nombre d'elements de qualite mediocre : 0.68 %

Nombre de noeuds : 20481
Nombre d'elements lineiques : 2532
Nombre d'elements surfaciques : 21502
Nombre d'elements volumiques : 112526
Ordre de maillage : 1er ordre
    
```

Figure III.20- Qualité de maillage

IV-Description physique

Cette étape est consacrée à la définition des caractéristiques de chaque région, en affectant à chaque sous-domaine ses propriétés physiques.

Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques physiques des différentes parties du dispositif étudié :

Tableau III.2 - Les caractéristiques physiques des différentes parties du dispositif étudié

<i>Caractéristiques physiques</i>	
Perméabilité magnétique relative de la plaque [H/m]	500
Perméabilité magnétique relative du noyau ferromagnétique [H/m]	5000
Courant d'excitation de bobines (A)	2
Le nombre de spires	100

V-Résultat de simulation du modèle MFL sous FLUX 3D

Les résultats de simulation ci-dessous représentent la répartition des Lignes de contour de champ magnétique à proximité de l'outil MFL et de la densité de flux magnétique dans le système.

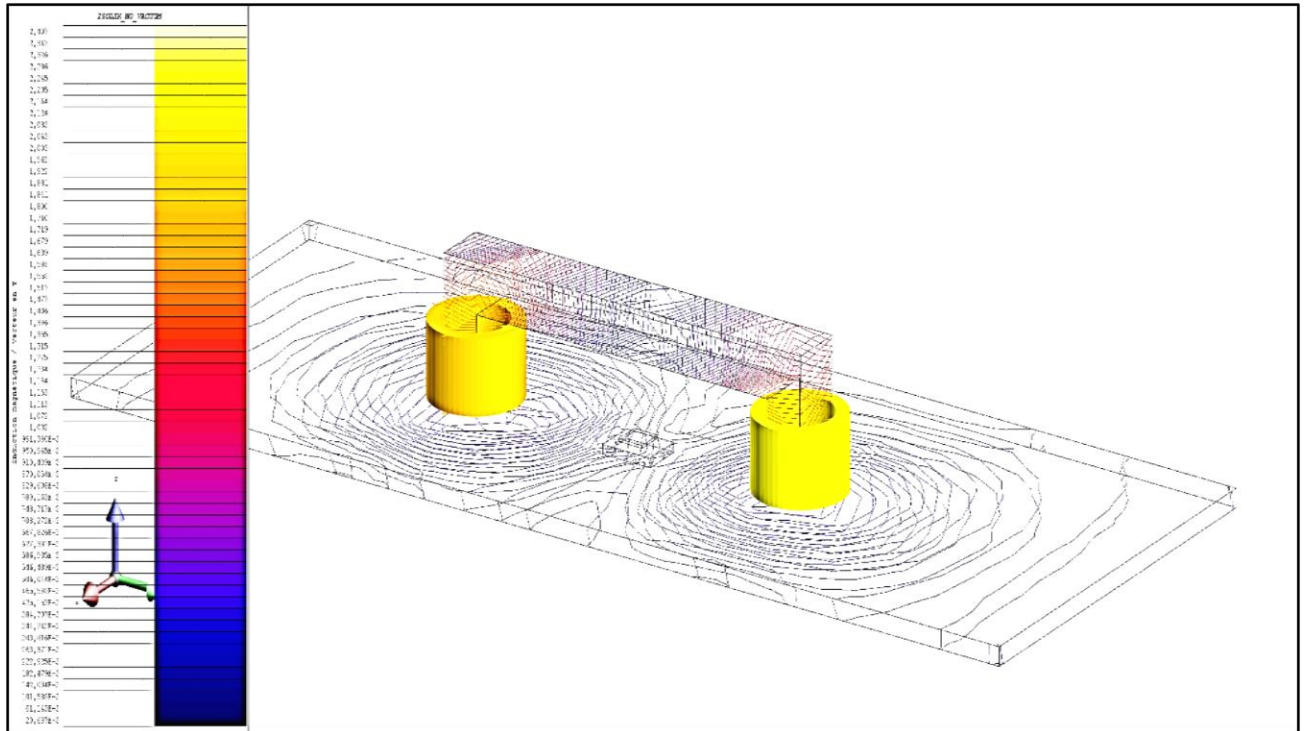


Figure III.21- Lignes de contour de champ magnétique du système

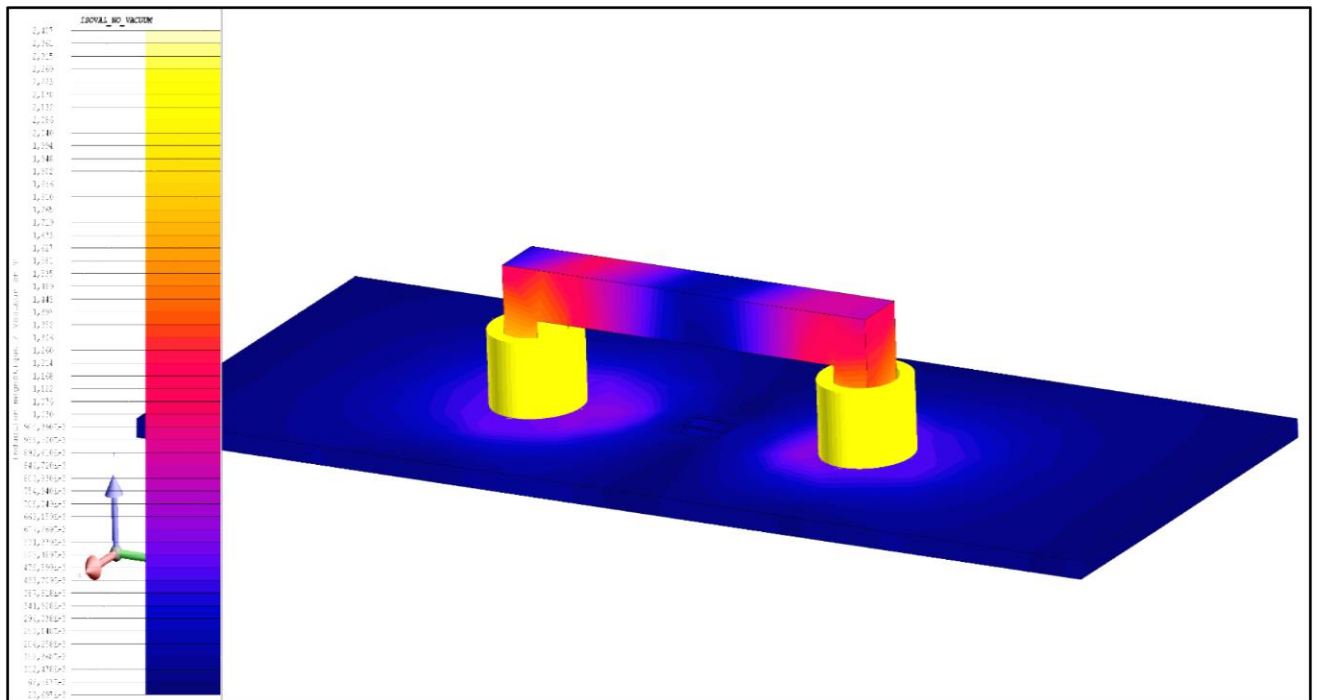


Figure III.22- Densité de flux magnétique

- Afin d'observer le phénomène MFL, nous représentons la dispersion des lignes de contour du champ magnétique sur tout le modèle. En se concentrant au centre de l'outil MFL, nous pouvons voir sur la figure (21) le flux magnétique diffuse dans cette région et nous pouvons voir sur la figure (22) la densité de flux magnétique B est affichée près du dispositif de magnétisation et est dispersée dans toute la plaque et on peut voir la redistribution du champ magnétique au voisinage du défaut, provoquant une « fuite » d'une partie du champ magnétique.

VI-Effet de variation des paramètres du défaut sur les composantes du champ magnétique

Après avoir implanté le modèle décrit précédemment sous FLUX, nous procédons à l'étude de l'effet de la variation des paramètres d'un défaut parallélépipède sur la réponse du capteur à effet Hall mesurant les composantes normale et tangentielle de l'induction magnétique.

1- Effet de la longueur du défaut sur les composantes de l'induction magnétique

Pour étudier l'effet de la longueur du défaut sur la composante normale et tangentielle de l'induction magnétique du champ de fuite, nous fixons la largeur de défaut à 3 mm et la profondeur à 0.5 mm puis nous faisons varier la longueur de 2 mm à 8 mm.

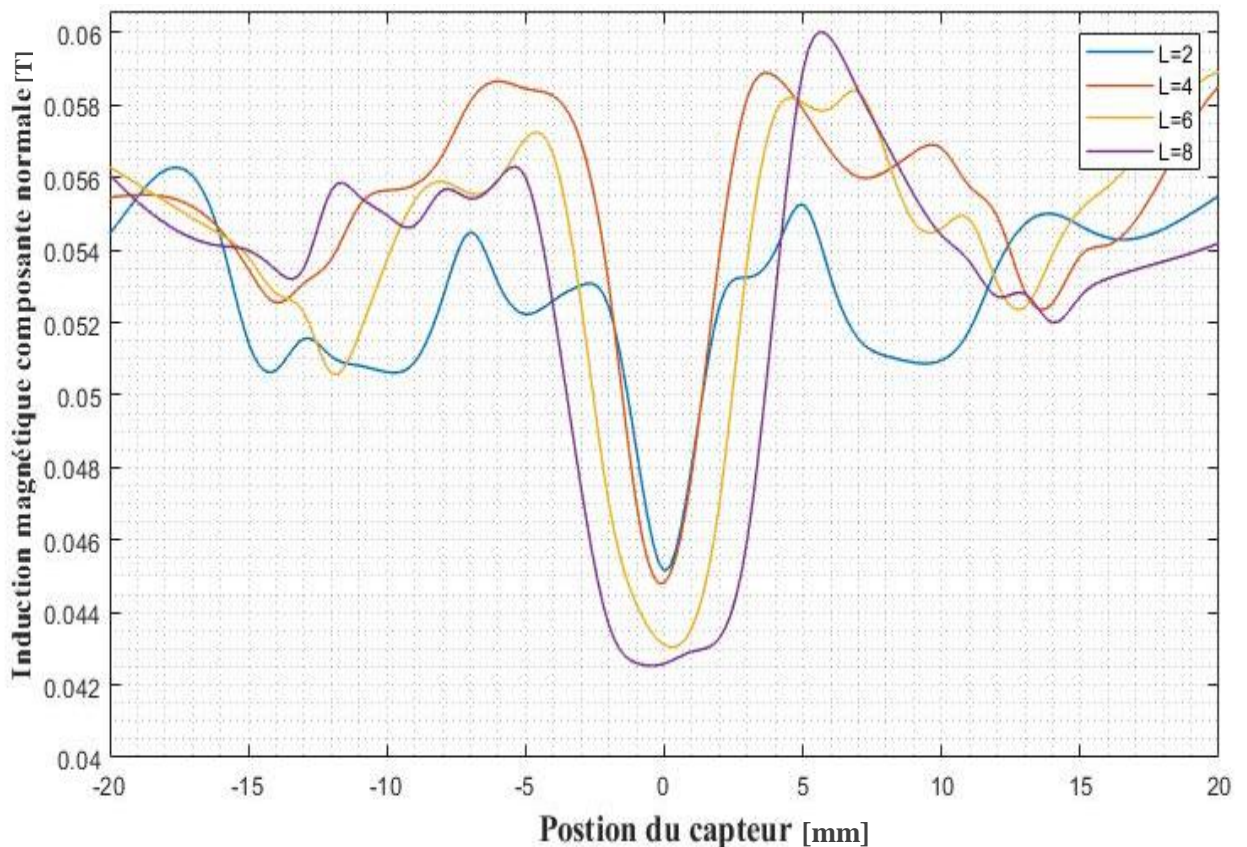


Figure III.23- Composante normale du signal MFL en fonction du déplacement du capteur pour plusieurs défauts ayant des longueurs différentes

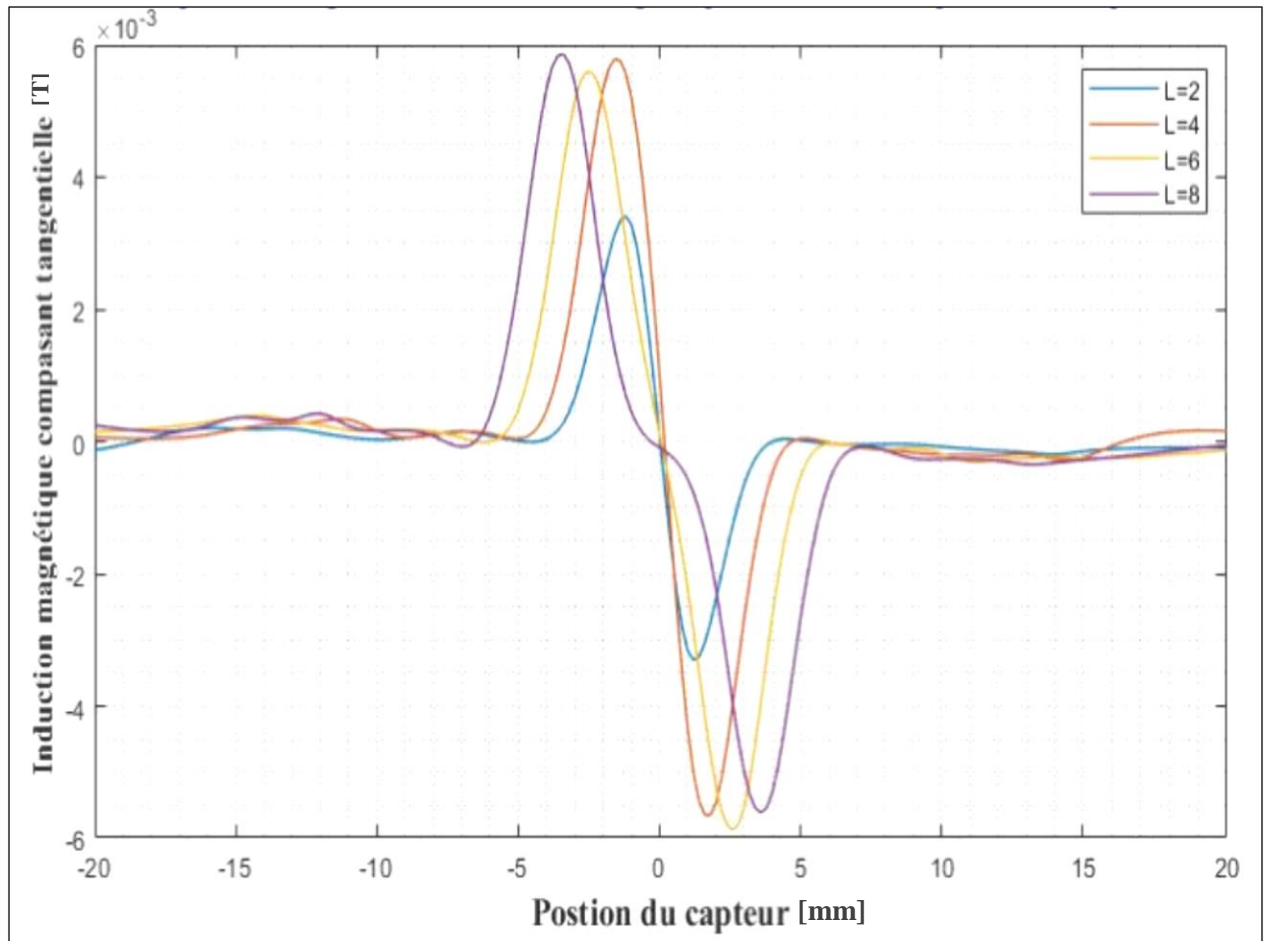


Figure III.24-Composante tangentielle du signal MFL en fonction du déplacement du capteur pour plusieurs défauts ayant des longueurs différentes

- ✚ A partir des résultats obtenus, on peut dire que la longueur du défaut affecte le signal des composantes d'induction magnétique. On remarque que pour la composante normale de l'induction magnétique lorsque la longueur du défaut augmente, l'amplitude des signaux est augmentée. D'autre part, on remarque que pour la composante tangentielle que quand la longueur du défaut augmente, les signaux sont écartés tout en gardant l'amplitude constante.

2-Effet de la variation de la largeur du défaut sur l'induction magnétique

Pour étudier l'effet de la largeur du défaut sur la composante normale et tangentielle de l'induction magnétique du champ de fuite, nous fixons la longueur du défaut à 4 mm et la profondeur à 0.5 mm puis nous faisons varier la largeur de 2 mm à 5 mm.

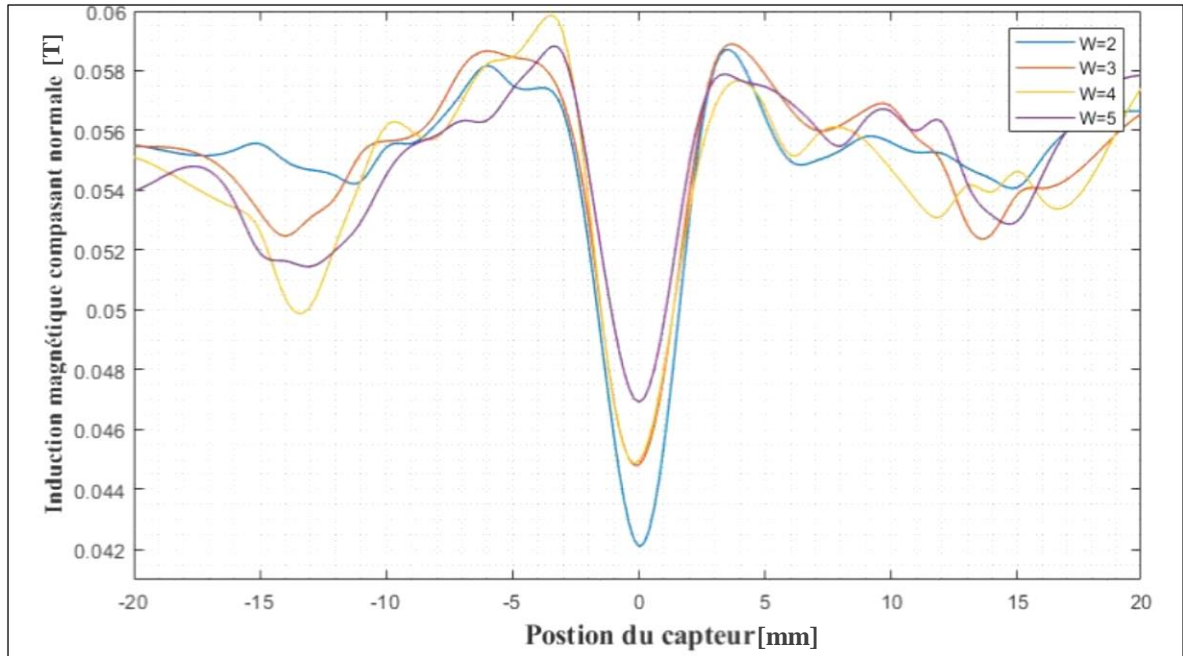


Figure III.25-Composante normale du signal MFL en fonction du déplacement du capteur pour plusieurs défauts ayant des largeurs différents

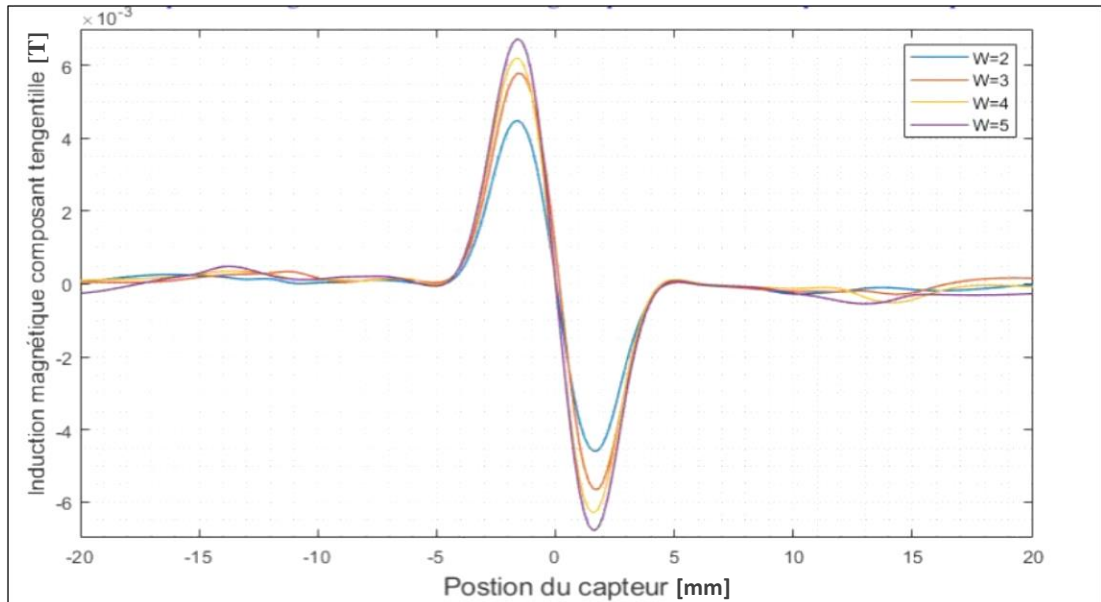


Figure III.26-Composante tangentielle du signal MFL en fonction du déplacement du capteur pour plusieurs défauts ayant des largeurs différents

- ✚ D'après les résultats obtenus, on peut dire que les signaux des composantes de l'induction magnétique sont fortement liés à la largeur du défaut. Si on augmente la largeur du défaut, l'amplitude du signal est augmentée. Alors, la relation entre la largeur et l'amplitude parais presque linéaire.

3-Effet de la variation de la profondeur du défaut sur l'induction magnétique

Pour étudier l'effet de la profondeur de défaut sur la composant normale et tangentielle de l'induction magnétique du champ de fuite, nous fixons la longueur de défaut à 4 mm et la largeur à 3 mm puis nous faisant varier la profondeur de 0.1 mm à 0.7mm.

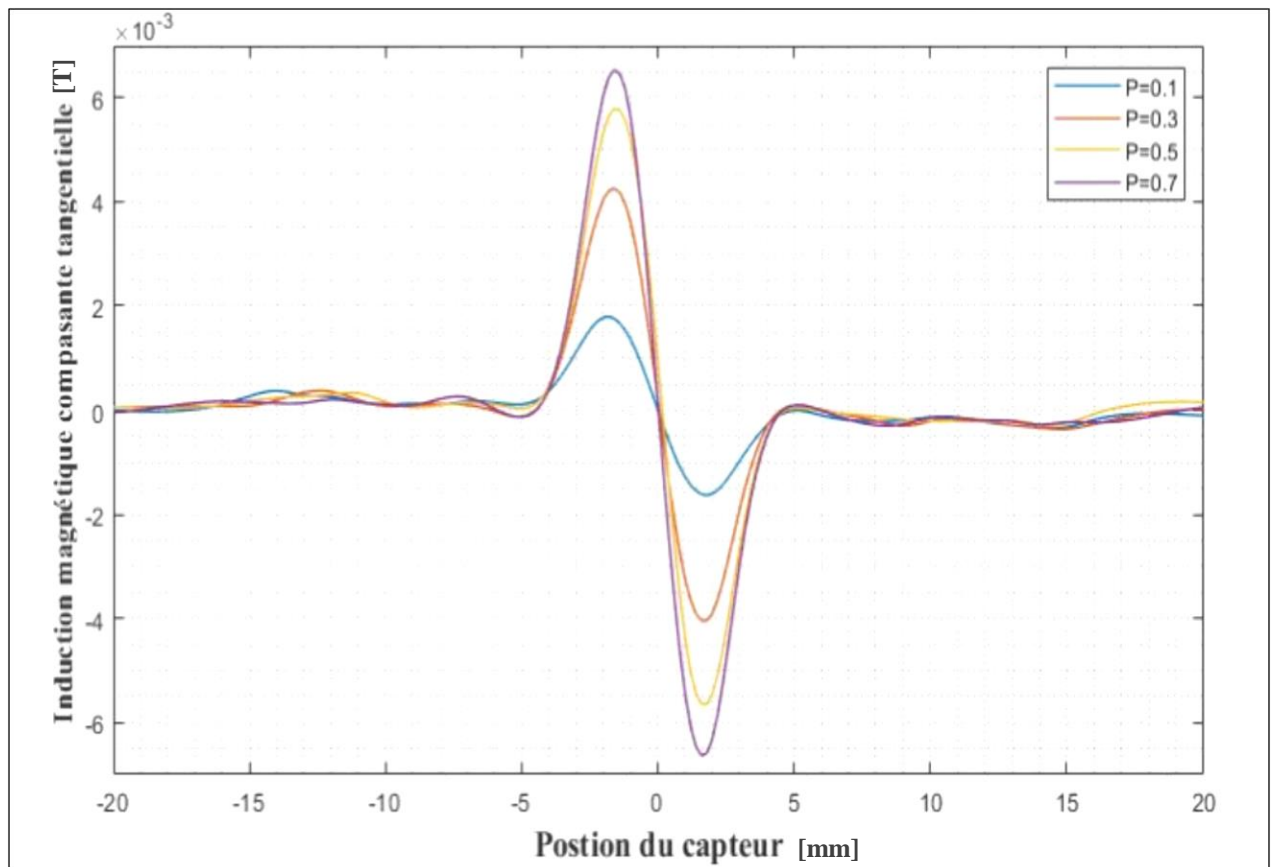


Figure III.27- Composante tangentielle du signal MFL en fonction du déplacement du capteur pour plusieurs défauts ayant des profondeurs différentes

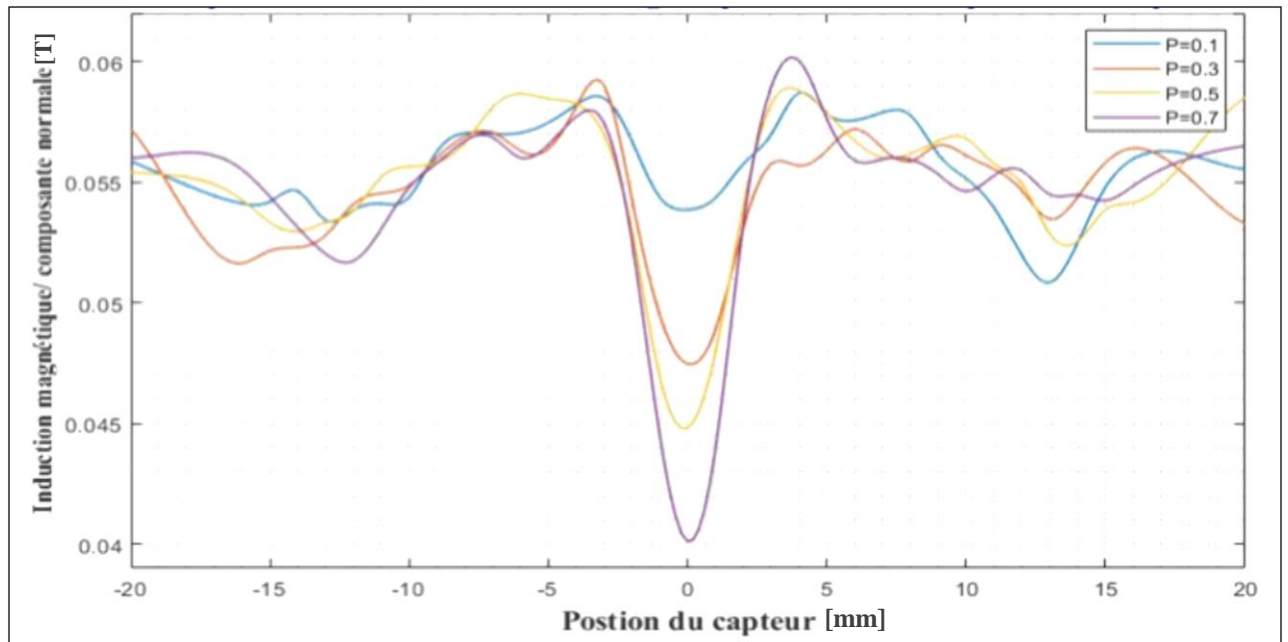


Figure III.28-composante normale du signal MFL en fonction du déplacement du capteur pour plusieurs défauts ayant des profondeurs différentes

- ✚ D'après les résultats obtenus, on peut dire que les signaux de composantes d'induction magnétique sont fortement liés à la profondeur des défauts. Si on augmente la profondeur l'amplitude est augmenté. Alors, la relation entre la profondeur et l'amplitude parais presque linéaire.

4-Effet du Lift-off sur les composantes de l'induction magnétique :

Pour étudier l'Effet du Lift-off sur composante normale et tangentielle de l'induction magnétique nous fixons la longueur de défaut à 4 mm et la largeur à 3 mm et la profondeur à 0.5mm puis nous faisant varier lift off de 0.2mm à 0.6mm.

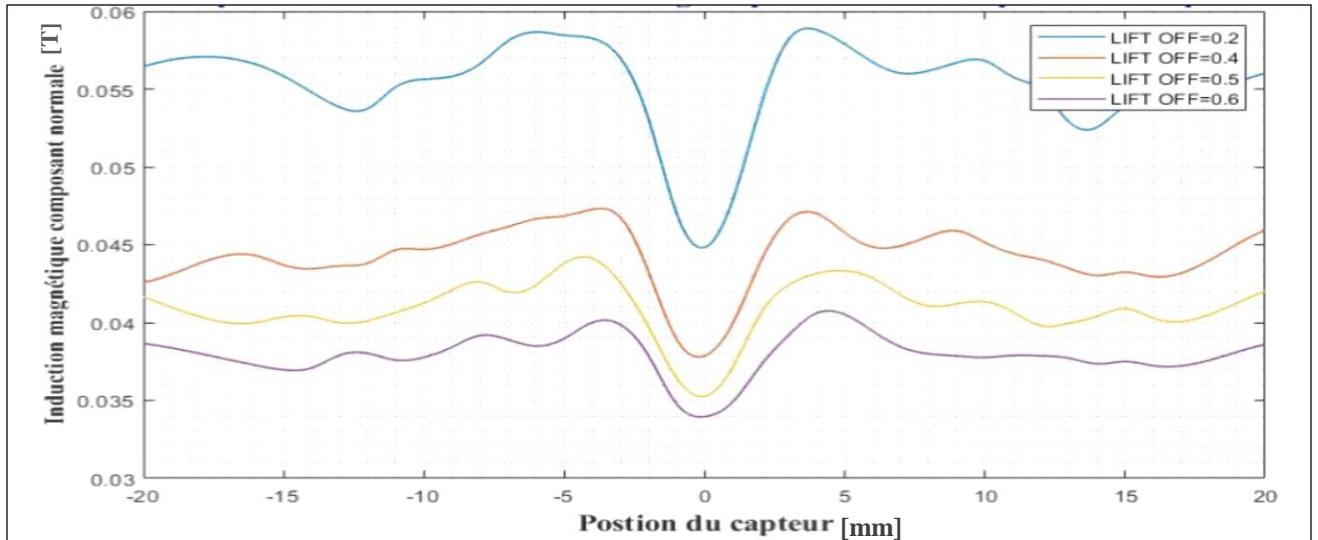


Figure III.29-Composante normale du signal MFL en fonction du déplacement du capteur pour plusieurs lift off

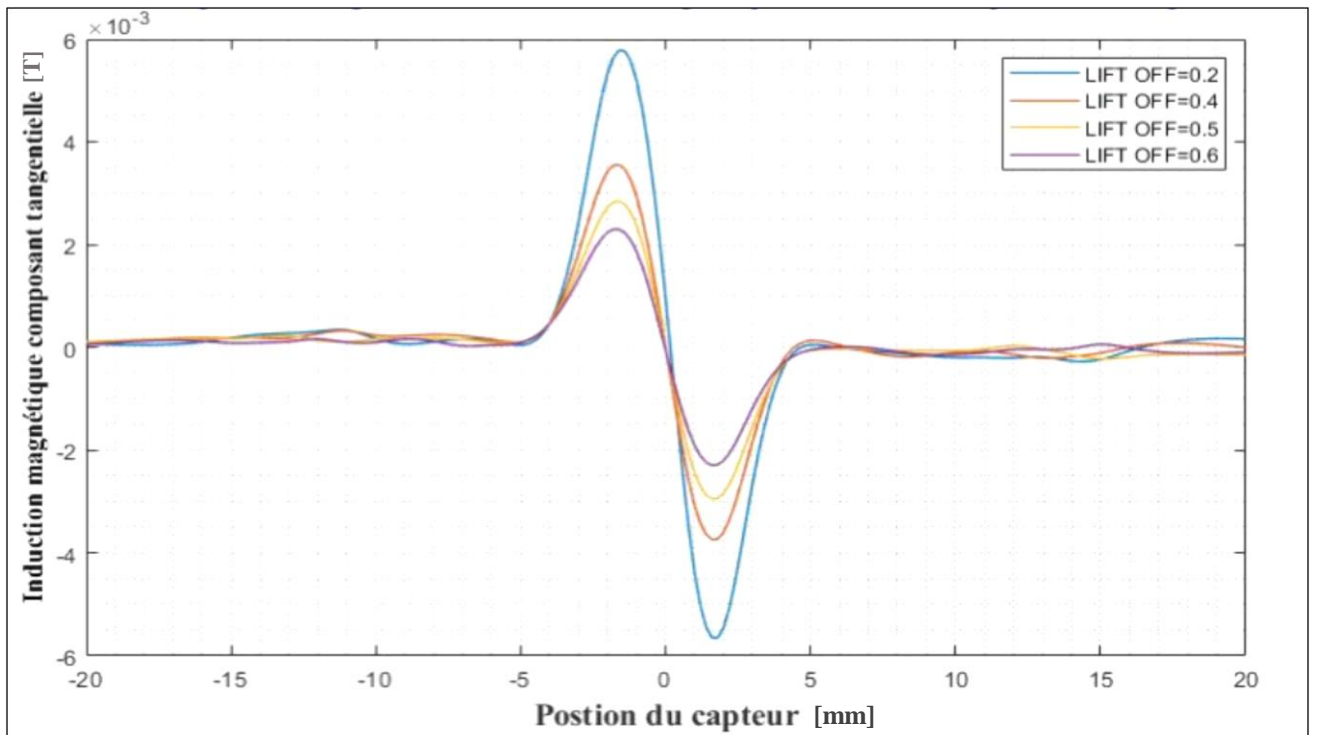


Figure III.30-Composante tangentielle du signal MFL en fonction du déplacement du capteur pour plusieurs lift off

- ✚ D'après les résultats obtenus, on peut dire que les signaux de composantes d'induction magnétique sont liés au lift off. Où lorsque le lift off augmente le capteur devient moins sensible et l'amplitude du signal diminue

VII-Vue 3D du modèle proposé pour un défaut sub-surfacique

La vue 3D du système à modéliser sous FLUX est illustrée où défaut est sous la surface.

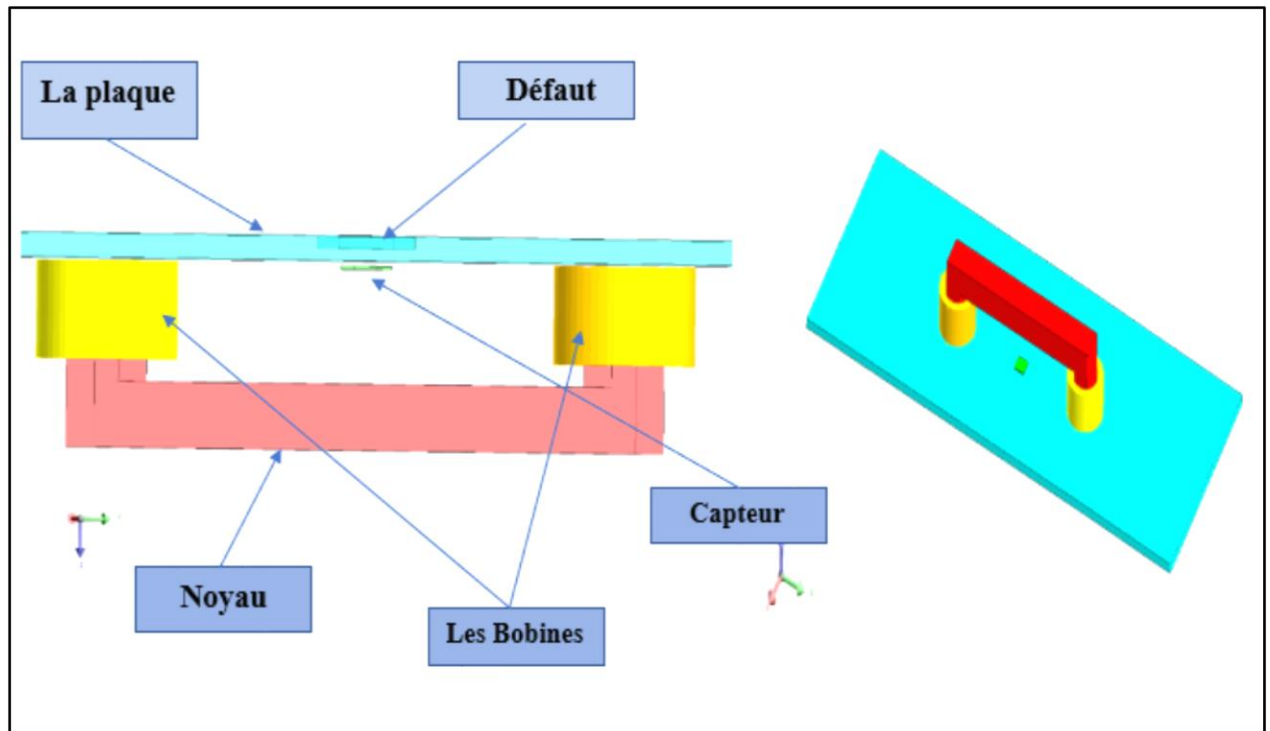


Figure III.31-Géométrie du dispositif (capteur-plaque) à modéliser avec un défaut sous surfacique en 3D

VIII-Maillage du système proposé

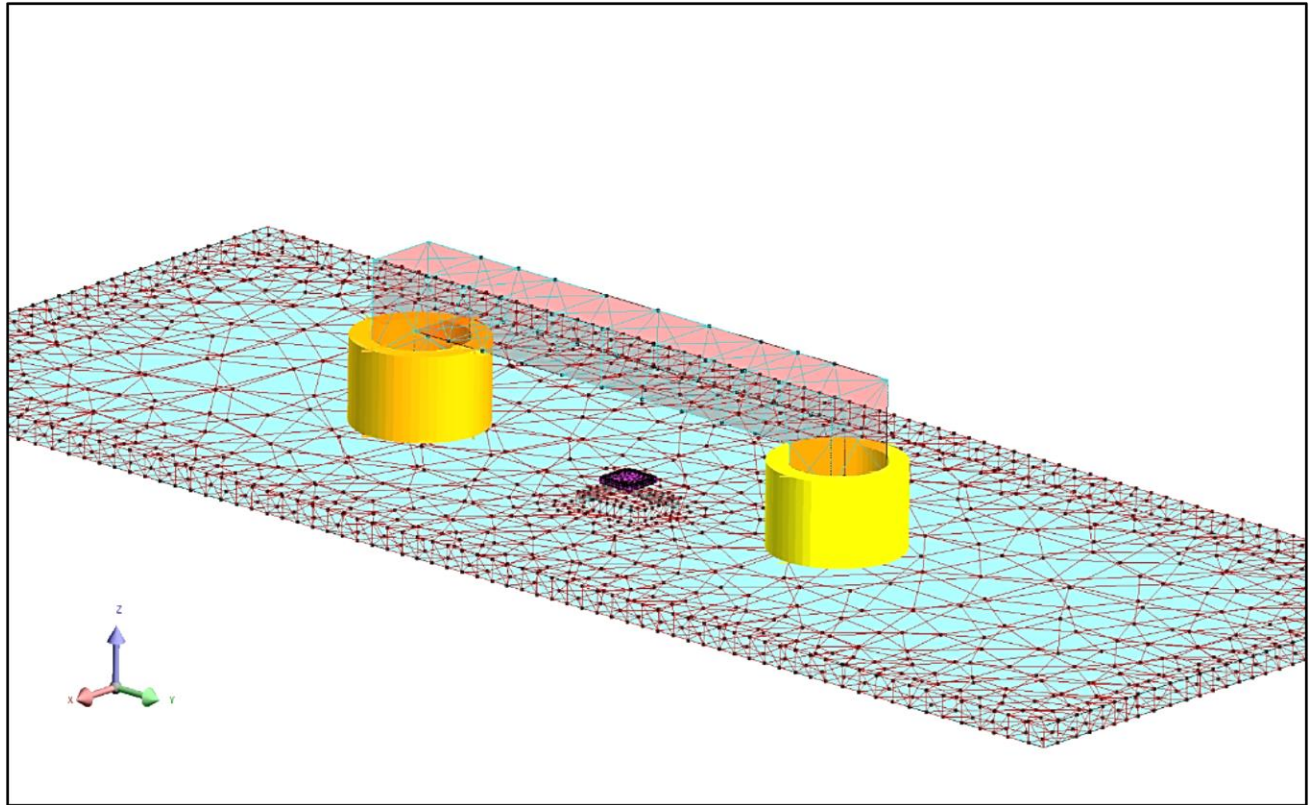


Figure III.32-Système de détection de défaut sub-surface en 3D

IX-Résultat de simulation du modèle du capteur MFL avec un défaut sub-surface

Les résultats de simulation ci-dessous représentent la répartition des Lignes de contour de champ magnétique à proximité de l'outil MFL et de la densité du flux magnétique dans le système.

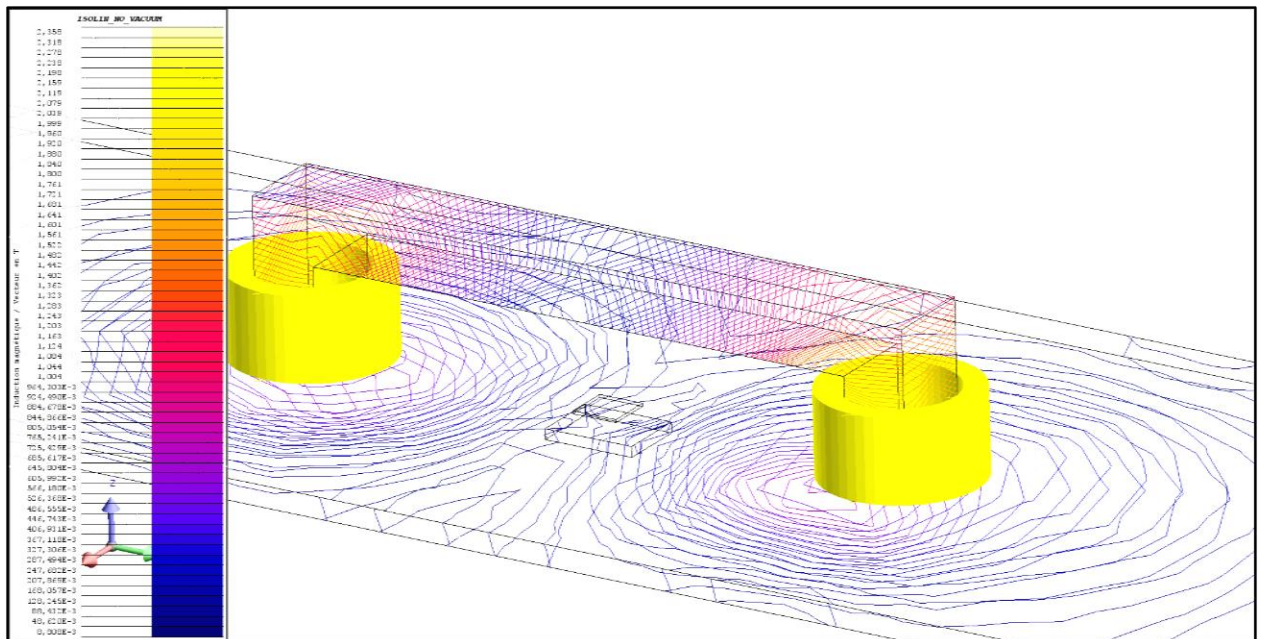


Figure III.33-Les Lignes de contour de champ magnétique de système

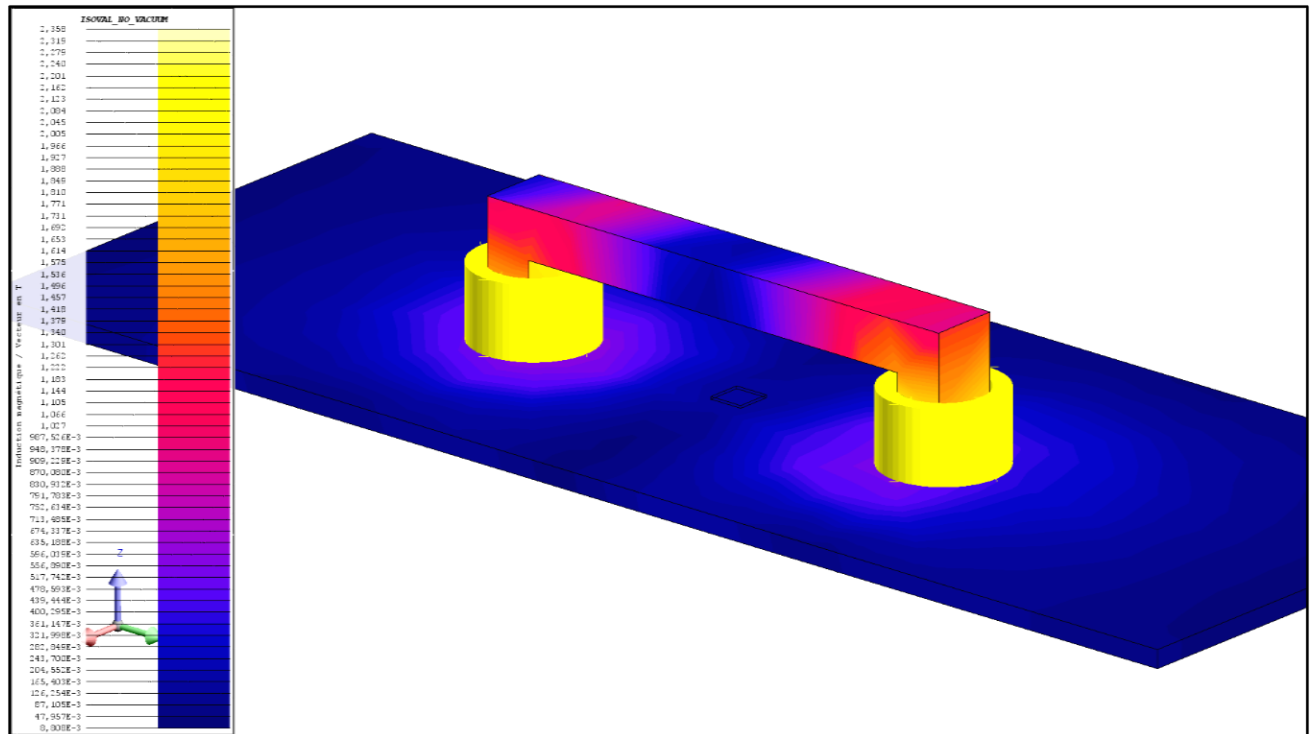


Figure III.34-Densité de flux magnétique

X-Effet de la variation de la profondeur du défaut sub-surfacique sur l'induction magnétique

:

Pour étudier l'effet de profondeur du défaut sub-surfacique de défaut sur la composant normale et tangentielle de l'induction magnétique du champ de fuite, nous fixons la longueur de défaut à 4 mm et la largeur à 3 mm puis nous faisant varier la profondeur de 0.1 mm à 0.95mm.

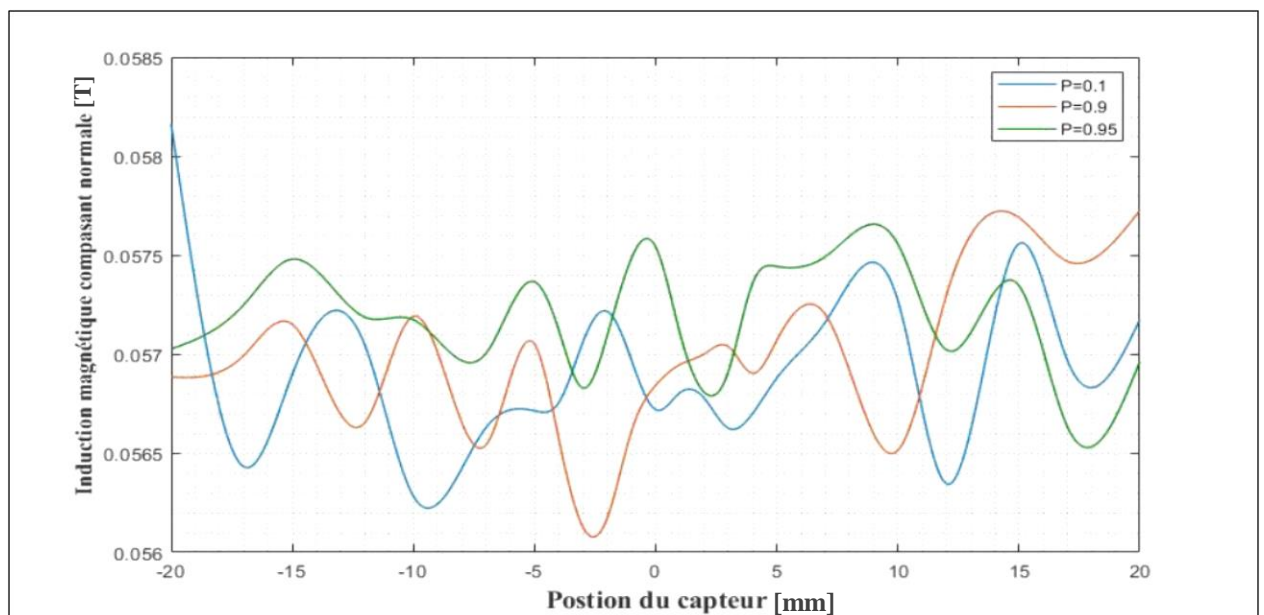


Figure III.35-Composante normale du signal MFL en fonction du déplacement du capteur pour plusieurs défauts ayant des profondeurs différentes

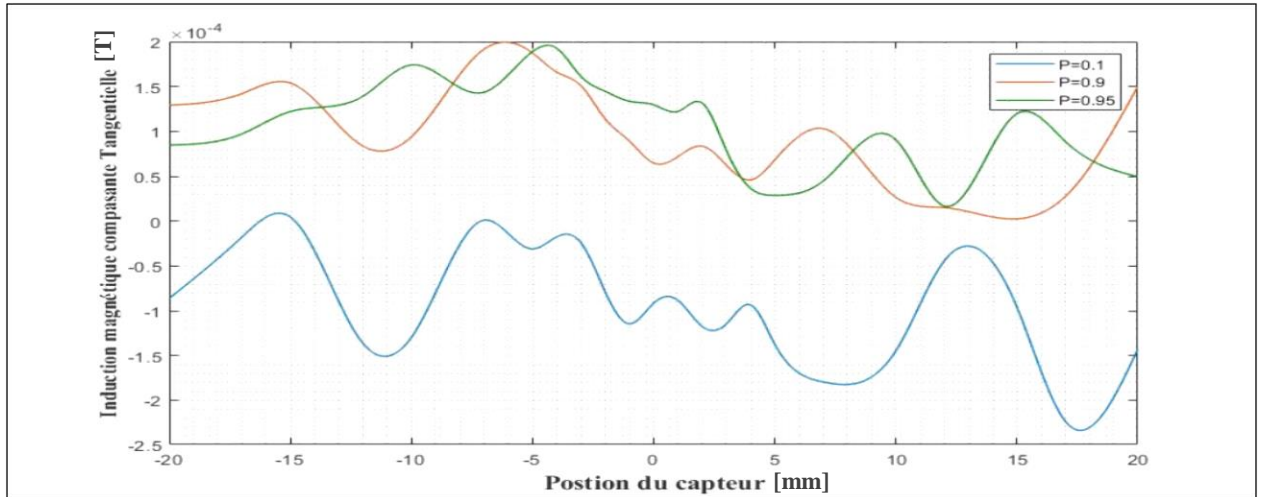


Figure III.36-Composante tangentielle du signal MFL en fonction du déplacement du capteur pour plusieurs défauts ayant des profondeurs différentes

- ✚ A partir des résultats obtenus, on peut dire que la profondeur des défauts affecte les signaux des composants d'induction magnétique. On note que pour la composante normale d'induction magnétique, les variations du signal MFL sont très faibles et ont tendance à être stables. D'autre part, on remarque que pour la composante tangentielle que quand la profondeur du défaut augmente, le capteur commence à devenir plus sensible.

XI-Effet de variation des positions du défaut sous la surface sur les composantes du champ magnétique

Pour étudier l'effet de la variation des positions du défaut parallélépipède sous la surface de sur la réponse du capteur à effet Hall, nous faisons la variation de la position du défaut de 0.1 mm à 0.5 mm sous la surface.

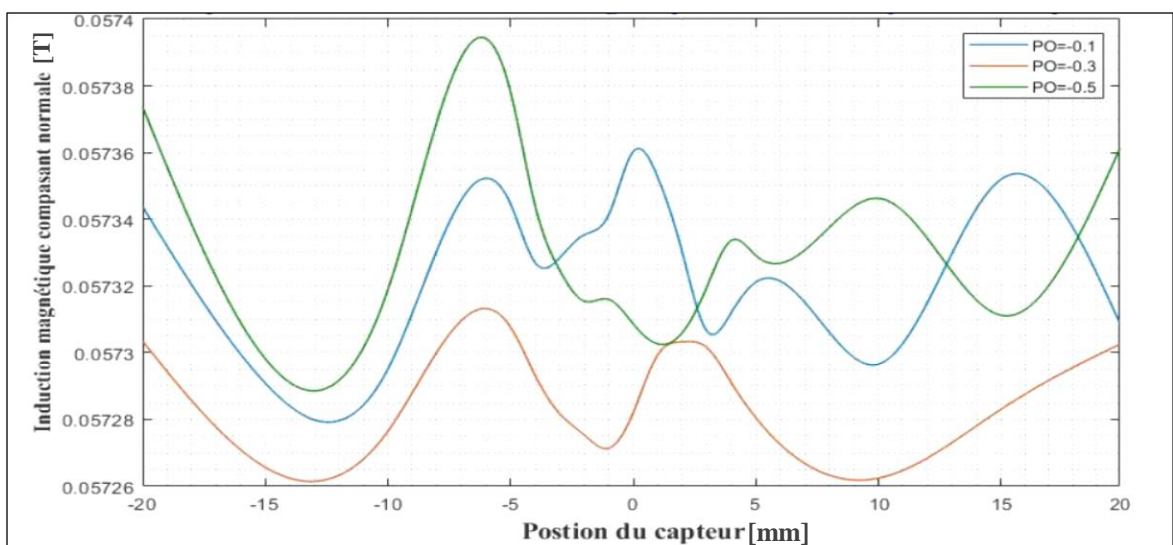


Figure III.37-Composante normale du signal MFL en fonction du déplacement du capteur pour plusieurs défauts ayant des positions différentes

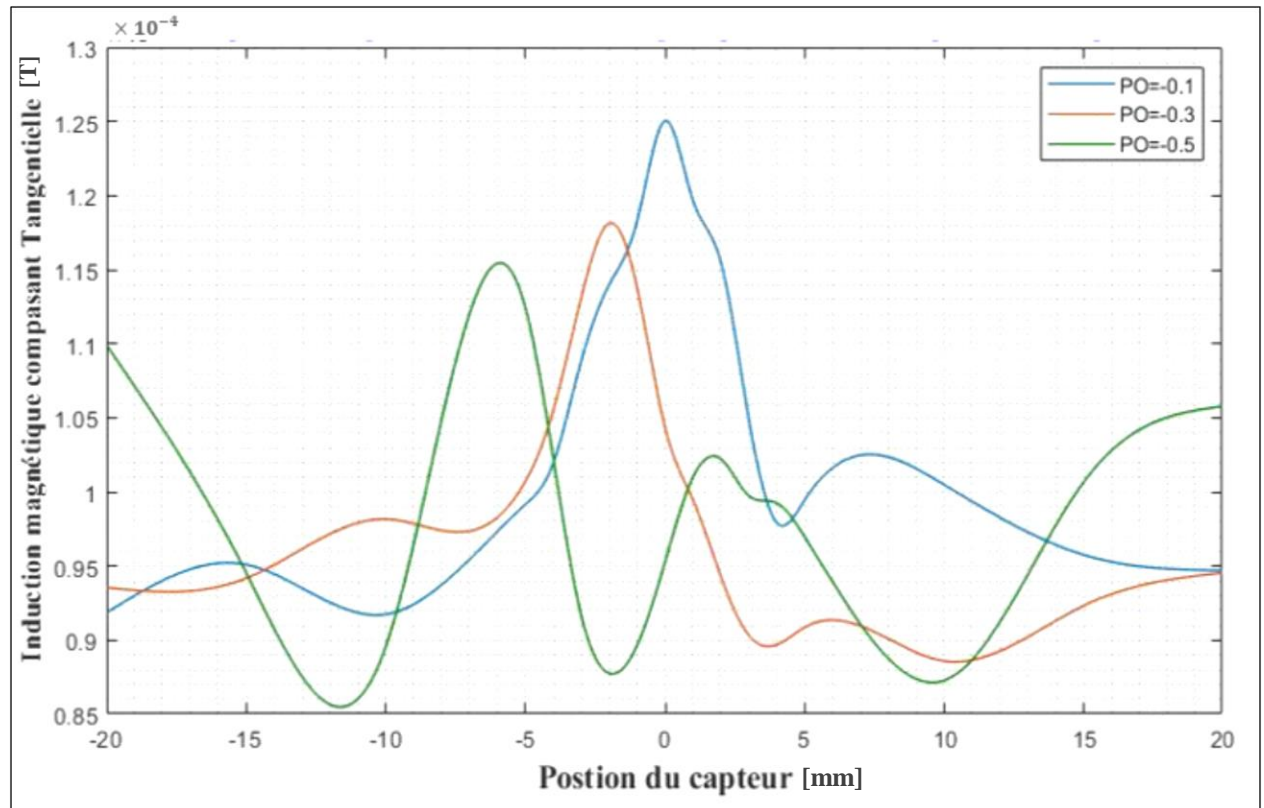


Figure III.38-Composante tangentielle du signal MFL en fonction du déplacement du capteur pour plusieurs défauts ayant des positions différentes

- ✚ D'après les résultats obtenus, on peut dire que les signaux de la composante tangentielle de l'induction magnétique sont liés à la position du défaut d'une manière prononcée en comparaison de la composante normale. En effet, la composante tangentielle subit une variation d'amplitude importante ainsi qu'un écartement important, à l'inverse de la composante normale où la variation d'amplitude est très faible.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons réussi à simuler le comportement d'un système de détection de défaut par MFL dont la configuration est tridimensionnelle. Les résultats ont montré le lien entre le signal détecté et les dimensions d'un défaut parallélépipède et la position du défaut. En résumé :

- La variation du signal dans la zone de défaut et sa stabilité en son absence
- Les variations de paramètre de défaut affectent les signaux de la composante tangentielle de l'induction magnétique plus que la composante normale
- Quand la profondeur et la largeur de défaut augmente l'amplitude du champ de fuite augmente

- Quand la longueur du défaut augmente le signal s'écarte tout en gardant la même amplitude maximale
- Quand le Lift-off augmente le capteur devient moins sensible

- Enfin, le défaut est détecté avec moins de précision lorsqu'il s'éloigne de la surface

Références

- [1] M. C. Yavuz Ege*, «A new measurement system using magnetic flux leakage method in pipeline,» 16 November 2017.
- [2] S. Akila, Etude de la conformité des pipelines destinés aux hydrocarbures, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA, Faculté des Sciences de l'Ingéniorat, 2017/2018.
- [3] M. ALLOUTI, Étude de la nocivité de défauts dans les canalisations de transport de gaz tels les éraflures, les enfoncements ou leurs combinaisons, Laboratoire de Mécanique Biomécanique Polymère Structures (LaBPS), Université Paul Verlaine de Metz (UPVM), 2010.
- [4] S. T. H. H. R. S. Hassan Iqbal*, «Inspection and maintenance of oil & gas pipelines,» 20 June 2016.
- [5] A. Ramirez-Martinez, «Design and Validation of an Articulated Sensor Carrier to Improve the Automatic Pipeline Inspection,» 21 March 2019.
- [6] B. A. Yassine et Mazari Mohammed Abdelghafor, Etude et Simulation d'un Dispositif d'Inspection Par MFL des Installations de, Ouargla, Mémoire MASTER ACADEMIQUE, 2018.
- [7] «Three-axis magnetic flux leakage in-line inspection simulation,» École des sciences de l'information et de l'ingénierie, Université du Nord-Est, Shenyang , Chine, 25 May 2012.
- [8] K. Merwane et D. Abderrahmane, Contrôle Non Destructif par Flux de Fuite Magnétique Appliqué aux Pièces Ferromagnétiques, M'SILA: UNIVERSITE, 2018 /2019.
- [9] I. J.-W. K. C. L. a. J.-J. L. Seunghee Park, Magnetic Flux Leakage Sensing-Based Steel, vol. 8 pages, Publishing Corporation, 2014.
- [10] G. Ismail et A. Moubarek, Etude et simulation 3D d'un capteur MFL destiné pour l'inspection des Equipements des installations hydrocarbures, UNIVERSITE M'SILA DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE, 2020.
- [11] R. Hamia, Performances et apports des capteurs magnétiques à très haute sensibilité aux systèmes de contrôle Non Destructif par Courant de Foucault, Français: Electromagnétisme. Université de Caen, 2011.
- [12] G. Chemseddine et R. Rassim, Modèles neuronaux pour le CND à flux de fuite magnétique, Université Mohammed Seddik Benyahia Jijel, Département d'Electrotechnique, 2019.
- [13] <http://www.mac-ndt.com/magnetic-flux-leakage>. [En ligne].
- [14] A. M. E. Amine, Etude du contrôle non destructif (CND) par courants de Foucault et simulation par la méthode des éléments finis, Oum El Bouaghi: Université Labri Ben M'hidi De Oum El Bouaghi, Département De Génie Electrique, 2015/2016.
- [15] I. HARZELLI, CONTRIBUTION A LA MODELISATION PAR LA METHODE DES VOLUMES FINIS D'UN TRANSFORMATEUR DE COURANT, Université Mohamed Khider – Biskra Faculté des Sciences et de la technologie, 2014.
- [16] O. Assia, Modélisation tridimensionnelle des effets d'extrémités dans les parties frontales des machines asynchrones par logiciels d'éléments finis 2D et 3D, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran MOHAMED BOUDIAF - USTOMB -Faculté de Génie Électrique, 2013.
- [17] M. S. S. Turaj Azizzadeh, Three-Dimensional Finite element and experimental simulation of magnetic flux leakage-type NDT for detection of Pitting corrosions, Iran university of science and technology, 2017.

- [18] I. B. Moallem, Magnetic Flux Leakage System for External Robotic Inspection of Oil and Gas Pipelines, HOUSTON, TEXAS : RICE UNIVERSITY, April,2015.
- [19] M. O. A. Z. AMINA, Application de la méthode des éléments finis pour la simulation 3D d'un dispositif de détection de défauts dans les matériaux conducteurs, UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA, Faculté de sciences de l'ingénieur, 2018/2019.
- [20] G. J. Maolin Cai, Theory and Application of Magnetic Flux Leakage Pipeline Detection, China: School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, 2015.
- [21] D. N. Abdelkader, Méthode des éléments finis Enseignant, Algérie: Université Batna 2 Batna.
- [22] R. R. A. Z. M. M. Z. N. Nor Afandi Sharif, Theory and development of magnetic flux leakage sensor for flaws detection, Malaysia: Universiti Kebangsaan Malaysia, Malaysia, Department of Industrial Electronic, German Malaysian Institute, 2019.
- [23] M. B. Islam, Réalisation de cas de démo Flux accessibles depuis le superviseur, Université de Lorraine, Faculté des Sciences et Technologies, 2014.
- [24] R. M. RAHAL KAIS, Détection des défauts de court-circuit statorique dans la machine synchrone à aimants permanents, Université Akli Mohand Oulhadj de Bouira, Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées, 2017 /2018.
- [25] v. Q. Dinh, Vers une simulation par éléments finis en temps réel pour le génie électrique, Université Grenoble Alpes, 2016.
- [26] G. Bara, Modélisation des machines électriques dans Flux 3D Overlay 3D, Sciences de l'ingénieur, 2015.
- [27] R. s. zarfa youcef, Modélisation numérique d'un Alternateur à griffe, université SAAD DAHLAB DE BLIDA, Département D'électronique , 2018-2019.

